

MÉXICO 2010



GOBIERNO
FEDERAL

SAGARPA

inifap

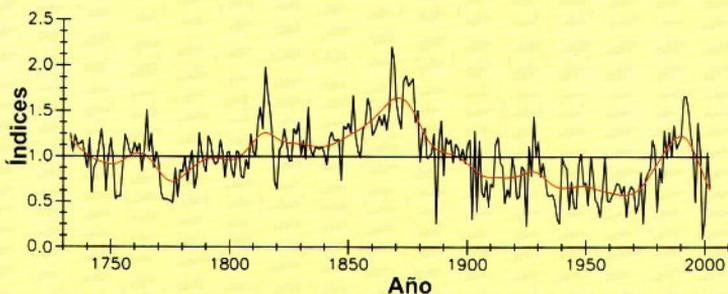
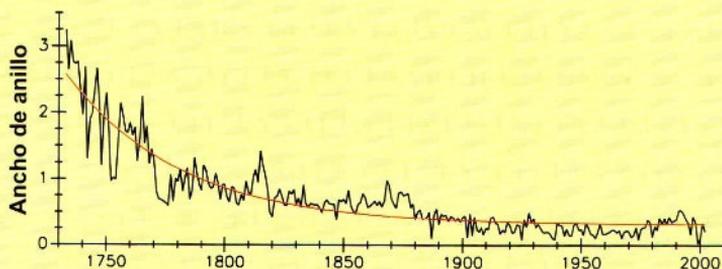
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

$$R_t = A_t + C_t + SD_{1t} + SD_{2t} + E_t$$

Curva Exponencial Negativa

$$f(i) = a \cdot t(i+p)^b \cdot \exp(-c \cdot t(i+p)) + k$$

a	b	c	k	p
2.324	0.021	0.000	0.31	20



Estandarización y desarrollo de series dendrocronológicas en México

Dr. José Villanueva Díaz, M. C. Julián Cerano Paredes,
Dr. David W. Stahle, Ing. Vicenta Constante García y
Dr. Juan Estrada Ávalos

CENID-RASPA

Gómez Palacio, Dgo., julio del 2010

Folleto Técnico 16

Serie MX-0-310601-13-10-00-09-16

ISBN: 978-607-425-350-4

25 Aniversario

Ciencia y Tecnología
para el Campo Mexicano



Vivir Mejor

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Lic. Francisco Javier Mayorga Castañeda
Secretario

M. C. Mariano Ruiz-Funes Macedo
Subsecretario de Agricultura

Ing. Ignacio Rivera Rodríguez
Subsecretario de Desarrollo Rural

Dr. Pedro Adalberto González Hernández
Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General

Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M. C. Arturo Cruz Vázquez
Encargado del Despacho de la Coordinación
de Planeación y Desarrollo

Lic. Marcial A. García Morteo
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMOSFERA

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director

Estandarización y Desarrollo de Series Dendrocronológicas en México

**Dr. José Villanueva Díaz
M.C. Julián Cerano Paredes
Dr. David W. Stahle
Ing. Vicenta Constante García
Dr. Juan Estrada Ávalos**

**CENID-RASPA
2010**

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Av. Progreso No. 5 Barrio de Santa Catarina,
Delegación Coyoacán, C. P. 04010 México, D. F.
Teléfono: (55) 38718700
<http://www.inifap.gob.mx>

ISBN: 978-607-425-350-4

Primera Edición 2010

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros medios, sin el permiso previo y por escrito de la institución.

PRESENTACIÓN

El desarrollo de los árboles es función de una serie de factores, entre los que se encuentran los genéticos, climáticos, edáficos, etc. Cuando se analizan los crecimientos anuales en una sección transversal del tronco o fuste de un árbol, se observará, que las bandas o anillos anuales son mayores en su etapa juvenil y decrecen conforme el árbol se torna adulto; esta situación, además de la edad, tiene una explicación geométrica, al distribirse el crecimiento anual en una superficie cada vez mayor y por ende generar crecimientos más angostos, que simulan una tendencia en «j» invertida, también conocida como curva exponencial negativa. Cuando se quieren comparar estos crecimientos con registros climáticos instrumentales, se observará una falta de correspondencia entre ellos y se obtendrán asociaciones no significativas entre las variables involucradas. Ante esta problemática, una de las opciones es estandarizar o normalizar los anillos de crecimiento, de tal manera que se elimine la tendencia biológica, es decir, que los anillos de la parte interna puedan ser comparados con los de la parte externa y viceversa, situación que involucra la remoción de la tendencia por edad y la transformación de las series de ancho de anillos en series estacionarias, adimensionales y comparables entre sí. Estas series o índices tendrán una media de «1.0» y varianza relativamente constante.

La estandarización de series dendrocronológicas amalgama una serie de aspectos, que incluyen desde el muestreo en campo, proceso de fechado de los anillos de crecimiento al año exacto de su formación y aplicación de técnicas estadísticas, complementadas con modelos computacionales específicos para este propósito como lo es el programa ARSTAN.

En este folleto técnico se plasman los principios básicos de la estandarización, se analiza la parte fundamental del programa ARSTAN y se ejemplifica su aplicación para la generación de series dendrocronológicas en México. Los profesionistas forestales, biólogos, hidrólogos y aquellos con interés en la generación de series de tiempo para aplicaciones paleoclimáticas, hallarán en este folleto un soporte técnico de gran valía para dicho propósito.

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director del CENID-RASPA

CONTENIDO

I.	INTRODUCCION.....	1
II.	Formación de un anillo de crecimiento anual.....	2
III.	Factor edad en la formación del anillo.....	3
IV.	Bases de la estandarización.....	5
V.	Modelo lineal.....	7
VI.	Estandarización de anillos de crecimiento.....	9
VII.	PROGRAMA ARSTAN.....	13
7.1.	Funcionamiento del programa ARSTAN.....	13
7.2.	Parámetros de control en el menú del programa ARSTAN.....	19
7.3.	Importancia de la estandarización.....	21
7.4.	Opciones para el segundo detrending.....	23
7.5.	Cálculo de la cronología.....	28
7.6.	Análisis del intervalo común.....	29
7.7.	Tareas que realiza el programa ARSTAN.....	29
7.8.	Eigenvalues, Eigenvectors y Componentes principales.....	33
VIII.	RESULTADOS.....	35
8.1.	Desarrollo de una cronología con ARSTAN.....	35
8.2.	Segundo detrending.....	40
IX.	CONCLUSIONES.....	51
X.	AGRADECIMIENTOS.....	52
XI.	LITERATURA CITADA.....	53

INTRODUCCIÓN

La generación de cronologías con anillos de árboles en México es incipiente y a pesar de la riqueza del territorio nacional, en términos de biodiversidad y alto potencial en número de especies útiles con fines dendrocronológicos. Esta ciencia no ha tenido el desarrollo y dinamismo que caracteriza a otros países del Continente Americano, donde grupos interdisciplinarios con un gran número de miembros, trabajan intensamente y de manera coordinada en diversos aspectos básicos de dendrocronología y en sus múltiples aplicaciones. Este rezago, se atribuye en parte a la creencia errónea y que perduró por mucho tiempo, que indicaba que especies en latitudes tropicales no producían verdaderos anillos de crecimiento anual, así como al desconocimiento del proceso metodológico para la generación de series de tiempo de fuentes biológicas como son los árboles, donde el enfoque inicial, debería centrarse en definir el potencial de varias especies útiles con fines dendrocronológicos y posteriormente, generar series de tiempo extensas con aplicación en temas como paleoclima, cambio climático, productividad forestal, disponibilidad de recursos hídricos, impacto del clima en la producción histórica de alimentos y estabilidad social, conservación de ecosistemas, entre otras.

El proceso de generar cronologías de anillos de crecimiento involucra una serie de acciones entre las que se encuentra, la selección de especímenes sensibles en sitios con el menor disturbio posible, ubicación de arbolado viejo, obtención y procesamiento de muestras, medición, fechado y elección de alternativas de estandarización para la generación de índices dendrocronológicos (Villanueva *et al.*, 2007). Cada una de estas fases es de vital importancia para generar cronologías con las mejores características en términos estadísticos, que permitan derivar con la mejor confiabilidad, conocimiento científico de aplicación en los campos descritos.

Los principios básicos para la selección de individuos longevos, muestreo de núcleos de crecimiento y de secciones transversales en diversas especies arbóreas, obtención y preparación de muestras, fechado de anillos de crecimiento y medición de cada banda anual o estacional ha sido descrito de manera detallada en folletos técnicos y científicos previamente publicados al respecto (Cerano *et al.*, 2009; Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2004, 2006, 2007, 2009). El proceso final involucrado en el proceso de estandarización y desarrollo de cronologías es la generación de índices o series de tiempo, a través de la fijación de curvas suavizadas, líneas rectas de pendiente positiva, negativa, horizontal, uso de modelos de crecimiento de incremento radial, etc., metodología que se pretende abordar en el presente documento.

II. Formación de un anillo de crecimiento anual

En un árbol, cada anillo es el resultado de un crecimiento anual, que inicia su desarrollo al principio de la estación de crecimiento, generalmente primavera y culmina en las estaciones de verano o principios o finales de otoño, de tal forma que, para algunas especies, un anillo de crecimiento es de carácter anual y constituye una fuente de información de las condiciones ambientales dominantes que imperaron durante su formación; de esta manera, un análisis de una secuencia de crecimientos, permite generar series de tiempo de alta resolución, al fecharse cada banda de crecimiento al año exacto de su formación y de esta manera, determinar los factores climáticos que tuvieron una mayor influencia previo o durante su formación (Fritts, 1976).

Un anillo de crecimiento se integra de dos bandas, con características morfológicas y estructurales bien definidas: madera temprana o de primavera y madera tardía o de verano. La madera temprana, se caracteriza por poseer una menor densidad en comparación con el subsiguiente crecimiento más denso (madera tardía), el cual se forma durante la fase terminal del crecimiento (Figura 1).

Un mayor diámetro de las traqueidas presentes en la madera temprana es una respuesta fisiológica del árbol para favorecer el

transporte de nutrientes, agua, hormonas, en su etapa de mayor crecimiento. La madera tardía, por su parte, cumple las funciones de transporte y resistencia mecánica, por lo que, un diámetro reducido junto con una pared celular gruesa, además de lo anterior, también pueden evitar embolismos (Bernal y Terrazas, 2000).

La diferencia estructural entre la madera tardía de una estación y la madera temprana del siguiente año, amén del cofechado y de su correlación con el clima, constituye la base técnica para el reconocimiento de la naturaleza periódica de producción de madera o anillo de crecimiento anual (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976, Stahle, 1999).

III. Factor edad en la formación del anillo

La relación entre el clima y el ancho de anillo, ocurre debido a que el crecimiento de la planta está influenciado por diversos factores ecológicos, los cuales varían a través del ciclo de vida de la planta y en ciertos períodos pueden afectar el crecimiento y la forma de muchas estructuras que lo constituyen (Fritts, 1976).

Sin embargo, aunado a los factores ambientales que afectan el crecimiento del anillo anual, la edad del organismo, que se asocia a un área de fuste (tronco principal) cada vez mayor, influyen de manera importante en determinar el grosor del anillo; es decir, cuando un árbol es joven, los primeros anillos de crecimiento son grandes, porque la superficie en que el árbol distribuye el crecimiento también es pequeña, pero a medida que el árbol crece en grosor, los anillos reducen su tamaño; lo anterior debido a que, independientemente de la calidad del sitio que predispone un crecimiento similar año con año, al paso del tiempo, el árbol incrementa el diámetro del fuste y por ende su área basal, lo que conlleva a la formación de anillos más angostos (Figura 1).

Cuando se observa una sección transversal longeva, es claro apreciar que los crecimientos más recientes son más pequeños. Si esta condición de crecimiento se relaciona directamente con clima, no será indicativo de que esta reducción, sea el resultado directo de la presencia de condiciones ambientales más limitantes, sino más bien, a una disminución gradual en los incrementos anuales, derivado



Figura 1. Efecto de la edad en el crecimiento anual, situación que propicia el desarrollo de anillos más grandes en la etapa juvenil del árbol y una disminución gradual en crecimiento a medida que el árbol se torna longevo. Se indica el ancho de anillo total y la división del anillo anual en madera temprana y tardía (RW, EW y LW respectivamente, por sus siglas en inglés).

de la edad. Visto en forma gráfica, se tendría una curva denominada comúnmente como «J» invertida, a la cual se ajusta una curva exponencial negativa (Figura 2).

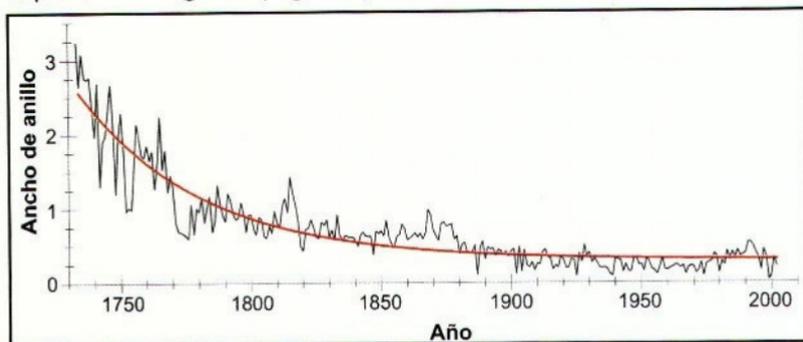


Figura 2. Esquematación del crecimiento de un árbol en «J» invertido, con una caída en forma exponencial negativa atribuido al efecto de la edad y a un área de fuste cada vez mayor.

En estudios dendrocronológicos, el objetivo es reconstruir la variabilidad ambiental con base en el crecimiento anual de los anillos, por tal motivo, se contemplan dos etapas básicas, 1) eliminar el ruido debido a factores biológicos como la edad y otros factores no ambientales, que han influido en determinado período en el crecimiento, y 2) maximizar la señal climática, mediante el proceso de estandarización de cada una de las muestras analizadas, metodología que permite generar índices de anillo y comparar series de diferentes edades, a las cuales se les ha eliminado la tendencia biológica en crecimiento.

IV. Bases de la estandarización

El proceso clásico de estandarización implica que a los valores contenidos en una serie de datos, se les extrae el valor de la media y al valor residual resultante de este proceso, se divide entre la desviación estándar de la muestra. El enunciado anterior, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$Z_i = (X_i - \bar{X})/S$$

Donde:

Z_i = Valor estandarizado de X_i , también conocido como "z-scores"

X_i = Valor de ancho de anillo

\bar{X} = Media de la muestra (valor central más probable de una serie de datos)

S = Desviación estándar de la muestra (valor indicativo de la dispersión de los datos con respecto a la media).

La serie de datos normalizada tendrá ahora una media de "0" y una desviación estándar de 1.0. Este proceso, sin embargo, no es recomendable para estudios dendrocronológicos, debido a que los árboles que crecen simultáneamente en un sitio determinado, no tendrán el mismo incremento radial año con año, a consecuencia de diferencias en edad, competencia y a condiciones particulares del rodal (Fritts, 1976).

El comportamiento de los datos de grosor de los anillos fue analizado en sus inicios por Douglass (1919), quien encontró, que el uso de la ecuación de normalización, por si sola, no era suficiente para comparar los árboles presentes en un sitio o entre sitios diferentes, ya que no removía tendencias biológicas en crecimiento, debido a diferencias en edades de los árboles muestreados. Actualmente existe una gran variedad de técnicas estadísticas y de utilidad práctica para estandarizar anillos de crecimiento de árboles, cuyo resultado final debe ser la remoción de la tendencia en crecimiento con el objetivo

de maximizar la señal buscada; esto puede lograrse mediante la remoción de parte de la varianza, a frecuencias más bajas que la longitud de las series (Grissino-Mayer *et al.*, 1992) y la aplicación del método más apropiado de estandarización a cada una de ellas (Cook y Kairukstis, 1990).

En dendrocronología, el proceso de estandarización implica la remoción de la tendencia por edad y la transformación de las series de ancho de anillos en series estacionarias, adimensionales y comparables entre si. Estas series o índices tendrán una media de «1.0» y varianza relativamente constante (Fritts, 1976) (Figura 3).

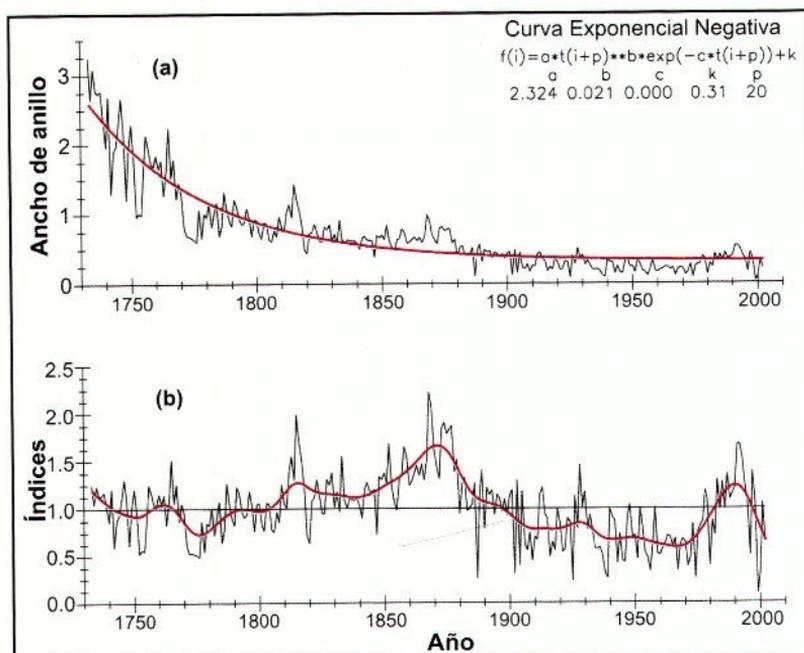


Figura 3. Estandarización de una serie de crecimiento con una media de 1.0 y varianza homogénea. La figura superior (a) ancho de anillo de una muestra, señala la caída exponencial en crecimiento por efecto de la edad. Al aplicar una curva de ajuste a cada una de las muestras, en este caso, una curva exponencial negativa, se generan índices normalizados que resultan de dividir el valor de la curva de ajuste, entre el ancho del anillo (b), se eliminan las tendencias biológicas y geométricas y se maximiza la señal climática.

V. Modelo lineal

El crecimiento anual de una especie es la sumatoria de un cúmulo de procesos medioambientales y fisiológicos, cuyo resultado final se traduce en un incremento radial. El anillo anual o una serie de anillos de crecimiento se componen por señales y ruidos. Una señal es aquella información presente en los anillos de crecimiento, que es relevante para el estudio de un problema específico; mientras que el ruido es aquella información presente también en los anillos de crecimiento, pero que es irrelevante en ese momento para la solución de dicho problema (Fritts, 1976). Visto desde esta perspectiva, una serie de anillos de crecimiento es un conjunto de señales, que pueden ser señal o ruido, dependiendo del contexto en que se realice su aplicación (Delgado, 2000). Así por ejemplo, cuando se quiere saber la frecuencia en el tiempo de algunos disturbios como incendios, incidencia de plagas o enfermedades, movimiento de taludes, etc., el disturbio en este caso será la señal buscada, mientras que la información atribuida a variables climáticas, influencia de la heterogeneidad en la fertilidad del suelo, la carga genética del individuo, etc., será el ruido; caso contrario ocurre cuando la señal buscada es la información climática, en cuyo caso, el resto de señales pasan a ser ruido. La clave en estudios dendrocronológicos es definir el conjunto de señales y resaltar sólo aquellas de mayor relevancia para los objetivos buscados, así como detectar y discriminar, las que son de poca importancia para el estudio en cuestión.

El modelo lineal que involucra las señales presentes en una serie de anillos de crecimiento se expresa de la siguiente manera (Cook y Kairiukstis, 1990):

$$\text{Donde: } R_t = A_t + C_t + SD_{1t} + SD_{2t} + E_t$$

R_t = Grosor del anillo de crecimiento en un año determinado (,).

A_t = Tendencia en crecimiento debido a la edad del árbol y por cuestiones de un diámetro de fuste cada vez mayor, que implica una mayor área basal.

C_t = Efecto del clima, que ocurrió previo o durante la formación del anillo de crecimiento.

D_{1t} = La ocurrencia de factores de disturbio dentro del rodal (disturbios endógenos), como por ejemplo, la caída de árboles debido a un ventarrón, disturbio que disminuye la competencia y favorece el crecimiento de los individuos remanentes que permanecieron en pie.

D_{2t} = La ocurrencia de factores de disturbio fuera del rodal (disturbios exógenos), como por ejemplo, la presencia de una plaga, que al defoliar los árboles originan una reducción en su crecimiento; incendios de alta intensidad con impactos en la cantidad de área foliar remanente y daños físicos al organismo, que promueven una reducción en crecimiento después del incendio y una liberación posterior en crecimiento, derivado de un incremento en las fertilidad del suelo.

E_t = Error o variabilidad no explicada por los otros procesos, incluido contaminación.

Los deltas (S) asociados con D_{1t} y D_{2t} son indicadores binarios de presencia o ausencia (1 ó 0) de disturbios en las series de crecimiento.

Si existe interés en maximizar alguna de estas señales, las remanentes tienen que ser minimizadas; así, si en este modelo lineal, se desea maximizar la señal climática (C_t), se requerirá minimizar la influencia del crecimiento debido a la edad y realizar una selección muy cuidadosa de los árboles involucrados; o bien, obtener un gran tamaño de muestra, con el fin de descartar aquellos especímenes con problemas de crecimiento y retener sólo los que poseen una mínima influencia de factores endógenos y exógenos.

La remoción de la tendencia por la edad y la transformación de las series de ancho de anillo en series estacionales, adimensionales y comparables entre si, es el paso más importante para la generación de índices dendrocronológicos (Fritts, 1976, Cook, 1987). Estos índices generalmente se obtienen, al dividir el valor medido del ancho de anillo entre el valor proporcionado por una curva de ajuste (Figura 4).

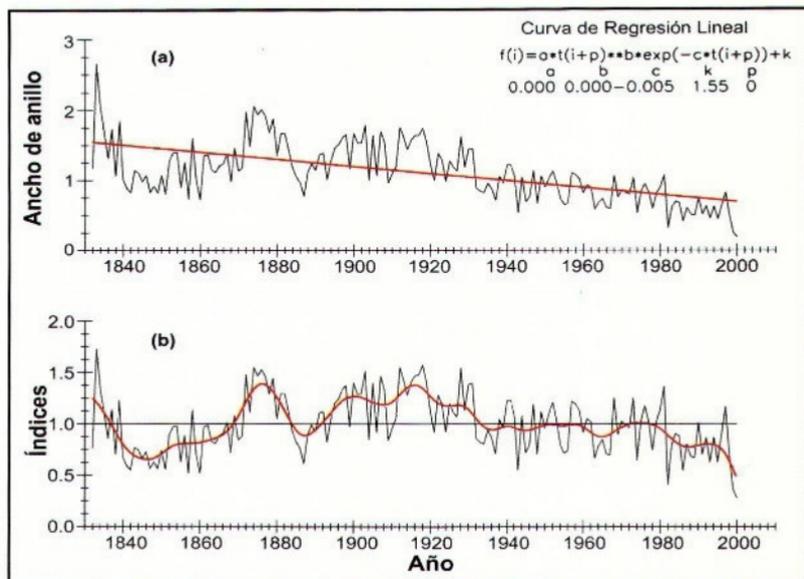


Figura 4. Estandarización de una serie de crecimiento con una media de 1.0 y varianza homogénea. La figura superior (a) muestra el crecimiento de un individuo con una caída en el grosor de sus anillos, por efecto de la edad. En esta situación, el crecimiento no se ajusta a una exponencial negativa, pero sí a una regresión lineal con pendiente negativa. Al dividir el valor de la línea de regresión entre el ancho del anillo, se genera una serie de índices normalizados (b), se eliminan las tendencias biológicas y geométricas y se maximiza la señal climática.

VI. Estandarización de anillos de crecimiento

El proceso de estandarización para la remoción de tendencias en las series de crecimiento se encuentra en constante evolución, producto de la actualización y mejoramiento continuo de las técnicas estadísticas utilizadas para extracción de la señal climática, así como al progreso acelerado en el desarrollo tecnológico de equipos computacionales, que permiten cada día contar con análisis más rápidos y sofisticados (Delgado, 2000). No obstante lo anterior, estos progresos técnicos y científicos, jamás podrán substituir la experiencia, criterio y conocimiento del personal encargado de generar estas series de tiempo, particularmente si se toma en cuenta, que el investigador involucrado en la colecta de las muestras, por lo general, es el mismo que da seguimiento al desarrollo de las series de tiempo

dendrocronológicas, situación que le permite incluir en este proceso, sólo aquellas series que a su juicio y con la ayuda de herramientas estadísticas, maximicen la señal común y posean el menor ruido posible.

La remoción del crecimiento atribuido a la edad y a un área de fuste cada vez mayor, es uno de los problemas básicos para generar series de tiempo dendrocronológicas, con la mayor señal posible. Existen diversos modelos de crecimiento, cuyas funciones pueden ajustarse a una serie con fines dendrocronológicos (Schweingruber, 1988), entre ellos las funciones lineales o exponenciales negativas, la función Weibull, funciones de incremento (Warren, 1980), modelos polinomiales con filtros especiales (Cook y Kairiuksis, 1990), curva polinomial o transformaciones de potencia Box-Cox (Liutsko, 2008), etc. Otros métodos no requieren la eliminación de la tendencia biológica o la obtención de una cronología maestra, debido a que se fundamentan en la identificación e interpretación de cambios bruscos en el grosor de los anillos de crecimiento (Desplanque *et al.*, 1999).

Uno de los métodos de estandarización más conocidos es el denominado «Curva Regional Estandarizada» (RCS, por sus siglas en Inglés), metodología descrita por Fritts (1976) y que fue popularizada más tarde por Becker (1989) y Briffa *et al.* (1992) y aplicada extensamente en reconstrucciones paleolimáticas, particularmente para preservar información de baja frecuencia (Esper *et al.*, 2002; Naurzbaev *et al.*, 2004; D'Arrigo *et al.*, 2005, 2006). El método RCS se fundamenta en la generación de una curva de crecimiento generalizada para una especie y región específica, de preferencia no muy extensa. Para desarrollar esta curva de crecimiento, se requiere obtener una gran cantidad de muestras (núcleos de crecimiento, secciones transversales) de la especie en cuestión, que cubra diversas edades, condiciones de suelo en términos de fertilidad, profundidad, exposición, etc.; con esta curva de crecimiento teórica será factible predecir las tendencias en crecimiento de esa especie a través del tiempo. Este modelo regional de crecimiento, entonces, se utiliza para el proceso de estandarización de la especie en cuestión, al fijar

a todas las series estudiadas esta curva de crecimiento y obtener índices adimensionales procedentes de esta relación.

Uno de los problemas para el uso de esta técnica es que las muestras involucradas deben de contener el centro o primer anillo de crecimiento, además de obtenerse de un radio que no muestre irregularidades en su crecimiento, situación difícil de cumplir en especies con presencia de contrafuertes y particularmente en arbolado viejo que tiene problemas de pudrición en la parte interna del tronco; en tal caso, el último anillo de la muestra se asume como el primer anillo de crecimiento, situación que conlleva a errores significativos en el proceso de estandarización (Schweingruber et al., 1990) y a fallas en detectar la variación de baja frecuencia (Datsenko et al., 2009)

Un método alternativo de estandarización consiste en distribuir un área basal constante en una superficie del tronco que se incrementa de manera continua, particularmente para aquellas especies que crecen en espacios abiertos de climas semiáridos, caracterizados por mostrar un rápido decrecimiento en el grosor de sus anillos durante la etapa inicial de crecimiento, seguido por un proceso más gradual de disminución en grosor de los anillos conforme la especie se torna más senil. Esta asunción se deriva del hecho de que el incremento en el área basal se hace constante conforme el árbol madura, aun en situaciones de excelente calidad de sitio; el método conocido como método-C o «C-method» permite desarrollar un modelo que determina la tendencia en el grosor de los anillos de crecimiento para propósitos de estandarización» (Biondi y Qeadan, 2008).

La ventaja de este método en comparación con el RCS es de que se puede aplicar una curva de crecimiento esperada para cada árbol, mientras que en el método RCS se utiliza una sola curva regional; no obstante, en muestras que no tienen el centro del árbol, tiene la misma limitante del método de referencia, de que se debe estimar el número de anillos faltantes por alguno de los métodos existentes (Applequist, 1958), lo cual es difícil en árboles viejos que

han perdido gran parte de sus crecimientos a consecuencia de problemas de pudriciones.

En ciertos casos, la remoción de edad, se puede realizar de manera simple y eficiente, mediante la transformación logarítmica de las mediciones (Cook, 1987; Delgado, 2000), ya sea al obtener el logaritmo natural del grosor del anillo total, $\log(R_t)$; al agregar una constante al logaritmo natural, $\log(R_t + 1/6)$ o bien con el hiperseno, $Y_{(t)} = \log(Y_{(t)} + \text{SQRT}(Y_{(t)} + 1.0))$. Después de aplicar estas transformaciones a los valores de medición, el paso siguiente es la estandarización que culmina en la generación de series estacionarias, con una varianza relativamente homogénea y una media de 1.0. Los índices resultan de la división entre el valor de medición y el derivado de la curva ajustada; pero en el caso de utilizar logaritmos para estabilizar la varianza, los índices se obtienen mediante sustracción (Delgado, 2000). Existe el problema de que los índices calculados mediante división, en ocasiones pueden estar sesgados, particularmente para los crecimientos más recientes; esto ocurre, cuando la curva de estandarización tiende a cero e intercepta el eje «X»; en tal situación, se produce un error de ajuste que puede ser significativo, particularmente para estudios de cambio climático (Delgado, 2000). La ventaja de obtener índices por división es que reduce la heteroscedasticidad (variabilidad en la varianza de dos variables en estudio), aunque esta reducción depende de la bondad de ajuste del modelo aplicado. El problema de obtener los índices por sustracción es que mantiene la heteroscedasticidad y para subsanar este problema se sugiere estabilizar la varianza después de calcular el índice (Cook y Peters, 1997).

Uno de los paquetes estadísticos mejor conocidos para el análisis de anillos de crecimiento, se encuentra en la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (Dendrochronology Program Library, DPL, por sus siglas en inglés); paquete que contiene una serie de rutinas y subrutinas que facilitan el análisis de anillos de árboles para aplicaciones diversas.

El programa ARSTAN desarrollado por Cook (1985), que aunque no está integrado en el paquete DPL, por razones de tamaño, es el más popular para el proceso de estandarización y diversas versiones para Macintosh o Windows se puede descargar de manera gratuita del sitio: <http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/trl/public/publicSoftware.html>.

Debido a la importancia de este programa y a que todas las cronologías en México se han desarrollado con el uso de este procedimiento, se describe de manera detallada los principios básicos en que se sustenta, requerimientos de información y análisis que desarrolla y que son descritos en el manual (Cook y Holmes, 1986). En el presente documento, se sigue paso a paso las acciones descritas en la guía y se ejemplifica su aplicación, con resultados derivados de cronologías de anillos de árboles generadas de colectas obtenidas en México.

VII. PROGRAMA ARSTAN

7.1. Funcionamiento del programa ARSTAN

La función de ARSTAN es producir cronologías de series de anillos de crecimiento a través del proceso conocido como «detrending», metodología que implica la eliminación de tendencias en las series de crecimiento, mediante la fijación de modelos matemáticos como una curva exponencial negativa, curva flexible, línea recta con tendencia positiva, negativa, etc., para finalmente derivar en índices, que son generados mediante la estandarización o normalización de las mismas series y posteriormente aplicar una estimación robusta con la función del valor medio, para de esta manera remover los efectos endógenos derivados del disturbio, a los que han estado sujetos los árboles en un rodal.

El modelo autoregresivo de las series indexadas, generalmente produce un efecto favorable, en términos de maximizar la señal climática común presente en las series de crecimiento. El programa incluye además, análisis estadísticos muy completos del período

común de las series de tiempo, que contribuyen a caracterizar el grupo de datos y finalmente genera tres versiones de la cronología (Estándar, Residual y Arstan), en las cuales, se ha maximizado la señal común y minimizado el ruido (Figura 5). El programa contiene además un menú con una serie de opciones, donde el usuario tiene la libertad de seleccionar una o varias de ellas acorde a su criterio, de tal forma, que se obtengan los mejores resultados para las diversas condiciones y objetivos fijados en el estudio.

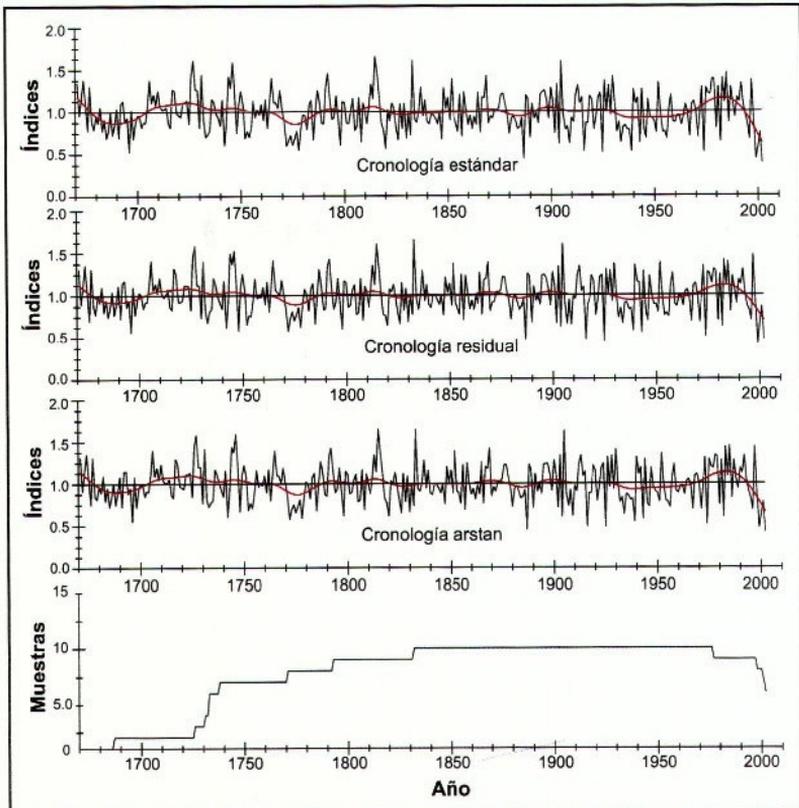


Figura 5. Para el desarrollo de una cronología, el programa ARSTAN genera tres versiones de la misma, que son: estándar, residual y arstan. La parte inferior de figura indica el número de muestras involucradas en el desarrollo de la cronología, para cada uno de los diferentes años de que consta la serie de tiempo. Observe como el número de muestras decae en la parte más antigua de la cronología.

Para correr ARSTAN, el primer paso consiste en disponer de una base de datos de medición de madera temprana, madera tardía o de ancho de anillo total con un fechado perfecto y previamente verificado con el programa COFECHA, esta base de datos debe presentar formato *.dat (por ejemplo, «Brillante.dat») que es el formato que reconoce la versión ARSTAN para Windows (Cuadro 1). Para facilitar la corrida del programa, se recomienda que, la base de datos se guarde en la carpeta donde se tiene el programa, de lo contrario, sólo es necesario especificar la ruta de donde se ubica el archivo de interés.

Al ejecutar el programa ARSTAN, este pide una clave de identificación del archivo de salida, que debe componerse de cinco caracteres como máximo y que será con la que se identificarán los archivos de salida (Figura 6).

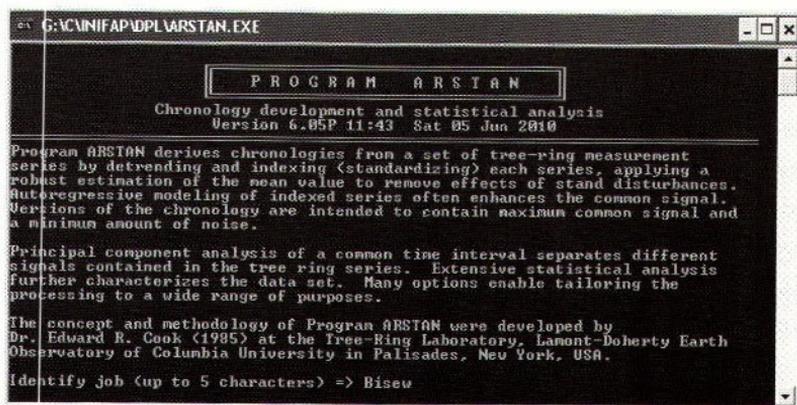


Figura 6. Identificación del archivo de salida, cada uno de los archivos que generará el programa ARSTAN (nueve en total) tendrán este nombre, pero cada uno con extensión diferente, que permite identificarlo (Bisewars.crn, Bisewars.aut, etc.). Los archivos de salida adicionalmente incluyen «ars» para identificar que estos se generaron con el programa ARSTAN.

Posteriormente ARSTAN solicitará el nombre del archivo que contiene las mediciones de los anillos de crecimiento, si el archivo con la base de datos se guardó en la misma carpeta que el programa, sólo será necesario teclear el nombre y se ejecuta el programa (Figura 7). Si el archivo se guardó en diferente carpeta, sólo es necesario

Cuadro 1. Formato correcto en el que los datos de medición de ancho de anillo se deben presentar para correr el programa ARSTAN¹.

Clave del sitio	Año	Mediciones de ancho de anillo																		
		Años																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
BRI47A	1696	649	750	879	850															
BRI47A	1700	1089	1240	1710	1579	1409	1239	1500	1270	1149	1200									
BRI47A	1710	1129	950	1489	1700	1559	1359	1090	1350	1370	1939									
BRI47A	1720	1830	1809	1740	2329	2160	1769	2630	2619	1970	1970									
BRI47A	1730	1889	1799	2080	2109	2090	1640	1680	1400	1389	1839									
BRI47A	1740	1680	1669	1850	1699	2029	2000	2270	2299	2129	2010									
BRI47A	1750	1840	1729	1819	1740	1859	1620	1610	1379	1280	1299									
BRI47A	1760	1349	1430	1850	1959	1680	1899	1889	1570	1279	1279									
BRI47A	1770	1339	1510	1269	1530	1930	1899	1410	2089	2089	1980									
BRI47A	1780	2539	1930	1909	2450	2549	2150	2410	2169	2239	1779									
BRI47A	1790	1260	1779	1869	1529	1370	1799	1660	1869	1850	1710									
BRI47A	1800	2119	2419	1949	1800	1820	1019	960	1069	2330	1970									
BRI47A	1810	2470	1809	2740	2389	2389	2440	2389	1809	1559	1479									
BRI47A	1820	1100	690	599	1020	990	1020	1009	1160	869	889									
BRI47A	1830	820	1039	960	1000	669	989	889	1000	960	789									
BRI47A	1840	720	809	680	809	660	919	809	820	849	1080									
BRI47A	1850	1139	800	979	820	949	649	710	569	670	909									
BRI47A	1860	710	970	929	790	1050	820	669	450	399	649									
BRI47A	1870	660	730	799	760	869	1109	640	519	980	820									
BRI47A	1880	619	759	820	600	369	369	330	410	599	779									
BRI47A	1890	410	529	640	480	639	549	740	699	640	609									
BRI47A	1900	809	590	699	750	640	579	660	489	480	820									
BRI47A	1910	729	580	1049	1029	760	1010	829	950	769	910									
BRI47A	1920	790	759	690	710	979	739	1020	859	630	880									
BRI47A	1930	660	1070	1049	1320	979	1370	1159	970	800	869									
BRI47A	1940	839	700	1419	1010	1119	739	590	709	859	890									
BRI47A	1950	859	750	570	720	549	680	720	519	410	619									
BRI47A	1960	760	619	720	829	1119	1040	970	869	1100	890									
BRI47A	1970	879	730	630	529	500	480	579	739	620	559									
BRI47A	1980	779	759	670	929	1019	1100	750	820	929	720									
BRI47A	1990	820	720	1070	880	729	670	500	859	760	470									
BRI47A	2000	669	910	740	479	779	-9999													
BRI47B	1730	2109	1780	1720	1559	1779	1250	900	1149	1310	1629									
BRI47B	1740	1460	1989	1790	1500	1399	1389	1570	1469	1539	1400									
BRI47B	1750	1219	1140	1649	1330	1239	389	910	919	979	1260									
BRI47B	1760	1489	1490	1479	1380	1079	1279	1440	1299	1049	880									
BRI47B	1770	1209	1250	930	1090	990	1119	1009	1139	1120	1139									
BRI47B	1780	1720	1619	1530	1659	1699	1490	1949	1910	2189	1900									
BRI47B	1790	1090	1149	1140	1159	1300	1360	1549	1569	1599	1620									

```

G:\INIFAP\DIPL\ARSTAN.EXE
Chronology development and statistical analysis
Version 6.05P 11:43 Sat 05 Jun 2010

Program ARSTAN derives chronologies from a set of tree-ring measurement
series by detrending and indexing (standardizing) each series, applying a
robust estimation of the mean value to remove effects of stand disturbances.
Autoregressive modeling of indexed series often enhances the common signal.
Versions of the chronology are intended to contain maximum common signal and
a minimum amount of noise.

Principal component analysis of a common time interval separates different
signals contained in the tree ring series. Extensive statistical analysis
further characterizes the data set. Many options enable tailoring the
processing to a wide range of purposes.

The concept and methodology of Program ARSTAN were developed by
Dr. Edward R. Cook (1905) at the Tree Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth
Observatory of Columbia University in Palisades, New York, USA.

Identify job (up to 5 characters) => Bisew
Maximum time span 4096 years and 95 series

TREE RING MEASUREMENTS
... Name of EXISTING INPUT file => Bisew.dat

```

Figura 7. Indica el nombre del archivo, para este caso la base de datos se encuentra en la misma carpeta que el programa; por tal motivo, únicamente es necesario dar el nombre del archivo (Bisew.dat).

especificar la ruta. Al ejecutar el programa mediante un «Enter», preguntará si el formato de los datos es el correcto mostrando un pequeño cuadro con valores de medición (Figura 8), si este cuadro presenta el mismo formato como el que se observa en el Cuadro 1, es correcto y se acepta dando únicamente otro «Enter».

```

G:\INIFAP\DIPL\ARSTAN.EXE
signals contained in the tree ring series. Extensive statistical analysis
further characterizes the data set. Many options enable tailoring the
processing to a wide range of purposes.

The concept and methodology of Program ARSTAN were developed by
Dr. Edward R. Cook (1905) at the Tree Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth
Observatory of Columbia University in Palisades, New York, USA.

Identify job (up to 5 characters) => Bisew
Maximum time span 4096 years and 95 series

TREE RING MEASUREMENTS
... Name of EXISTING INPUT file => Bisew.dat

First 9 lines of Bisew.dat
BIS03B 1861 1863 1981 1498 1949 2286 2386 3674 3539 2515
BIS03B 1870 1860 1900 2957 2235 2141 1972 2148 3178 5269 2269
BIS03B 1888 1166 2255 1948 1078 1130 1092 1468 655 1877 1626
BIS03B 1890 1376 2459 1437 1407 1510 2625 1908 1664 1431 1135
BIS03B 1900 1425 887 737 1775 929 2002 1733 1270 1869 1453
BIS03B 1910 1947 1351 1064 1050 739 1009 1224 1021 1018 1233
BIS03B 1920 1171 859 1062 1178 1079 691 1205 1007 1140 1150
BIS03B 1930 1223 1254 1073 1560 1313 1617 1201 947 1534 969
.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....
Format is Measurements, correct? <Y/N => Y

```

Figura 8. El programa muestra el orden o formato de la base de datos de medición, para este caso, ancho de madera temprana. Si el formato es el correcto, se tecldea únicamente «Y» que indica, que el formato es el correcto.

Posteriormente el programa preguntará por un título para identificar la corrida, este título permitirá que al abrir cada uno de los archivos de salida identificarlos; este nombre puede estar constituido hasta por 80 caracteres (Figura 9).



Figura 9. Nombre de la corrida que indica: nombre del sitio de trabajo, estado, que archivo es el que se esta corriendo y la especie de donde proviene la base de datos. Los datos pueden variar de acuerdo con los criterios de cada persona.

Finalmente el programa despliega un menú (Cuadro 2), este cuadro presenta diferentes opciones para elegir, ya que estas controlan su ejecución.

Cualquiera de estas opciones puede cambiarse, únicamente es necesario indicarle al programa la opción que se desea ejecutar, escribiendo el número ubicado a la izquierda de la primera columna y respondiendo al programa con la modificación deseada. Ya realizados los cambios, al oprimir la tecla «Enter», se inicia el procesamiento y análisis de los datos. El programa calculará el intervalo común óptimo que contiene el número máximo de datos (longitud del intervalo común por el número de series incluidas). Para aceptar este período, sólo se oprime la tecla «Enter». Generalmente se aceptan cada uno de los parámetros, como por default el programa los muestra en el menú, por lo tanto, únicamente es necesario oprimir Enter indicando que se

Cuadro 2. Opciones del menú de ARSTAN y aquellas que se consideran por «default» para correr el programa.

Opciones del Menú	Opciones por Default
(1) Información de las series en el archivo	(Sólo información)
(2) Método de remoción de tendencias o "detrending" (spline, línea de regresión de mínimos cuadrados, curva exponencial negativa o línea horizontal)	(1 & 128. El primer detrending es una curva exponencial negativa y el segundo una curva flexible ("spline") de 128 años). Proceso no iterativo
(3) Detrending iterativo de las series	(Sin interacción)
(4) Tratamiento especial para series seleccionadas	(Ninguna serie con tratamiento especial)
(5) Estabilizar la varianza de las series con detrending	(Sin estabilizar la varianza)
(6) Método para calcular los índices (división o Substracción)	(Por División)
(7) Imprimir los gráficos de las series mostrando medias de 10 años	(No imprimir gráficos)
(8) Imprimir la lista de los valores de las series	(No imprimir lista)
(9) Guardar las curvas de detrending, tanto de las series como de los residuales	(No guardar curvas)
(10) Identificación de las columnas en series que identifica a una árbol	(Columnas 1 a 5)
(11) Producir resumen para los árboles involucrados	(Sin producir el resumen de los árboles)
(12) Método de modelo autoregresivo (mismo orden para todos; cada serie con su orden; orden constreñido o sin modelar)	(Mismo orden para todos)
(13) Método para el cálculo de la cronología (media robusta o media aritmética)	(Media robusta)
(14) Listar año por año los índices de la cronología con estadísticas de sus índices	(Listar los índices de la cronología año por año)
(15) El análisis del intervalo común de la fracción del ruido rojo de los datos (el análisis del intervalo común de las series con detrending y la fracción del ruido blanco es realizada automáticamente)	(Sin análisis de la fracción de ruido rojo)
(16) Guardar el número de componentes principales y amplitudes	(Guardar los 6 componentes y sus amplitudes)

está de acuerdo con los diferentes parámetros. Durante la ejecución del programa, en la pantalla de la computadora se despliegan mensajes cortos que alertan sobre el progreso del análisis. Los resultados completos de la corrida del análisis aparecen guardados en diferentes archivos (nueve archivos, *.COE, *.CRN, *.CV, *.EV, *.NRA, *.NTR, *.OUT, *.PC y *.SD) de manera directa en la carpeta donde se encuentra el programa, es importante mencionar que dos de los archivos de salida fundamentales y en los que hay que prestar especial atención son: archivo de salida (*.OUT) y el que contiene las cronologías (*.CRN).

7.2. Parámetros de control en el menú del programa ARSTAN

(1). Información de las series en el archivo de datos. Esta opción es sólo informativa y despliega la identificación de las series, primero y último año de crecimiento y extensión de las series.

(2). Métodos de detrending ajustados a las series de crecimiento: Las siguientes opciones de detrending pueden ser utilizadas por el programa:

1: Ajusta una curva exponencial negativa y si el programa no encuentra ajuste, utiliza una línea de regresión lineal. El uso de una curva exponencial negativa se fundamenta en un decrecimiento teórico del crecimiento anual del árbol, debido a cuestiones geométricas de un tronco cada vez mayor en diámetro. No obstante que el ajuste es mejor en la parte temprana del crecimiento, en comparación con los crecimientos recientes de la serie; es decir aquellos aledaños a la corteza. La curva ajustada es de la forma $Y = A * e^{(-B*t)} + D$. Utiliza un procedimiento de iteración que continúa hasta que la mejora obtenida con el ajuste es mínima. Si la curva inicialmente ajustada tiene una constante negativa (D) o una pendiente positiva (B), el uso de esta opción, la rechazará el programa y en su lugar ajustará a la serie de medición una regresión lineal (Figura 10) (Fritts *et al.*, 1969).

La forma más simple de estandarización es fijar a las series una línea de regresión lineal, pero esta opción produce mejores resultados en series muy cortas o bien en aquellas que presentan un patrón de crecimiento inusual.

2: Ajusta una curva exponencial negativa y si no encuentra ajuste, utiliza una línea de regresión lineal con pendiente negativa, o bien una línea horizontal (sin detrending).

3: Ajusta una línea de regresión lineal simple.

4: Ajusta una línea horizontal a través de la media (sin detrending).

e»5: Ajusta una línea suavizada con 50% de reducción de la frecuencia en la extensión de las series.

-1: Sin detrending o división por la media. Las series medidas no se transforman.

<0: Se ajusta una curva flexible con una rigidez del por ciento de la longitud de las series. Por ejemplo, si la opción de detrending es -75, el 50% de la reducción de la frecuencia será 75% de la longitud de cada serie.

0: Sólo se produce un cuadro con las estadísticas de las series medidas, pero no se efectúa el detrending y tampoco genera la cronología.

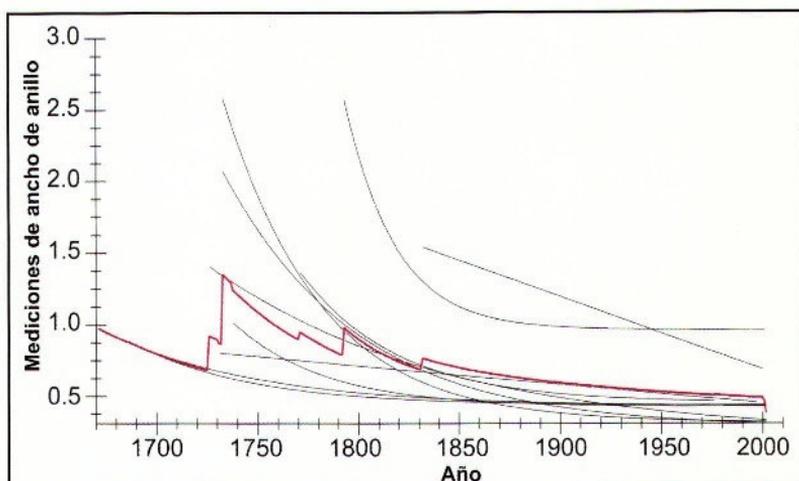


Figura 10. Estandarización de las series de crecimiento, el programa ARSTAN ajusta diferentes curvas de acuerdo al crecimiento que presenta cada una de las muestras. En este caso, el programa aplicó diferentes curvas de ajuste, exponenciales negativas y curvas de regresión lineal.

7.3. Importancia de la estandarización

Las muestras colectadas en un sitio de trabajo comúnmente permiten observar una gran diversidad de edades, es claro apreciar la variabilidad en los crecimientos entre períodos comunes, individuos que presentan 500 años de edad, en sus 100 años de crecimiento más recientes, presentarán una gran variabilidad, comparativamente con los crecimientos de individuos de sólo 100 años de edad.

Al medir los crecimientos anuales de todas las muestras de un sitio de trabajo, y graficarlas de manera conjunta, se puede apreciar fácilmente esta variabilidad, lo anterior atribuido en gran medida a la disminución en el ancho del anillo por efecto de la edad (Figura 11a). Este factor hace difícil el comparar o analizar series de diferentes edades.

Ante este comportamiento, el proceso de estandarización permite aplicar la mejor curva de ajuste a cada una de las series de crecimiento, con lo que se homogeniza la variabilidad entre muestras, se elimina el ruido debido a efecto de la edad y se maximiza la señal climática, lo anterior permite una comparación entre individuos de diferentes edades y por consiguiente un mejor análisis e interpretación de la variabilidad ambiental común entre todos los individuos de una región determinada (Figura 11b).

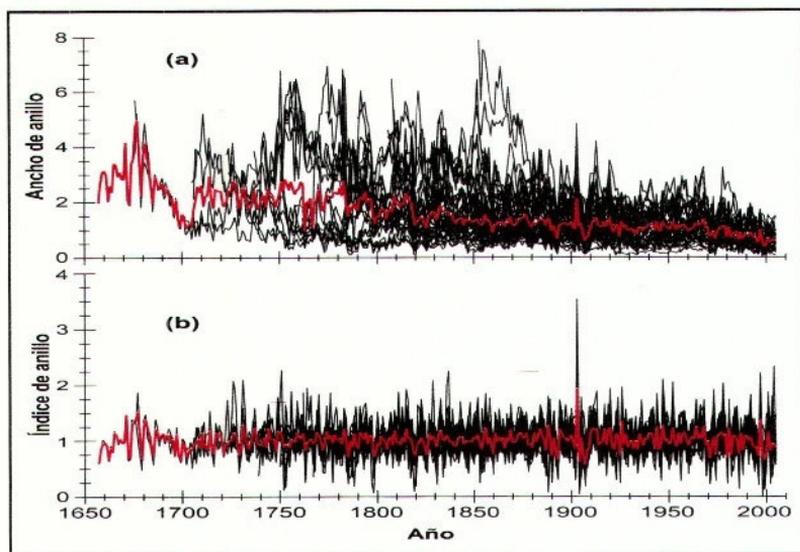


Figura 11. Bondades de la estandarización en las series de crecimiento. En la figura 11a, se observan las mediciones de ancho de anillo para cada una de las diferentes muestras y se aprecia la variabilidad en el crecimiento debido al efecto de la edad; mientras que en la figura 11b, el proceso de estandarización ha eliminado el efecto por edad y maximizado la señal climática.

7.4. Opciones para el segundo detrending

Las opciones para fijar una curva son las mismas, como fue descrito para el primer detrending, pero si selecciona la opción «0» no se realiza el segundo detrending. Antes de que se realice este proceso, las series pueden transformarse mediante una función logarítmica y después se añade una constante igual a una sexta parte de la media de las series.

Las series pueden normalizarse después del detrending. Si se considera pertinente, la varianza de todas las series puede ajustarse a 1.0 y de esta manera se uniformizan todas ellas en la cronología, no importando si son complacientes o sensitivas.

Una opción alternativa es una curva suavizada «spline» que de un sólo paso, ajusta a los datos, una serie de curvas polinomiales y no obstante no ser un proceso interactivo, sigue la trayectoria de los datos como lo haría una línea flexible y su rigidez relativa puede especificarse con antelación. Su elegancia radica en su predictibilidad y en la confiabilidad del comportamiento de la serie y permite especificar con precisión, la cantidad de varianza a remover a una frecuencia determinada. El procedimiento removerá varianza a bajas frecuencias (mayores longitudes de onda) y esta remoción será nula o mínima para altas frecuencias (ondas más cortas). De esta manera, su flexibilidad puede especificarse con antelación y sus opciones de ajuste son casi infinitas.

En ARSTAN, la flexibilidad especificada es de 50% de la longitud de onda. Cook y Peters (1981) han observado que para datos que siguen una exponencial negativa, las curvas no muestran un ajuste perfecto; en este caso, la curva ajusta bien aproximadamente en una tercera parte de la serie, generalmente la parte interna, donde la tendencia tiene una fuerte pendiente negativa; pero este ajuste, se pierde en el resto de la serie, donde la curva ajustará muy por arriba o muy por debajo de los valores reales de medición, lo que produce índices de alto o bajo valor, respectivamente; situación que no es estadísticamente deseable y no es representativo de la señal buscada.

Por otra parte, una curva muy flexible con 50% de ajuste de la longitud de onda para una serie de 300 años o más, puede seguir los datos con mejor precisión, que lo que haría una curva exponencial negativa para las últimas 2/3 partes de la serie, aunque puede fallar en la primera parte, donde la pendiente es muy abrupta. Este problema, se ha resuelto al ajustar una curva exponencial negativa a la serie y luego a los índices resultantes insertarles un «spline» cúbico de rigidez adecuado para ajustarse a la media de los datos, pero sin remover varianza en el rango adecuado de frecuencias y calculando nuevamente los índices (Figura 12).

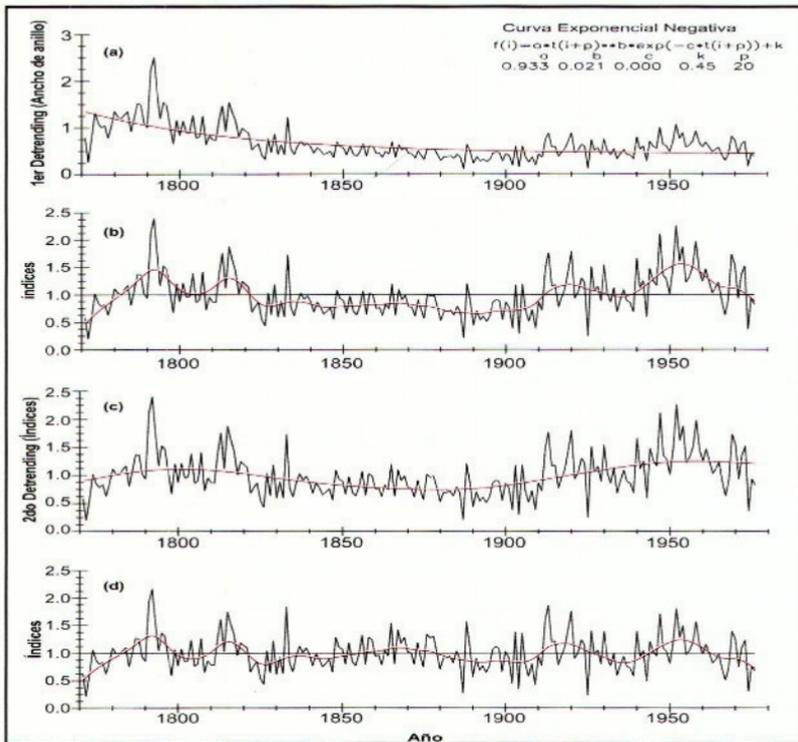


Figura 12. Aplicación de una curva exponencial negativa a la serie de ancho de anillos, como primer paso en el proceso de estandarización (a). Esta primera curva de ajuste, genera los índices que permiten comparar series de crecimiento de diferente edad (b). Para un mayor ajuste, se aplica a los índices generados una segunda curva o spline de rigidez adecuado, que se ajuste a la media de los datos (c), para generar finalmente una segunda serie de índices, que poseen una varianza más estable (d).

Cuando al programa ARSTAN se le especifica la rigidez del spline, aparece un cuadro tanto en la pantalla como en el archivo de salida, donde indica la distribución de la varianza a varias longitudes de onda (Cuadro 3); por ejemplo, una rigidez de spline <32>:20, contiene 50% de la varianza a longitudes de onda de 20 años.

Cuadro 3. Porcentaje de la varianza en índices derivados del spline.

Longitud de onda (años)	Varianza (%)	Longitud de onda (años)	Varianza (%)	Longitud de onda (años)	Varianza (%)
6.34	99.0	15.19	75.0	28.29	20.0
8.01	97.5	16.81	66.7	34.64	10.0
9.59	95.0	20.00	50.0	41.76	5.0
11.54	90.0	23.79	33.3	49.98	2.5
14.14	80.0	26.32	25.0	63.09	1.0

(3). El detrending interactivo, permite al usuario ver en la pantalla, el ajuste de la curva a cada serie y también permite cambiar opciones, hasta que se logran los mejores resultados. Se despliegan también los resultados estadísticos derivados de cada una de las series ajustadas. El proceso de detrending se puede cancelar en cualquier momento y en este caso, el programa procederá automáticamente con el análisis, considerando sólo las opciones de detrending seleccionadas en el menú.

(4). Algunas series requerirán ajustarse de manera diferente. Esta opción, permite seleccionar dichas series para darles un tratamiento especial, El tratamiento para lograr un mejor ajuste, incluye la eliminación de datos, tanto al inicio como al final de las series. El programa preguntará con relación a los tratamientos que se le van a aplicar a cada serie seleccionada. El nombre de las series a modificar; es importante tener en cuenta, que no se debe cambiar el nombre de las series a mayúsculas o minúsculas, si esto ocurre, no serán reconocidas por el programa.

(5). Estabilización de la varianza. En ciertos sitios y para determinados ejemplares o especies, la varianza puede sufrir cambios muy bruscos en el tiempo. En esta situación, el usuario quizás desee modificar las series, de tal manera que la varianza sea más estable a través del

tiempo. El programa ARSTAN cuenta con esta opción y permite estabilizar la varianza de los índices de cada serie, de la cronología o de ambos. Las opciones para estabilizar la varianza incluyen las de detrending más transformación a raíz cuadrada y logarítmica y la adición a cada valor de una constante que corresponde a $1/6$ de la media de la serie. Para estabilizar la varianza, se recomienda el uso de un «spline» cúbico suavizado. Para este caso, el «spline» se fija en función a los valores residuales procedentes de la media y las series se dividen por los valores derivados del «spline» cúbico. Una forma de describir esta situación es ajustar la normalización de las series a una media de cero; para lo cual, los valores residuales negativos se cambian a positivos. Los valores residuales se dividirán entre los valores respectivos del «spline» y los índices cuyos valores residuales fueron originalmente negativos, se les otorga un signo negativo. Al final, se añade nuevamente el valor medio de las series, para producir series con varianza estable.

(6). Opciones para calcular índices. División (ración). El valor de medición de la banda de crecimiento, dividida entre el valor de la curva. Substracción (residual): medición del valor de la banda de crecimiento, menos el valor de la curva.

(7). Impresión de las mediciones de una serie por década o por un período específico de mediciones, curvas de detrending e índices para cada serie.

(8). Esta opción permite listar los valores de las series individuales. Permite seleccionar el listado de las mediciones de las series, ajustarle curvas para la creación de índices normalizados y/o crear series individuales mediante modelos autoregresivos.

(9). Las series individuales pueden guardarse en un disco, tanto en formato compacto como en formato de medición.

(10). Las columnas de identificación de las series para un árbol. Es usado por el programa para el análisis del intervalo común y en caso de ser solicitado, para calcular resúmenes de los árboles. Las

columnas por default son de la 1 a la 5, lo que implica que las primeras tres columnas correspondan a la clave del sitio y las columnas 4 y 5 al número de árbol. Por ejemplo, en una serie identificada como **ABC08A**; **ABC** se refiere al código del sitio, **08** es el número de árbol y **A** corresponde al primer núcleo de crecimiento obtenido del árbol; la obtención de estos núcleos, gusanos o virutas se realiza con un taladro de Pressler de diversas dimensiones, dependiendo del diámetro del árbol a muestrear.

(11). Se puede solicitar resúmenes (cronologías) para cada árbol. Para las series que pertenecen a un mismo árbol, el programa las ubica mediante la clave de la serie que la identifica. Los resúmenes se calculan mediante la media aritmética y quedan guardados en el archivo **ZZZARS.TRE**.

(12). Opciones para el modelo del método autoregresivo.

S: El mismo orden del proceso autoregresivo, como el seleccionado por el modelo autoregresivo multivariado puede ajustarse a cada serie, usando sus propios coeficientes. Este es el método por default.

E: Cada serie puede modelarse como un proceso autoregresivo, donde el orden de ejecución se selecciona mediante las series individuales, a través de la búsqueda del primer mínimo del Criterio de Información de Akaike.

C: Se puede descartar la búsqueda del primer mínimo del Criterio de Información de Akaike, especificando el orden en que se ajustará cada serie. También se puede indicar que no se ejecute el modelo autoregresivo. De esta manera, la cronología se calculará sólo mediante el método estándar. La siguiente pregunta consiste en definir las series a involucrar para calcular el modelo autoregresivo común (el comando por default es utilizar todas las series). Respondiendo con una «N», el programa asume que se utilizará sólo un subconjunto de las series. Posteriormente, se especifica que series se incluirán en el modelo. Cada columna corresponde de manera

secuencial a las series respectivas. Escriba un «1» si las series serán usadas o un «0» si no es así. Esta opción, puede ser considerada si existe razón suficiente para creer, que un subconjunto de las series no ha sido afectado por disturbios en el rodal, donde fueron colectadas y que por lo tanto, cuenta con una estructura estocástica limpia para modelar y para generar la cronología «ARSTAN».

(13). El cálculo de la cronología puede realizarse a través de la estimación de una media robusta que combina alta resistencia y eficiencia (opción por default); también puede ser calculada mediante la función del valor de la media aritmética y una última opción es no generar cronología.

(14). En la impresión se lista cada índice anual de la cronología, con estadísticas y gráficos, pero se puede suprimir esta parte.

(15). Si se quiere, el análisis del intervalo común se incluirá en el análisis de la fracción del ruido rojo (serie sin tendencia, menos la serie residual).

(16). Se puede especificar el número de eigenvectores y amplitud de los componentes principales que se desea calcular para el intervalo común e imprimirse y guardarse en el archivo «ZZARS.AMP». Si el número ingresado es mayor que el número de series existentes, todas las series se guardarán. La opción default es seis.

7.5. Cálculo de la cronología

Para la generación de la cronología, el programa puede utilizar todas las series (default) o bien seleccionar sólo algunas para su cálculo. Si se utilizan todas las series para el análisis de intervalo común, aquellas que pertenecen a un mismo árbol son reconocidas de manera automática por el programa. En el caso de no incluir todas las series para el análisis, o si se utiliza un método inconsistente para identificar cada uno de los árboles, se crea una máscara para las columnas 1 a 80 y cada columna corresponderá a un número de la secuencia de series. Para el análisis de intervalo común, las series

que pertenecen a un mismo árbol, se codificarán como «1», «2», «3», etc. Este código se requiere para calcular la correlación media para pares de series dentro y entre árboles y para calcular el valor de la relación señal-ruido. Los ceros inmersos en la máscara, causan que aquellas series que los contienen sean excluidas del desarrollo de la cronología.

7.6. Análisis de intervalo común

El programa ARSTAN calculará el intervalo común óptimo que contiene el número máximo de datos posibles en una matriz rectangular (longitud del intervalo común por el número de series). Si este arreglo es aceptable, se da un «ENTER», de otra manera, se escribe «N» y se especifica el primer y último año para el análisis del intervalo común deseado.

7.7. Tareas que realiza el programa ARSTAN

El programa ARSTAN ejecuta las siguientes tareas:

- (1). Los siguientes archivos son abiertos en índice ITRDB (I) y con formato compacto (C) (Cuadro 4):
- (2). Imprime el menú, que muestra las opciones del control especificadas para la corrida.

Cuadro 4. Archivos creados por ARSTAN si son requeridos.

ZZZARS.OUT	Archivo para impresión
ZZZARS.CRN	Cronologías de anillos de árboles (I)
ZZZARS.SDV	Desviaciones estándar de los índices de la cronología (C)
ZZZARS.AMP	Amplitud de los componentes principales (C)
ZZZARS.MSM ¹	Archivo de medición de las series de anillos de árboles (C)
ZZZARS.CV1 ¹	Curvas del primer detrending (C)
ZZZARS.IN1 ¹	Series después del primer detrending (C)
ZZZARS.CV2 ¹	Curvas del segundo detrending (C)
ZZZARS.IN2 ¹	Series después del segundo detrending (C)
ZZZARS.RSD ¹	Residuales del modelo autoregresivo (C)
ZZZARS.TRE ¹	Resumen (cronología) para cada árbol (I)
ZZZARS.PLO ¹	Archivos para graficar en el programa PAGEPLOT (M)

¹Archivos creados sólo cuando se solicitan

(3). Lee los datos de anillos de medición de las series. Para cada serie:

a) El detrending se realiza como fue especificado. Una curva se inserta a cada serie de medición para modelar la tendencia biológica en el crecimiento y los valores de medición se dividen entre el valor de la curva para producir una serie sin tendencia (Figuras 3 y 4).

b) Se imprimen los gráficos de medias por década, si así se desea.

c) Se estabiliza la varianza de las medias, si se solicita

d) Se guardan en un archivo las series sin tendencia, si se solicita.

(4). Cuando es solicitado, lista las mediciones o índices de los anillos para cada una de las series.

(5). Imprime las estadísticas de cada serie antes y después del detrending

(6). Corre el modelo autoregresivo multivariado. Los siguientes resultados derivan de este modelo:

a) Suma de matrices del rezago-producto «lag-product».

b) Suma del rezago-producto ponderado «lag-product» ponderado.

c) Autocorrelaciones ponderadas.

d) Estimaciones Yule-Walker de autocorrelaciones ponderadas.

e) Criterio de Información Akaike (AIC).

f) Coeficientes de autoregresión fundamentados en el Criterio de

Información de Akaike del primer mínimo (al menos que sea especificado) y seleccionado el orden del modelo autoregresivo.

g) Función de respuesta de impulso de los pesos del proceso de autoregresión ponderado.

h) Límites de dos errores estándar Box-Pierce de la función de autocorrelación residual, fundamentado en los coeficientes ponderados de autoregresión.

(7). Ejecuta el modelo autoregresivo univariado, fijando un proceso autoregresivo de un orden específico para cada serie. La siguiente información se calcula para las series residuales:

a) Estadísticas para cada serie.

b) Coeficientes autoregresivos para cada serie y varianza explicada por autoregresión.

c) Residuales normalizados, particularmente de aquellos valores extremos que tienen tres desviaciones estándar con relación a la media.

(8). Corre el modelo autoregresivo en las series residuales con el fin de determinar si permanecen efectos del rezago residual multivariado. Calcula la siguiente información:

a) La suma de matrices del rezago-producto «lag-product».

b) La suma ponderada del rezago-producto «lag-product».

c) Autocorrelaciones ponderadas.

d) Estimaciones Yule-Walker de la autoregresión ponderada.

e) Información del Criterio Akaike y orden de autoregresión seleccionada. En caso de que después de fijar el ajuste univariado, no se tenga una permanencia multivariada significativa, el orden de la autoregresión seleccionada ahora será cero.

(9). Calcula la versión estándar de la cronología (STNDRD). Las series de anillos estandarizados se combinan en una función de valor promedio de todas las series, o considera sólo aquellas especificadas en la máscara. Calcula la media para cada año, mediante el procedimiento de estimación robusta de la media o mediante la media aritmética (Cook, 1985). La media robusta es una parte integral de la metodología del programa ARSTAN y se recomienda ampliamente para remover efectos endógenos, originados por disturbios en el rodal y para maximizar la señal común presente en los datos. Se imprimen las estadísticas de la cronología, incluyendo la distribución de valores, estructura de la autocorrelación y la ganancia o pérdida en la eficiencia del uso de la estimación robusta de la media. Si se decide que no se realice el modelo autoregresivo, está será la única versión producida de la cronología.

(10). Calcula la versión residual de la cronología (RESID) de la misma manera que lo hizo para la versión estándar, pero esta vez, usando las series residuales resultantes del paso (7). La estimación robusta de la función del valor medio produce una cronología con una señal común muy marcada y sin persistencia. Los mismos estadísticos se imprimen para esta cronología.

La Porción de la cronología residual que contiene cuatro o más series se modela al orden autoregresivo seleccionado durante el primer modelaje multivariado autoregresivo en el paso (6f). Si el primer criterio mínimo Akaike seleccionado resulta en un orden mayor que cero, la cronología residual completa es blanqueada mediante los coeficientes autoregresivos precedentes de este modelaje. Las estadísticas en la cronología resultante con ruido blanco, se imprimen e incluyen la distribución de los valores y la estructura de la autocorrelación.

El resultado de todo este análisis, que deriva en tres versiones estandarizadas de la cronología (Estándar, Residual y Arstan), se pretende contengan la máxima señal común y la mínima cantidad de

ruido (Figuras 5). A manera de resumen, la versión «Estándar», se obtiene mediante el proceso de estandarización de las series y la aplicación de la función del valor medio para remover efectos endógenos producidos por disturbios en el rodal. El programa ARSTAN contiene varias opciones para calcular esta cronología como son: estandarización simple o doble de las series de medición; los índices para una serie determinada pueden calcularse por división o por sustracción; la varianza puede estabilizarse y la función del valor medio puede calcularse, ya sea mediante una media aritmética o mediante una media bipesada robusta, con el fin de remover efectos endógenos y de disturbio y para incrementar la señal común. Si no se aplica el modelo autoregresivo, esta será la única cronología que se producirá.

La versión «Residual» (blanqueada), se genera de la misma forma que la versión «Estándar», pero en este caso, las series promediadas son los residuales del modelo autoregresivo de las series de medición estandarizadas. La estimación robusta del valor medio de la función produce una cronología con una señal común muy intensa y que no tiene persistencia, por lo que podrá ser utilizada para fines de reconstrucción paleoclimática.

La versión «Arstan», el modelo promediado de autoregresión extraído se reincorpora a la versión «Residual» para producir la cronología «Arstan». El modelo de autoregresión contiene la persistencia común y sincrónica en una gran porción de las series del sitio, sin incluir la que se encuentra en una o varias series de ese sitio. En cierta manera se asemeja a la serie original de medición que involucra aspectos biológicos de la especie.

7.8. Eigenvalues, Eigenvectors y Componentes Principales

Si al programa ARSTAN se le pide que realice el análisis del intervalo común, los eigenvalues, número de eigenvectors especificados y la amplitud de los componentes principales para el intervalo común, aparecerán en el archivo *.AMP (el default es salvar cuatro series).

Los eigenvalores, eigenvectors y amplitud de los componentes principales, se generan independientemente para las series estandarizadas y residuales.

En el Cuadro 5, se muestra una secuencia de las acciones que realiza el programa ARSTAN para producir los diferentes archivos de salida.

Cuadro 5. Secuencia en que el programa ARSTAN demanda información para producir los diferentes archivos de salida.

Orden secuencial de acciones	Acción desarrollada	Archivos producidos
1.- Lee el archivo con las series de medición		
2.- Realiza el primer detrending para cada serie (por default)	Ajusta la primera curva índices del primer ajuste	_ARS.CV1* _ARS.IN1*
3.- Realiza el segundo detrending en cada serie (por default)	Ajusta la segunda curva índices del segundo ajuste	_ARS.CV2* _ARS.IN2*
4.- Estabiliza la varianza para cada serie (opcional)	Índices con varianza estabilizada	_ARS.IN2*
5.- Edita de algunas series dentro del programa (opcional)	Algunas mediciones de ancho de anillo son editadas	_ARS.MSM*
6.- Calcula el modelo autoregresivo de persistencia para la serie completa (default)		
7.- Modela cada serie con el orden autoregresivo seleccionado	Residuos procedentes del modelo autoregresivo	_ARS.RSD*
De las cronologías de anillos de árboles se producen tres versiones:		
8.- Calcula la cronología "Estándar" de las series estandarizadas mediante una estimación robusta de la media o bien con media aritmética	Cronología "Estándar"	_ARS.CRN o bien _ARS.STD*
9.- Calcula la cronología residual usando una estimación robusta o aritmética de las series modeladas; reblanquea la cronología residual si tiene autocorrelación significativa	Cronología "Residual"	ARS.CRN o bien _ARS.RES*
10. Devuelve el modelo de persistencia a la cronología residual para generar la cronología "Arstan"	Cronología "Arstan"	ARS.CRN o bien _ARS.ARS*
Ejecución de análisis estadísticos del intervalo de tiempo común		
11.- Se realizan análisis de las series de anillos de crecimiento para un intervalo común cubierto por la mayoría o por todas las series. Este período puede ser seleccionado por el usuario o bien calculado por el programa para el óptimo período. El período óptimo es aquel que incluye el mayor número de anillos de crecimiento y es estimado como la longitud del período en años por el número de series que cubren dicho período.		
12.- El análisis de intervalo común lo realiza separadamente sobre las series de medición estandarizadas y sobre las series en que se aplicó el modelo autoregresivo (ruido blanco) y a opción del usuario sobre la diferencia entre las series estandarizadas y las series modeladas (ruido rojo)		
13.- Se realiza el análisis de componentes principales para el análisis de intervalo común	Eigenvalores, eigenvectors y componentes principales	_ARS.AMP
14.- El programa realiza una gran cantidad de cálculos estadísticos, que están contenidos en el archivo de salida, listo para su impresión	Las cronologías se listan como resumen de estadísticas en la última página.	_ARS.OUT

VIII. RESULTADOS

8.1. Desarrollo de una cronología con ARSTAN

Para ejemplificar la aplicación del programa se eligió el sitio Cerro Barajas, del municipio de Guanaceví, Durango. Los árboles en esta localidad son muy sensibles a la influencia de variables climáticas, particularmente precipitación. La vegetación del sitio se clasifica como bosque mixto templado con la presencia de *Pinus duranguensis*, *Pinus ayacahuite*, *Pseudotsuga menziesii*, *Arbutus xalapensis*, entre otras especies. La especie muestreada fue *Pseudotsuga menziesii*, una conífera con alta respuesta en crecimiento anual a la precipitación invierno-primavera y una de las más longevas en la región (Villanueva *et al.*, 2006). La obtención de núcleos de crecimiento o virutas se realizó con taladro de Pressler y secciones transversales que se obtuvieron con motosierra. La fecha de muestreo fue a mediados de noviembre de 2009, aunque dos años previos a esta fecha, el sitio también había sido muestreado. Las muestras se obtuvieron de árboles seleccionados ubicados en diversos parajes, donde la especie de interés indicaba el menor disturbio posible. Se taladraron 30 árboles vivos, obteniendo al menos dos radios para cada uno de ellos. También se colectaron más de 40 secciones transversales de tocones, árboles muertos en pie y madera semienterrada, que también fueron incluidas en el análisis.

Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP ubicado en Gómez Palacio, Durango, acorde a técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968). Lo anterior consistió en el secado de las muestras, vaciado de datos de campo, montaje de muestras en molduras especiales de madera y pulido de muestras mediante lijas de grano grueso a fino (120 a 1200); conteo y fechado bajo una estereoscopio trilocular y medición de crecimientos con sistema de medición VELMEX con precisión de 0.001 milímetros. Cada banda de crecimiento anual se

dividió en madera temprana (EW), madera tardía (LW) y anillo total (RW). Con los archivos generados de cada uno de estos crecimientos, se corrió el programa de calidad de fechado (COFECHA), proceso básico que permite continuar con el desarrollo de las cronologías. Para generar los índices estandarizados una vez fechadas cada una de las series, se utilizó el programa ARSTAN Versión 6.05P.

El nombre del archivo para la base de datos de ancho de anillo total (RW) para el sitio Cerro Baraja fue «CBARW», para esta base de datos, se analizó cada una de las opciones que demanda el programa (Cuadro 6).

Cuadro 6. Opciones del menú del programa ARSTAN que se consideraron para la corrida del sitio Cerro Barajas.

Título de la corrida	Cerro Barajas
(1) Archivo de medición	CBARW.DAT
(2) Método de remoción de tendencias. Doble detrending. La curva suavizada cúbica ("spline cúbico") preserva 50% de la varianza contenida en las series de medición a longitudes de onda de 128 años. Esto es 47.19% de la longitud media de la serie. -Spline alterna, relativa rigidez del spline, -Mínima rigidez.	67% 32
(3) Detrending iterativo de las series	Sin iteración
(4) Tratamiento especial para series seleccionadas	Ninguna serie tratada (0)
(5) Estabilizar varianza -Transformación logarítmica de las series de medición -Normalizar series que se les aplicó detrending	N, 0 N N
(6) Índices calculados por división (D), sustracción (S) o con tendencia baja en la varianza	D
(7) Imprimir gráficos de las medias decenales de las series	N
(8) Listar los valores de las series	N
(9) Guardar las series individuales en formato	N
(10) Identificación para las series en columnas	1 a 5
(11) Resúmenes para cada árbol	N - formato
(12) Método de modelaje autoregresivo. Todas las series usadas en el modelaje AR -Forzar el blanqueado de la cronología residual en el orden	E 0
(13) Cálculo de la cronología	R, Formato: C, Identificación CBARW
(14) Listado de los valores de la cronología año por año Extensión de los datos 1510 a 2009, 500 años, 47 series, 12748 anillos. La longitud media de las series es de 271.23 años	Y
(15) Análisis de intervalo común Intervalo común, óptimo de 1824 a 2008, 185 años, 30 series, 5550 anillos; intervalo común ajustado por orden del modelo de autoregresión (AR) promedio	0
(16) Análisis del intervalo común de la fracción ruido-rojo	N
(17) Número de eigenvectores y amplitudes a salvar	8

Efecto de las opciones de detrending seleccionadas:

1. Primer detrending: Curva exponencial negativa/Regresión Lineal (La asíntota de una curva exponencial negativa se permite que sea negativa).
2. Segundo detrending: Spline de 128 años.

El porcentaje de la varianza de las series indizadas con 50% de la varianza a longitudes de onda de 128 años, será el mostrado en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Por ciento de la varianza de las series indizadas.

Longitud de onda	40.6	51.3	61.4	73.9	90.5	97.2	107.6	128.0	152.2	168.4
Varianza (%)	99.0	97.5	95.0	90.0	80.0	75.0	66.7	50.0	33.0	25.0

1. Spline alternativo para el Segundo detrending: 67% del spline seleccionado.
2. Rigidez mínima del spline: 32 años.
3. Los índices calculados por división: el valor del ancho de anillo dividido por el valor de la curva.
4. Modelo autoregresivo: sin restricciones.

A continuación el programa lista algunas de las series en que los índices fueron elevados (>3.0) para años específicos. Ejemplo: en este caso las series: CBA114A, período: 1700 – 2009, año 1792 con un índice de 3.078; serie CBA152B, período 1807 – 2009, año 1807 con un índice de 6.42; serie CBA128A, período 1738 – 1999, año 1977 con un índice de 3.156. Los anillos evaluados fueron en total 12748, con 17 anillos perdidos, que representan el 0.1334% del total. El número de las series indizadas con valores de índices superiores a 3.0 fueron 3.

El programa enlista una serie de estadísticos tanto para los valores originales de medición como después de que se aplicó el detrending e indica el tipo de detrending aplicado a cada serie, esto se ejemplifica sólo para algunas series en los Cuadros 8 y 9 y la Figura 13.

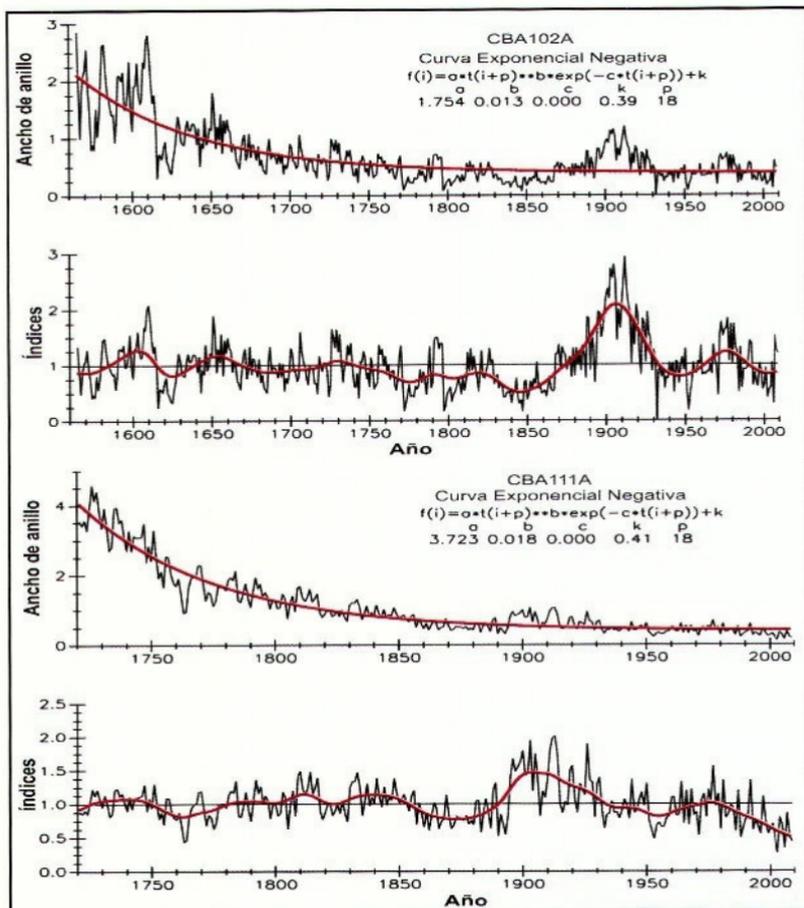


Figura 13. Ejemplo de la estandarización para cada una de las muestras, para este caso, se ejemplifica con las muestras CBA102A y CBA111A. Una curva exponencial negativa (parte superior) se aplicó en ambas series de crecimiento y el resultado de la estandarización se indica en la parte inferior del gráfico.

Cuadro 8. Estadísticos de los valores medidos de grosor de anillos de crecimiento.

No	Serie	Intervalo	Años	Media	Mediana	Sens. Media	Desv Est	Skew.	Kurtosis	Trend Var%	Autocorrelación			L-Box Prob
											1er ord	2º ord	3º ord	
1	CBA102A	1565-2009	445	0.888	0.542	0.306	0.519	1.860	3.501	-0.1065	0.86	0.17	0.13	0.000
2	CBA102B	1775-2009	235	0.388	0.379	0.296	0.172	0.438	-0.191	0.69	0.27	0.20	0.000	
3	CBA111A	1721-2009	289	1.111	0.777	0.233	0.943	1.696	2.186	-0.2608	0.94	0.20	0.16	0.000
4	CBA111B	1704-2009	306	1.104	0.743	0.237	1.029	1.817	2.776	-0.2722	0.95	0.04	0.09	0.000
5	CBA111C	1711-2009	299	1.216	0.824	0.230	1.063	1.689	2.016	-0.2924	0.95	0.12	0.05	0.000
6	CBA112A	1667-2009	343	0.795	0.511	0.368	0.687	1.553	1.365	-0.2125	0.88	0.32	0.11	0.000
7	CBA112B	1660-2009	350	0.790	0.521	0.398	0.700	1.678	2.478	-0.1897	0.84	0.26	0.13	0.000

Cuadro 9. Estadísticos de los valores procedentes del detrending aplicado a cada una de las series.

No	Serie	Intervalo	Años	Media	Mediana	Sens. Media	Desv Est	Skewness	Kurtosis	Trend Var%	Autocorrelación			L-Box Prob
											1er ord	2º ord	3º ord	
1	CBA102A	1565-2009	445	0.992	0.948	0.305	0.374	0.39	-0.188	0.0161	0.54	0.14	0.02	0.00
2	CBA102B	1775-2009	235	0.994	0.994	0.295	0.349	0.29	0.267	0.0120	0.49	0.15	0.08	0.00
3	CBA111A	1721-2009	289	0.997	0.980	0.233	0.259	0.45	-0.194	0.0492	0.33	0.14	0.12	0.00
4	CBA111B	1704-2009	306	0.995	0.979	0.236	0.287	0.37	-0.003	0.0548	0.40	0.20	0.14	0.00
5	CBA111C	1711-2009	299	0.997	0.991	0.230	0.251	0.33	0.567	0.0505	0.31	0.15	0.07	0.00
6	CBA112A	1667-2009	343	0.999	0.965	0.368	0.370	0.54	0.441	0.0232	0.25	0.15	0.04	0.00
7	CBA112B	1660-2009	350	0.985	0.948	0.399	0.469	0.49	0.323	0.0046	0.33	0.26	0.04	0.00

El programa ARSTAN aplicó para cada una de las muestras incluidas en la base de datos, la curva o detrending que mejor se ajustó a los crecimientos. Para la mayoría de las muestras, la curva de mejor ajuste fue la exponencial negativa, sin embargo, también se observa que para algunas muestras y en función a su crecimiento, un modelo de regresión lineal tuvo mejor ajuste (Figura 14).

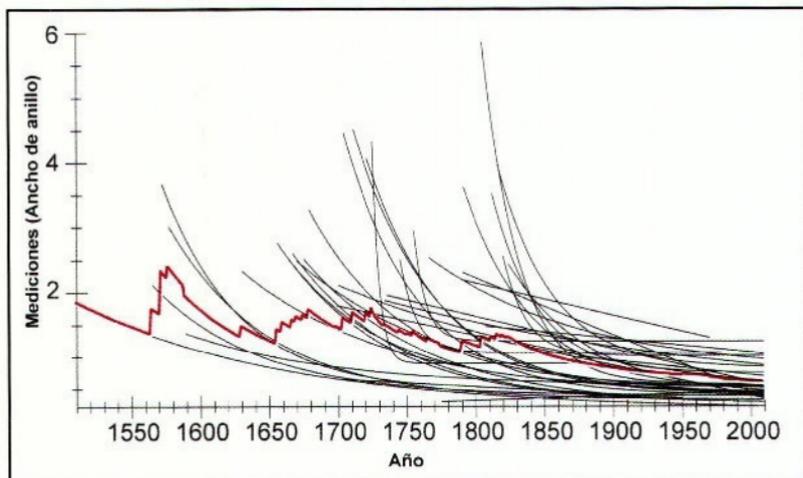


Figura 14. Esquematación de las diferentes curvas de ajuste que se aplicaron a cada una de las series de crecimiento que integran el sitio Cerro Barajas, Guanaceví, Durango.

8.2. Segundo detrending

Una vez que se ajusta un primer detrending a cada una de las series de crecimiento, se observa que en series que siguen una exponencial negativa, las curvas no muestran un ajuste perfecto en toda la serie. El mejor ajuste, en general, se presenta en la parte interna, donde la serie posee una fuerte pendiente negativa, pero este ajuste se pierde en el resto de la serie, donde la curva ajusta, ya sea muy arriba o muy por debajo de los valores reales de medición, lo que produce índices de alto o bajo valor, respectivamente.

Otro punto importante es que una curva muy flexible con 50% de ajuste de la longitud de onda para una serie longeva de 300 años o más, puede seguir los datos con mejor precisión, que lo que haría una curva exponencial negativa para las últimas 2/3 partes de la serie, pero puede fallar en la primera parte, donde la pendiente es muy abrupta, ambas curvas arrojan un determinado error.

Para disminuir al máximo estos problemas en las series, para la corrida de Cerro Barajas se aplicó el doble detrending y a manera de ejemplo, se tomó la muestra CBA102A, a la cual se le aplicó de entrada una curva exponencial negativa (Figura 15a) y con el ajuste de este primer detrending, se generaron los primeros índices (Figura 15b), a los que se les insertó una curva flexible (spline cúbico) de rigidez adecuado para ajustarse a la media de los datos, pero sin remover varianza (Figura 15c). Con la aplicación de esta segunda curva de ajuste, se generaron nuevos índices, que a diferencia de los primeros presentan una mejor estabilidad en la varianza (Figura 15d).

Este procedimiento aplicado a la muestra CBA102A, se utilizó también para el resto de las muestras de este sitio.

A continuación se imprimen los resultados del modelo multivariado autoregresivo (AR) de las series con detrending utilizadas para obtener la autocorrelación común (pooled autocorrelation), para un período de 10 años (Cuadro 10).

Cuadro 10. Modelo multivariado autoregresivo.

T = 0	1.000	T = -1	0.255	T = -2	0.177	T = -3	0.109	T = -4	0.097	T = -5	0.003
T = -6	0.71	T = -7	0.088	T = -8	0.093	T = -9	0.026	T = -10	-0.047	T = -11	-0.006

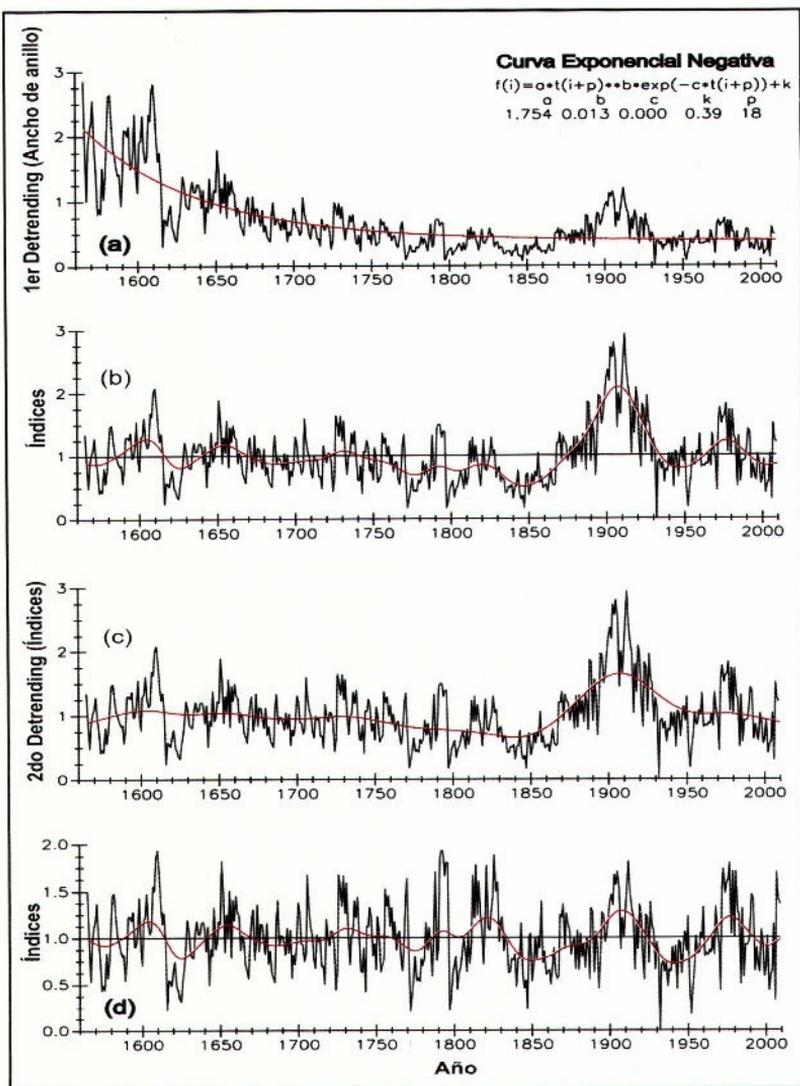


Figura 15. Esquemización secuencial de la aplicación de curvas de ajuste, ejecutadas por el programa ARSTAN para generar series de tiempo con varianza relativamente estable.

Así como la estimación de autoregresión de Yule-Walker para 10 años, aunque a manera de ejemplo, se realiza sólo para 5 años: Los valores en cada columna, representan el coeficiente parcial de autocorrelación (Cuadro 11).

Cuadro 11. Estimación de la autoregresión Yule-Walker.

Orden	T = 0	T = -1	T = -2	T = -3	T = -4	T = -5
1	1.000	0.2552				
2	1.000	0.2247	0.1193			
3	1.000	0.2197	0.1098	0.0423		
4	1.000	0.2177	0.1047	0.0320	0.0468	
5	1.000	0.2201	0.1063	0.0374	0.0580	-0.0517

De manera adicional, se imprime Información sobre el Criterio Akaike (AIC, por sus siglas en Inglés) (Cuadro 12):

Cuadro 12. Criterio Akaike.

AR (0)	AR (1)	AR (2)	AR (3)	AR (4)	AR (5)
5078.500	5046.839	5041.671	5042.775	5043.680	5044.258

Es importante analizar si el primer valor mínimo del criterio de Akaike es adecuado. Para el caso de que la diferencia entre el primer y último valor mínimo del criterio de Akaike sea muy estrecho, entonces se recomienda realizar una nueva corrida de ARSTAN con el valor máximo del modelo AR. Para el ejemplo actual, el AIC recomienda Utilizar un AR de 2, con los coeficientes de autoregresión $T = -1$, 0.2247 y $T = -2 = 0.1193$. En este caso, la R^2 debido a la autoregresión común será de 7.84%.

En el siguiente apartado, con el modelo autoregresivo univariado se generaron estadísticas para las series residuales al aplicarle a estas un AR sin restricciones (Cuadro 13).

Cuadro 13. Estadísticas de las series residuales al aplicarles un modelo autoregresivo sin restricciones. Se incluyen sólo algunas series.

No	Serie	Intervalo	Años	Media ¹	Mediana ²	Sens. Media ³	Desv Est. ⁴	Skew. S ⁵	Kurtosis ⁶	Trend Var%	Autocorrelación parcial			L-Box Prob
											1er ord	2º. ord	3º. ord	
1	CBA102A	1567-2009	443	1.000	0.989	*0.361	0.312	0.120	0.742	0.143	0.00	-0.02	-0.02	0.119
2	CBA102B	1777-2009	233	1.002	1.000	*0.339	0.300	-0.350	0.822	0.0187	-0.01	-0.05	0.05	0.296
3	CBA111A	1724-2009	286	1.000	0.985	0.262	0.241	0.369	0.141	0.0519	0.00	0.00	-0.01	0.490
4	CBA111B	1708-2009	302	0.999	0.968	0.272	0.255	0.338	0.231	0.0496	0.01	0.01	0.00	0.099
5	CBA111C	1713-2009	297	1.001	0.998	0.254	0.236	0.343	0.733	0.0536	-0.01	-0.03	0.04	0.117
6	CBA112A	1669-2009	341	1.002	0.989	0.407	0.353	0.373	0.494	0.0349	-0.01	-0.03	0.03	0.157
7	CBA112B	1662-2009	346	0.998	0.969	*0.427	0.373	0.408	0.491	0.0229	-0.01	-0.03	0.00	0.168

*Observación: si se presentan valores negativos en cualquiera de las series, el punto decimal para la sensibilidad media se indica con un asterisco. En tal situación, el valor de la sensibilidad media no es estrictamente correcto.

¹Media = Sumatoria de las mediciones dividida entre el número total de mediciones; ²Mediana: Valor medio en una serie de mediciones, cuando se estos se ordenan de menor a mayor; ³Sensibilidad media: Porcentaje promedio de cambio en el grosor de un anillo determinado en comparación con el grosor del siguiente anillo de crecimiento; ⁴Desviación estándar: Medida de dispersión de los datos con respecto a la media y se obtiene al calcular la raíz cuadrada de la varianza; ⁵Skewness: Medida de la asimetría en la distribución probabilística de los valores de variables aleatorias; ⁶Kurtosis: Determina el grado de concentración de los valores con relación a la distribución normal, de esta manera los valores pueden estar concentrados en un punto (pico) o bien distribuidos; ⁷Autocorrelación: relación existente entre el crecimiento del siguiente anillo y el previo; si dicho crecimiento está influenciado por el crecimiento del anillo previo, entonces tendrá una correlación alta, que decrecerá a través del tiempo.

El programa también genera los coeficientes autoregresivos para cada serie y de esta manera se puede determinar el modelo autoregresivo más apropiado para cada una de ellas. A manera de ejemplo, en el Cuadro 14 se muestran los coeficientes autoregresivos para algunas series.

Cuadro 14. Coeficientes autoregresivos para algunas series y su varianza explicada.

Orden	T= -1	T= -2	T= -3	T= -4	T= -5	T= -6	T= -7	T= -8	T= -9	T= -10	Varianza explicada (%) ¹
1	0.4598	0.1448									30.43
2	0.4186	0.1525									26.69
3	0.2680	0.1093	0.1170								14.07
4	0.2824	0.1363	0.1127	0.0964							22.21
5	0.2622	0.1562									12.24
6	0.2140	0.1546									8.84
7	0.2468	0.2595									17.23

¹ Varianza promedio explicada por la autoregresión = 19.50%

Los valores extremos (superiores a 3 desviaciones estándar con relación a la media) en los residuales normalizados se indican para cada una de las series. Esta información es importante para definir posibles errores de medición, problemas de crecimiento de los árboles para esos años específicos, influencia de eventos hidroclimáticos extremos, etc. Así por ejemplo, en las siete primeras series, el programa detectó los siguientes años con valores extremos (Cuadro 15).

Cuadro 15. Valores extremos en los residuales normalizados. Estos valores son tres desviaciones estándar con relación a la media.

Orden	Año	Valor	Año	Valor	Año	Valor	Año	Valor
1	1726	3.03	1791	3.08	1797	-4.12	2007	3.24
2	1789	-3.80						
3	1992	3.16						
4	1981	3.63						
5	1981	3.63	1992	3.05				
6	1926	3.10	1968	3.04	1981	3.37	1992	3.16
7	1792	3.10	1903	3.42	1920	3.18		

El programa también proporciona los valores del modelo autoregresivo de las series residuales al aplicarles a todas ellas un orden restringido, que no excede el orden común autoregresivo seleccionado (Cuadro 16).

Cuadro 16. Modelo autoregresivo de las series Residuales.

T= 0	1.000	T= -1	-0.089	T= -2	-0.062	T= -3	-0.010	T= -4	0.034	T= -5	-0.080
T= -6	0.019	T= -7	0.063	T= -8	0.078	T= -9	-0.018	T= 10	-0.079	T= 11	0.014

La estimación de autoregresión de Yule-Walker para 10 años, aunque a manera de ejemplo, se ejemplifica sólo para 5 años: Los valores en cada columna, representan el coeficiente parcial de autocorrelación (Cuadro 17).

Cuadro 17. Autogresión Yule-Walker para las series residuales.

Orden	T= 0	T= -1	T= -2	T= -3	T= -4	T= -5
1	1.000	-.0887				
2	1.000	-.0950	-.0704			
3	1.000	-.0965	-.0725	-.0224		
4	1.000	-.0959	-.0706	-.0198	.0271	
5	1.000	-.0938	-.0721	-.0253	.0197	-.0778
6	1.000	-.0932	-.0723	-.0251	.0202	-.0770
7	1.000	-.0937	-.0678	-.0262	.0217	-.0729

De manera adicional, se imprime Información sobre el Criterio Akaike, también para 10 años, aunque aquí sólo se ejemplifica para 5 años (Cuadro 18).

Cuadro 18. Criterio Akaike para las series residuales.

AR (0)	AR (1)	AR (2)	AR (3)	AR (4)	AR (5)
4979.263	4977.344	4976.879	4980.266	4979.255	4981.585

El orden autogresivo seleccionado es 2, con los coeficientes de autogresión $T = -1$, -0.0950 y $T = -2$, -0.0704 . La R^2 debido a la autogresión disminuyó de 7.84 antes de aplicar el modelo autogresivo a sólo 1.28%.

La siguiente parte que incluye la salida del programa, se refiere a estadísticos de la cronología (versiones Estándar, Residual y Arstan) para cada uno de los años y en este aspecto, proporciona el valor del índice, número de radios y árboles involucrados para determinar el índice en cada año de la cronología, desviación estándar, error estándar, coeficiente de variación, valores skeweness, Kurtosis y un gráfico de dispersión de los índices con respecto a su desviación estándar y error estándar (Cuadro 19). La primer parte es para la cronología estándar, que se genera sin aplicar un modelo autogresivo, cuyos índices se calculan con una media robusta bipesada.

A continuación en el archivo de salida se describen los estadísticos de la cronología al utilizar la media robusta. Un cuadro de dispersión similar se muestra para la cronología residual al aplicar el procedimiento autoregresivo de las series con detrending y finalmente se presenta un cuadro de dispersión de los índices de la cronología ARSTAN, que es similar a la cronología residual pero al añadirle el modelo autoregresivo.

La salida del programa también proporciona el intervalo común de las series a las que se les aplicó el detrending, indica la correlación de cada serie con la cronología, información de gran relevancia, ya que permite determinar que series aportan mayor varianza a la cronología.

Una parte adicional la integra el análisis de componentes principales para cada versión de cronologías y la variación explicada por cada eigenvector; series que la integran y estadísticos descriptivos de cada cronología; posteriormente proporciona los valores (índices) y número de muestras involucradas para el cálculo de cada valor. Finalmente se encuentra un resumen de las estadísticas para cada una de las cronologías (Cuadro 20).

Como parte final, se muestran los índices dendrocronológicos y tamaño de muestra utilizado para la generación del valor de cada año, en cada una de las diferentes versiones de la cronología (Estándar, Residual y Arstan). Esta información se presenta en tres cuadros diferentes, uno para cada versión de la cronología. Una representación gráfica de los datos se observa en la Figura 16.

Cuando el programa ARSTAN finaliza el análisis, permite observar los estadísticos de las diferentes series de la base de datos en sus nueve diferentes archivos de salida, entre estos archivos de salida, el de mayor importancia es el que contiene las tres diferentes

Cuadro 20. Resumen de los estadísticos de las cronologías Estándar, Residual y Arstan para el sitio Cerro Barajas, Durango, período 1510 – 2009 (500 años), 19 árboles y 47 radios.

Estadísticos	Versión de cronología		
	ESTANDAR	RESIDUAL	ARSTAN
Media	0.9900	0.9930	0.9928
Mediana	0.9657	0.9608	0.9653
Sensibilidad media	0.2230	0.2460	0.2251
Desviación estándar	0.2357	0.2189	0.2259
Skewness	0.3684	0.3147	0.3951
Kurtosis	-0.0675	-0.1916	-0.1472
Autocorrelación 1er orden	0.2980	-0.0118	0.2000
Autocorrelación 2º. orden	0.0686	-0.0570	0.0754
Autocorrelación 3er. orden	-0.0066	-0.0591	-0.0312
Varianza debida a autoregresión (%)	8.1		3.3
Error de la varianza	0.004395		0.002744
Relación de la varianza del error de las cronologías (ARSTAN/STNDRD)			0.6770
Intervalo común de las series de crecimiento	1826 a 2008, 183 años, 9 árboles, 29 radios		
Correlaciones medias:	Series estándar	Series residuales (ruido blanco)	
Entre todo los radios	0.471	0.544	
Entre árboles (varianza Y)	0.448	0.522	
Dentro de árboles	0.562	0.626	
Radio vs media	0.697	0.746	
Relación señal-ruido ¹	5.677	7.648	
Concordancia con la cronología poblacional	0.850	0.884	
Varianza en el primer eigenvector (%)	49.95	56.67	
Media del intervalo común de la cronología	0.991	0.997	
Desviación estándar del intervalo común de la cronología	0.236	0.227	

¹Señal: variaciones en el grosor de los anillos atribuibles a factores climáticos, mientras aquellas que no son climáticas se consideran ruido. Una relación elevada señal-ruido significa que el crecimiento de los anillos tienen una alta influencia del clima (Fritts, 1976).

cronologías con extensión *.crn (Figura 16), estas series de tiempo o cronologías permitirán analizar la variabilidad ambiental, en este caso para Cerro Barajas, y que a su vez, en base a estas series de tiempo, será factible reconstruir variables climáticas como la precipitación, análisis de la influencia de fenómenos de circulación general como El Niño Oscilación del Sur, El Monzón, etc., en la variabilidad climática de esta región, información que se extenderá en el tiempo como longevos sean los árboles que se incluyan en el análisis.

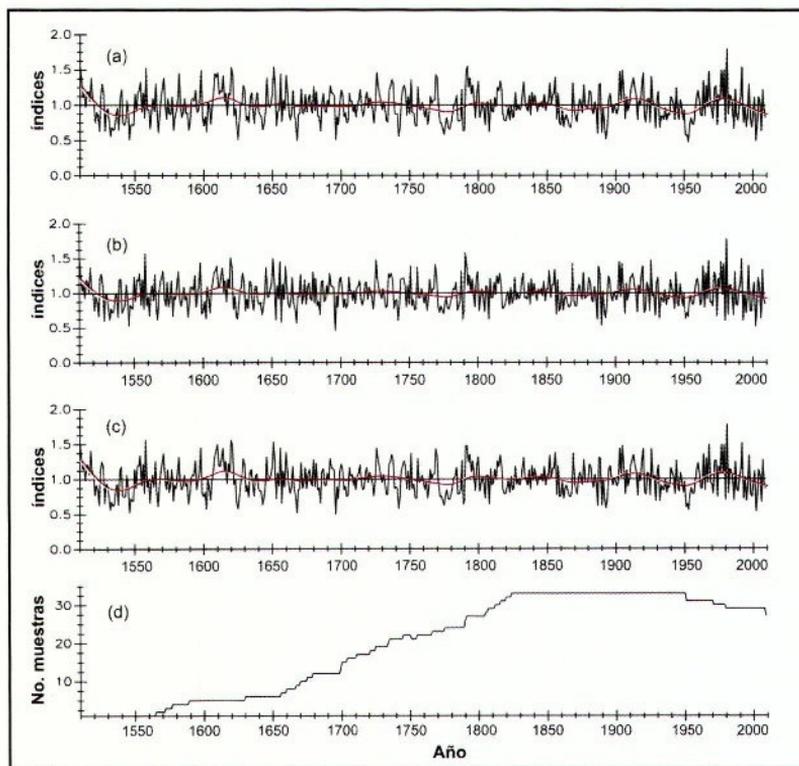


Figura 16. Índices dendrocronológicos de las versiones de cronologías, Estándar (a), Residual (b), Arstan (c) y el número de muestras que comprende cada uno de los segmentos de las cronologías (d), para la especie *Pseudotsuga menziesii* del sitio Cerro Barajas, Guanaceví, Durango

La importancia de este tipo de trabajos radica en que es factible generar en base a estas series de tiempo, mayor información a la que se dispone de registros observados, permitiendo el análisis de tendencias de fenómenos como sequías, precipitaciones extraordinarias, entre otros, a escalas de tiempo mayor, con el objetivo de tratar de conocer eventos futuros o con base en programas de modelación, reconstruir estos eventos bajo diferentes escenarios.

IX. CONCLUSIONES

La culminación de un trabajo dendrocronológico es el desarrollo de series de tiempo lo más extensas posible, con alta sensibilidad a las variaciones del clima y que permitan desarrollar reconstrucciones paleoclimáticas de alta calidad. Este trabajo, sin embargo, debe fundamentarse en todo un proceso metodológico bien secuenciado y organizado, que involucre, la utilización de especies sensibles, con producción de anillos de crecimiento anual, selección de los especímenes a muestrear en sitios con el menor disturbio posible, obtención de un número suficiente de núcleos de crecimiento y de secciones transversales, que permita un tamaño de muestra adecuado para cada año que involucre la serie de crecimiento ha generar.

Similarmente, se debe asegurar un fechado exacto al año de su formación de cada banda de crecimiento anual, mediante la verificación independiente del fechado por personal entrenado en estos aspectos y la aplicación de programas de calidad de fechado, para posteriormente elegir las opciones de estandarización que minimicen la influencia biológica de la edad y restricciones físicas en el grosor de los anillos, imprimidas por un diámetro de fuste cada vez mayor. Esta etapa final, involucra procesos estadísticos, matemáticos y de modelación ampliamente desarrollados por dendrocronólogos alrededor del mundo, procesos que se encuentran en continua evolución debido al avance tecnológico cada vez mayor, pero de los cuales, se debe tener un conocimiento básico para realizar una interpretación adecuada y saber elegir las mejores opciones, que conlleven al desarrollo de series dendrocronológicas estadísticamente más sensibles.

Los investigadores que se inician en esta área científica, tienen la ventaja de la existencia de información y programas específicos de

distribución gratuita para estudios dendrocronológicos. La experiencia que obtengan con el desarrollo de series de tiempo, les permitirá mejorar paulatinamente el proceso metodológico, desde la toma de muestras, montado, fechado y selección de las opciones de estandarización más pertinentes.

Las metodologías utilizadas para la estandarización de anillos de crecimiento se han diversificado en las últimas décadas, sin embargo, el programa ARSTAN es todavía el método universal y que si se aplica correctamente, garantiza la generación de cronologías de alta calidad y que pueden constituir un método indirecto de información climática por varios siglos o milenios.

La generación de una base de datos de series de tiempo dendrocronológicas, debe ser un proceso continuo, que implica, la búsqueda de nuevas especies con potencial dendrocronológico, particularmente en áreas tropicales y semitropicales, así como la actualización de series desarrolladas previamente, de tal forma, que este proceso conlleve a disponer de una red de cronologías que cubra los diversos ecosistemas del territorio nacional y se esté en la posibilidad de analizar fluctuaciones hidroclimáticas a nivel regional.

X. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento otorgado a través de fondos del Instituto Interamericano para Investigación del Cambio Climático (IAI), proyecto CRN # 2047, a su vez financiado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325).

IX. LITERATURA CITADA

- Applequist, M.B. 1958. A simple pith locator for use with off-center increment cores. *Journal of Forestry* 56: 141.
- Becker, M. 1989. The role of climate on present and past vitality of silver forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1110-1117.
- Bernal, S.S. y T. Terrazas, S. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Maderas y Bosques* 6(1): 73-86.
- Biondi, F. and F. Qeadan. 2008. A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Research* 64 (2):81-96.
- Briffa, K.R., P.D. Jones, T.S. Bartholin, D. Eckstein, F.H. Scwingruber, W. Karlen, and P. Zetterberg. 1992. Fenno-Scandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales. *Climate Dynamics* 7: 111-119.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva D., P.Z. Fulé, P.M. Brown, L.L. Yocom, V. Constante G., J. Estrada A. 2009. Interpretación del historial de incendios en bosques mixtos de coníferas. Folleto Técnico No. 13. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo. 59 p.
- Constante García, V., J. Villanueva D., J. Cerano P., J. Estrada A. 2009. Fechado, control de calidad y medición de series de anillos de crecimiento con fines ecológicos y paleoclimáticos. Folleto Técnico No. 14. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. 48 p
- Cook, E.R. 1985. A time-series analysis approach to tree-ring standardization. Ph. D. Dissertation. Department of Geosciences, University of Arizona. Tucson, Az.
- Cook, E.R., and R.H. Holmes. 1986. Guide for computer program ARSTAN. Laboratory of Tree Ring Research. The University of Arizona. Tucson, Az. 9 p.
- Cook, E.R., 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Cook, E.R., and L.A. Kairiukstis. 1990. *Methods of Dendrochronology*:

- applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. 351 p.
- Cook, E.R. and K. Peters. 1997. Calculating unbiased tree ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene* 7: 359 – 368.
- D'Arrigo, R. D., E. Mashig, D. C. Frank, R. J. S. Wilson, and G. C. Jacoby, 2005. Temperature variability over the past millennium inferred from northwestern Alaska tree rings. *Climate Dynamics* 24:227–236.
- D'Arrigo, R. D., R. J. S. Wilson, and G. C. Jacoby, 2006. On the long-term context for late twentieth century warming. *Journal of Geophysical Research* 111:1–12, D03103,
- Datsenko, N., D. Sonechkin, Y. Bao, and Q. Chun. 2009. Shortcomings in the tree-ring regional curve standardization and an improvement of the method. EMS Annual Meeting Abstracts, Vo. 6. ENS 2009-20. 9th EMS/9th ECAM.
- Delgado, C.S. 2000. Aplicaciones estadísticas en análisis dendrocronológicos. Pp. 79 – 102. In: F. A. Roig (compilador). *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC. Mendoza, Argentina. 434 p.
- Desplanque, C., C. Rolland, and F.H. Schweingruber. 1999. Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation: *Picea abies* and *Abies alba* in Tarentaise and Maurienne (French Alps). *Trees* 13:218-227.
- Douglass, A.E. 1919. *Climatic cycles and tree-growth*. Carnegie Institution, Washington, D.C.
- Esper, J., E. R. Cook, and F. H. Schweingruber, 2002. Low frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295:2250–2253.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press. London. 567 p.
- Grissino-Mayer, H.D., Holmes, R.L., and Fritts, H.C., 1992: *International tree-ring data bank program library: user's manual*. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 104 pp. www.ltrr.arizona.edu/software.html

- Liutsko, L. 2008. What trees tell us: dendrochronological and statistical analysis of the data. Department of Statistics, Biology Faculty. University of Barcelona. Barcelona, Spain. 61 p.
- Naurzbaev, M.M., M.K. Hughes, and E.A. Vaganov. 2004. Tree-ring growth curves as sources of climatic information. *Quaternary Research* 62: 126-133.
- Schweingruber, F.H. 1988. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Kluwer, Holland. 276 p.
- Schweingruber, F.H., D. Eckstein, F. Serre-Bachet, and O.U. Braker. 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 4: 97-113.
- Stahle, D.W. 1999. Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies. *IAWA Journal* 20(3): 249-253.
- Stokes, M.A. and Smiley, T.L. 1968. An introduction to Tree-ring dating. Tuscon: University Arizona Press. 73 p.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano P., D.W. Stahle, M.D. Therrell, M.K. Cleaveland, I. Sánchez C. 2004. Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México. Folleto Técnico No. 2. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. 37 p.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano P., D.W. Stahle, M.D. Therrell, L. Vázquez Selem, R. Morán Martínez, B.H. Luckman. Morán M. 2006. Árboles viejos del centro-norte de México: Importancia ecológica y paleoclimática. Folleto Científico No. 20. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 46 p.
- Villanueva D. J., D.W. Stahle, B.H. Luckman, J. Cerano P., M.D. Therrell, R. Morán, M., M. K. Cleaveland. 2007. Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. Y acciones para su conservación en México. *Ciencia Forestal* 32 (101): 9 – 37.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano P., V. Constante G., L.E. Montes G., L. Vazquez S. 2009. Muestreo dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales. Folleto Técnico No. 13. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo. 49 p.
- Warren, W.G. 1980. On removing the growth trend from dendrochronological data. *Tree-Ring Bulletin* 40: 35 – 44.



Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos Experimentales



- Sede de Centro de Investigación Regional
- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
- Campo Experimental

Comité Editorial del CENID-RASPA

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong
Secretario: Dr. Miguel A. Velásquez Valle
Vocales: Dr. Juan Estrada Avalos
M. C. Miguel Rivera González

Revisores Técnicos:

Dr. Miguel A. Velásquez Valle
Dr. Luis Manuel Valenzuela Nuñez

Diseño:
L.DG. Leticia Jara Ramírez

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de Julio del 2010 en los talleres del Grupo Colorama, Adolfo Aymes No. 50 Cd. Industrial, Torreón, Coahuila C. P. 27000.
Tel. (871)7506500
Su tiraje consta de 500 ejemplares

RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

DR. JOSÉ ANTONIO CUETO WONG

Director

ING. ARMANDO ESTRADA GONZÁLEZ

Jefe de Operación

LIC. FLOR CARINA ESPINOZA DELGADILLO

Jefe Administrativo

PERSONAL INVESTIGADOR

Investigador	Red de Investigación e Innovación
Catalán Valencia Ernesto Alonso	Modelaje
Cerano Paredes Julián	Servicios Ambientales
Constante García Vicenta	Servicios Ambientales
Estrada Ávalos Juan	Agua y Suelo
González Barrios José Luis	Agua y Suelo
González Cervantes Guillermo	Agua y Suelo
Inzunza Ibarra Marco Antonio	Agua y Suelo
Macías Rodríguez Hilario	Agua y Suelo
Muñoz Villalobos Jesús Arcadio	Agua y Suelo
Potisek Talavera María del Carmen	Agua y Suelo
Rivera González Miguel	Agua y Suelo
Román López Abel	Agua y Suelo
Sánchez Cohen Ignacio	Agua y Suelo
Trucios Casiano Ramón	Agua y Suelo
Valenzuela Núñez Luis Manuel	Servicios Ambientales
Velásquez Valle Miguel Agustín	Modelaje
Villa Castorena María Magdalena	Agua y Suelo
Villanueva Díaz José	Servicios Ambientales

www.gobiernofederal.gob.mx
www.sagarpa.gob.mx
www.inifap.gob.mx
www.bicentenario.gob.mx