



NOTA DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH NOTE

DENDROCRONOPIROLOGÍA: ANÁLISIS DE LA EVIDENCIA MORFOLÓGICA DE INCENDIOS FORESTALES

DENDROCHRONOPYROLOGY: ANALYSIS OF THE MORPHOLOGICAL EVIDENCE OF FOREST FIRES

Diana Yemilet Ávila Flores¹, Marco Aurelio González Tagle², Javier Jiménez Pérez², Oscar Alberto Aguirre Calderón², Eduardo Javier Treviño Garza² y Benedicto Vargas Larreta³

RESUMEN

El régimen de incendios es una importante fuerza evolutiva que modifica la estructura y favorece la adaptación de algunos ecosistemas al fuego. En la última década el número de estudios enfocados a la reconstrucción histórica de la ocurrencia de incendios alrededor del mundo se ha incrementado. En el presente trabajo se hace una descripción de la aplicación de los métodos dendrocronológicos para la reconstrucción y análisis de los regímenes ecológicos de fuego, así como de su implicación en el manejo de los recursos forestales. Entre las técnicas conocidas figuran el análisis de carbón en sedimentos de lagos, la estructura de edades, y la teledetección. Sin embargo, una de las más empleadas es el análisis de las cicatrices de fuego en los árboles, las cuales se forman cuando el calor es demasiado intenso, o bien tiene un tiempo de residencia muy largo, suficiente como para penetrar la corteza y matar parte del cambium. Mediante su aplicación es factible reconocer el historial del siniestro en los bosques, a partir de la evidencia plasmada en los anillos de crecimiento. Esta opción provee bases sustentadas útiles para el diseño y desarrollo de estrategias de manejo integral del fuego, las que deben ser consideradas como una pieza fundamental en los programas de restauración y protección de los ecosistemas.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, cicatrices de fuego en los árboles, cronología maestra de incendios, dendrocronología, gráfico de crecimiento, régimen de fuego.

ABSTRACT

Fire regime is an important evolutionary force that modifies the structure and promotes the adaptation of some ecosystems to fire. In the last decade a good number of studies focused on the historical reconstruction of wildfires around the world. In this paper a description of the application of dendrochronological methods for reconstruction and analysis of ecological fire regimes is made, as well as their involvement in the management of forest resources. Among the known techniques are the analysis of coal in lake sediments, age structures and remote sensing. However, one of the most regularly used is the analysis of fire scars on trees, which are formed when heat is very intense, or when it has a very long residence time, which is enough as to penetrate the bark and kill part of the cambium. By its application it is feasible to recognize the history of the fire in the woods, from the evidence reflected in the growth rings. This technique provides a useful sustained basis for the design and development of strategies for integrated fire management, which should be considered as a fundamental part of restoration programs and ecosystem protection.

Key words: Growth rings, fire scars on trees, master fire chronology, dendrochronology, growth chart, fire regime.

Fecha de recepción/date of receipt: 25 de octubre de 2012; Fecha de aceptación/date of acceptance: 18 de septiembre de 2013.

¹ Campo Experimental Saltillo. CIR-Norte Centro. INIFAP. Correo-e: dyemilet@gmail.com.

² Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

³ Instituto Tecnológico Forestal, El Salto, Durango.

Varios de los principales biomas del mundo incluyen ecosistemas dependientes del fuego, al menos en lo que respecta a la producción de biomasa, cobertura arbórea y composición de especies (Bond *et al.*, 2004). Lo que implica que sean inflamables y con ello, el régimen de incendios resultante se convierte en una importante fuerza evolutiva que modifica su estructura y genera ecosistemas adaptados a esos disturbio (Caldaro, 2002; Bond y Keeley, 2005).

De esta manera, un régimen de fuego puede ser considerado como una síntesis de la ocurrencia de incendios, de su comportamiento y de sus efectos dentro de un área en particular a lo largo del tiempo, y que incluye parámetros específicos tales como la frecuencia, extensión, época de ocurrencia, tipo de incendio, severidad e intensidad (Kaufmann *et al.*, 2006; Lloret, 2004).

Actualmente, los científicos y los silvicultores están cada vez más conscientes del papel ecológico del fuego y de la necesidad de entender su relación con las prácticas de manejo, a fin de proteger a los ecosistemas y preservar su biodiversidad presente (Bergeron *et al.*, 2002; González *et al.*, 2007).

En este contexto, en la última década, el número de estudios enfocados a la reconstrucción histórica de la ocurrencia de incendios alrededor del mundo se ha incrementado. El propósito es entender la relación clima-fuego-vegetación, y las interacciones antropogénicas involucradas (Heyerdahl y Card, 2000; Scott *et al.*, 2000; González, 2005; Touchan *et al.*, 2012). Dichas investigaciones destacan la importancia de las reconstrucciones de los patrones históricos de ocurrencia de incendios forestales y señalan que la generación de conocimientos específicos sobre el disturbio producido por el fuego y sus efectos ecológicos son esenciales para el desarrollo de estrategias de manejo de este factor, que permitan su integración en programas silvícolas, de restauración y políticas de protección de los recursos naturales (Rodríguez y Fulé, 2003; Gauthier *et al.*, 2004; Stephens y Ruth, 2005; González *et al.*, 2008; Marques *et al.*, 2011).

Las técnicas dendrocronológicas han sido las más empleadas para identificar, datar y describir la incidencia histórica del fuego en los bosques. Comprende la búsqueda de cicatrices en los fustes de los árboles y, de manera particular, el análisis de su huella en los anillos de crecimiento (McBride, 1983; González *et al.*, 2008; Stephens *et al.*, 2003; Schoennagel *et al.*, 2011). Así, la dendrocronopirología se especializa en el datado de anillos de crecimiento de los árboles para estudiar el pasado y presente de los regímenes de incendios (Cerano *et al.*, 2009).

Los métodos dendrocronológicos para la reconstrucción del historial de incendios tiene ventajas de aplicación sobre otros, debido a la practicidad en la obtención de muestras y en la realización de análisis, además de que puede ser complementada con datos de registros documentales y de sedimentos en suelos (Conedera *et al.*, 2009).

Several of the major biomes of the world include fire-dependent ecosystems, at least in regard to biomass production, tree cover and species composition (Bond *et al.*, 2004). This implies that it is a flammable ecosystem and thus the resultant fire regime becomes an important evolutionary force that changes its structure and generates ecosystems adapted to these disturbances (Caldaro, 2002; Bond and Keeley, 2005).

Thus, a fire regime can be regarded as a synthesis of fire occurrence, behavior and effects within a specific area over time and includes specific parameters such as frequency, extent, time of occurrence, type of fire severity and intensity (Kaufmann *et al.*, 2006; Lloret, 2004).

Currently, scientists and foresters are increasingly aware of the ecological role of fire and the need to understand their relationship with management practices in order to protect the ecosystems and preserve their biodiversity (Bergeron *et al.*, 2002, Gonzalez *et al.*, 2007).

In this context, in the last decade, the number of studies focused on the historical reconstruction of wildfires around the world has increased. The purpose is to understand the climate-fire-vegetation and anthropogenic interactions involved (Heyerdahl and Card, 2000, Scott *et al.*, 2000; González, 2005; Touchan *et al.*, 2012). Such research highlights the importance of the reconstruction of the historical patterns of forest fires and point out that the generation of specific knowledge about the disturbance caused by fire and its ecological effects are essential for the development of management strategies that allow this factor integration programs in forestry, restoration and protection policies of natural resources (Rodríguez and Fulé, 2003; Gauthier *et al.*, 2004; Stephens and Ruth, 2005; González *et al.*, 2008; Marques *et al.*, 2011).

The dendrochronological techniques have been the mostly used to identify, date and describe the historical occurrence of fire in the forests. It includes search scars on the stems of trees and, in particular, the analysis of its trace in growth rings (McBride, 1983, González *et al.*, 2008; Stephens *et al.*, 2003; Schoennagel *et al.*, 2011).

Thus, dendrochronopirology specializes in tree ring dating to study the past and present of fire regimes (Cerano *et al.*, 2009).

The dendrochronological methods for the reconstruction of fire history has application advantages over others because of their practicality in obtaining samples and performing analyzes; it can be supplemented, as well, with data from documentary records and from soil sediments (Conedera *et al.*, 2009).

Based on the above mentioned, the objective of this work consisted of a review of the implementation of dendrochronopirology, and its involvement in the management of forest resources.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo consistió en hacer una revisión de la aplicación de la dendrocronopirología, así como su implicación en el manejo de los recursos forestales.

La firma del fuego: evidencia morfológica

La primera evidencia para la creación de un régimen o historia de fuego de un ecosistema específico es la ocurrencia de incendios, la cual es posible determinar a partir de plantas que parecen haber germinado después de un evento de ese tipo, de restos de carbón o de las cicatrices de quemaduras en los árboles (Agee, 1993). Las últimas son la mejor opción para el uso de métodos dendrocronológicos a efecto de realizar su reconstrucción histórica.

Las cicatrices se forman cuando el fuego es demasiado intenso o cuando tiene un tiempo de residencia muy largo, suficiente como para penetrar la corteza y matar parte del cambium. Si el árbol sobrevive, cada año posterior a la creación de la primera cicatriz, el cambium vivo adyacente se expande lentamente sobre la superficie de la cicatriz y, finalmente, la encierra mediante el proceso de crecimiento (Figura 1). De esta manera, en el anillo de crecimiento anual quedará registrado el incendio, por lo que es factible conocer el año en el que fue afectado. En los árboles son identificadas con facilidad, ya que suelen ser triangulares y se extienden a la base del árbol; se les observa, igualmente, en individuos adyacentes, aun en el mismo año del siniestro y, por lo general, se les asocia con la presencia de carbón en la albura expuesta en la corteza (Agee, 1993).

Reconstrucción de un régimen de fuego

La selección del área para la reconstrucción de un régimen de fuego es el primer punto a considerar para tal fin. Uno de los principales aspectos a tener en cuenta es la cantidad de cicatrices de fuego exhibidas por el arbolado (Cerano *et al.*, 2009). También es importante que las áreas presenten el menor grado de disturbio posible. No obstante, en muchos casos algunos terrenos que están sujetos a aprovechamientos maderables tienen un gran potencial para la toma de muestras, debido a que muchos de los individuos con una cicatriz de fuego se cortan por encima del nivel de esta marca, lo que convierte a los tocones en excelentes registros de incendios (Cerano *et al.*, 2009).

Las muestras pueden obtenerse de árboles derribados, muertos en pie y de ejemplares vivos (Arno y Sneek, 1977), que de preferencia exhiban la mayor cantidad de cicatrices de fuego. Se extraen secciones transversales o núcleos de incremento o virutas (Figura 2); se aplica un muestreo sistemático, cuya intensidad se determina con relación a la superficie que se pretende evaluar. Asimismo se extraen muestras de árboles vivos y sin cicatrices para fechar las provenientes de individuos muertos

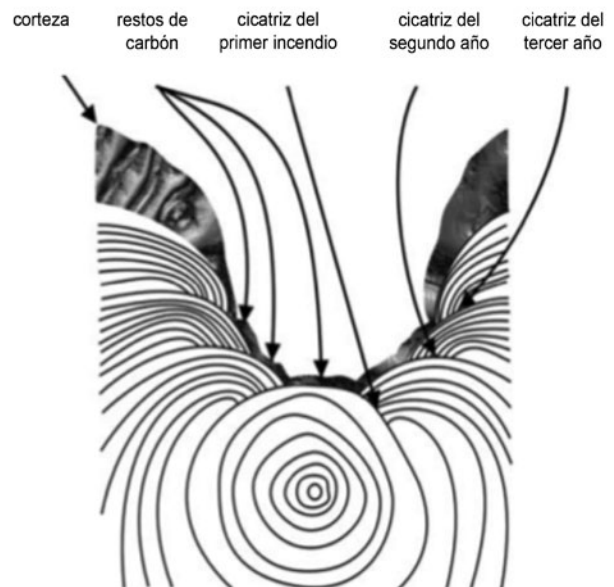
The sign of fire: morphological evidence

The first evidence for the creation of a system or fire history of a given ecosystem is the occurrence of fires, which can be determined from plants that seem to have germinated after a fire, carbon residues or of burn scars on trees (Agee, 1993). The latter are the best choice to use dendrochronological methods in order to reconstruct the history of events.

Scars form when fire is too intense or when it has had a very long residence time, enough to penetrate the bark and kill part of the cambium. If the tree survives, each year that follows the creation of the first scar, the adjacent living cambium expands slowly over the surface of the scar and finally it is enclosed by the growth process (Figure 1). Thus, in the annual ring fire will be recorded, so it is feasible to know the year when it happened. In trees, these formations are identified easily, because they are usually triangular and extend to the base of the tree; they are observed too in adjacent trees, even in the same year of the fire and they are associated with the presence of charcoal on sapwood exposed on bark (Agee, 1993).

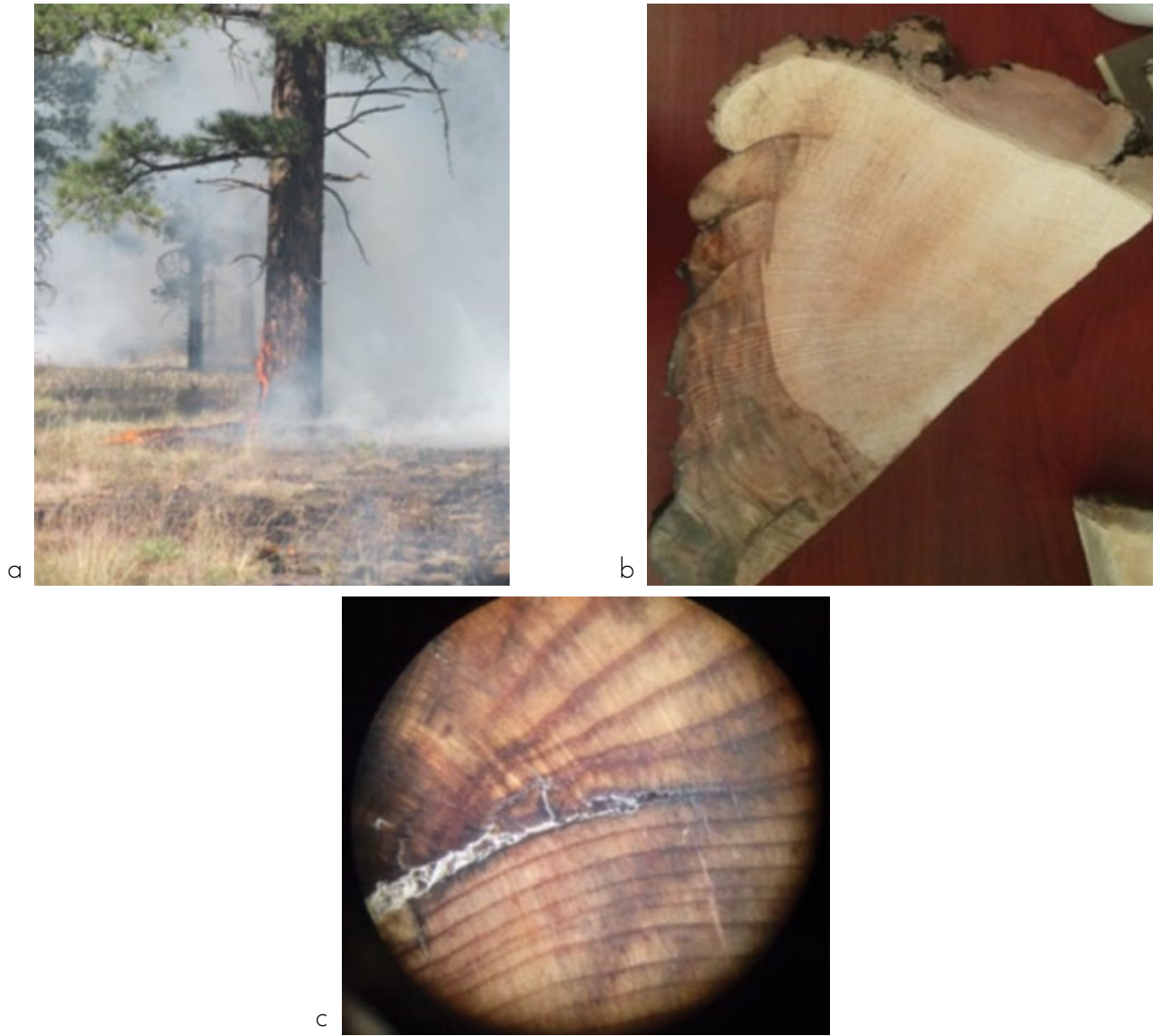
Reconstruction of a fire regime

The selection of the area for the reconstruction of a fire regime is the starting point to consider for this aim. One of the main things to take into account is the amount of fire scars exhibited by woodland (Cerano *et al.*, 2009). It is also important that the areas have the lowest possible degree of disturbance.



Fuente: González *et al.* (2007).
Source: González *et al.* (2007).

Figura 1. Ejemplo de cicatriz de fuego en el fuste de coníferas.
Figure 1. Example of fire scar on the stem of conifers.



a) Fuego de severidad baja. b) Muestra transversal extraída con formación de cicatriz de fuego. c) Evidencia morfológica plasmada en los anillos anuales de crecimiento.

a) Low severity fire. b) Cross cutting extracted with a fire scar formation. c) Morphological evidence captured in the annual tree rings.

Figura 2. Proceso secuencial de la formación de cicatrices de fuego y extracción de muestras.

Figure 2. Sequential process of the formation of fire scars and sample extraction.

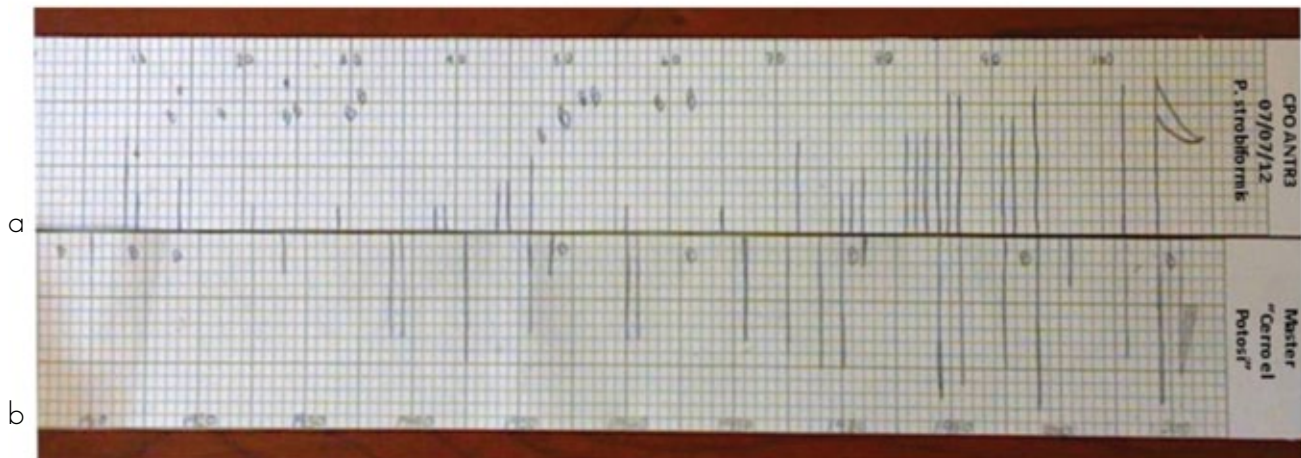
y complementar los datos cronológicos para el área de interés (Cerano *et al.*, 2009).

El material se prepara para el análisis dendrocronológico, lo cual consiste en el secado bajo sombra y a la intemperie. Las virutas se pulen para destacar las estructuras de los anillos de crecimiento y apreciar con mayor claridad la ubicación de la cicatriz de incendio (Cerano *et al.*, 2009). Concluido lo anterior, se realiza la datación o fechado exacto de la formación

However, in many cases, some land subject to timber harvesting have great potential for sampling, because many individuals with a fire scar are cut above the level of this mark, which makes stumps excellent fire records (Cerano *et al.*, 2009).

Samples can be obtained from felled trees, standing dead and live specimens (Arno and Sneek, 1977), which preferably exhibit the greatest number of fire scars. Cross sections or cores or chips (Figure 2) are extracted; a systematic sampling is followed, whose intensity is determined in regard to the area to be evaluated. Also, samples from living trees without scars are taken for dating dead individuals and to complement the historical data for the area of interest (Cerano *et al.*, 2009).





a) Gráfico de crecimiento (*skeleton plot*) de muestra con cicatriz de incendio procedente del tocón. b) Cronología maestra para el fechado.
 a) Growth chart (*skeleton plot*) of sample with fire scar coming from the stump. b) Master chronology for datign

Figura 3. Proceso de fechado de anillos de crecimiento para muestras procedentes de árboles muertos.

Figure 3. Dating process of growth rings for samples coming from dead trees.

de los anillos de crecimiento anual, mediante la aplicación de técnicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968). El datado se facilita cuando las muestras provienen de árboles vivos, ya que es una secuencia que está anclada en el tiempo; es decir, el anillo más cercano a la corteza corresponde al último año de crecimiento. De esta manera se retrocede en la secuencia de anillos y se asigna a cada uno de ellos el año en el cual se formó (Gutiérrez, 2008).

Para el material de ejemplares muertos se hacen gráficos de crecimiento conocidos como *skeleton plots* (Figura 3a) que representan los patrones de crecimiento de los anillos, los cuales se comparan con un gráfico maestro (cronología creada a partir del fechado y medición de núcleos de incremento de árboles vivos) (Figura 3b), para contrastar patrones de crecimiento entre ambos; así se obtiene su fechado y se genera la cronología de incendios (Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2009).

A continuación se identifica la estacionalidad o época del año en la que ocurrió el siniestro, a partir de la posición relativa de cada cicatriz de fuego dentro del anillo de crecimiento anual (Figura 4); por ejemplo, en qué estación (primavera o verano) se formó. Por lo general, se categoriza con base en el método de Grissino-Mayer (2001) (Cuadro 1).

The material is prepared for dendrochronological analysis, which involves drying under shade and weatherproof. The chips are polished to highlight the structures of the growth rings and appreciate more clearly the location of the fire scar (Cerano *et al.*, 2009). Once the former process is concluded, the exact dating or dating of the formation of annual growth rings is done through the application of conventional techniques (Stokes and Smiley, 1968). Dating is easier when the samples come from living trees, as it is a sequence that is anchored in time, *i. e.*, the ring closest to the bark corresponds to the growth of last year. In this way, a step back is made in the ring sequence and to each one of them is assigned the year in which they were formed (Gutiérrez, 2008).

For material that comes from dead specimens, growth charts known as *skeleton plots* are made (Figure 3a) which represent the growth patterns of the rings, which are compared to a master chart (timeline created from the dated cores and measuring increase in living trees) (Figure 3b), to contrast growth patterns between the two; thus, dating is obtained and the fire chronology is produced (Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2009).

The next step is to identify the seasonality or time of the year in which the event took place, from the relative position of each fire scar within the annual ring (Figure 4); that is, in which season (spring or summer) it was formed. Generally, it is classified according to the Grissino-Mayer (2001) method (Table 1).



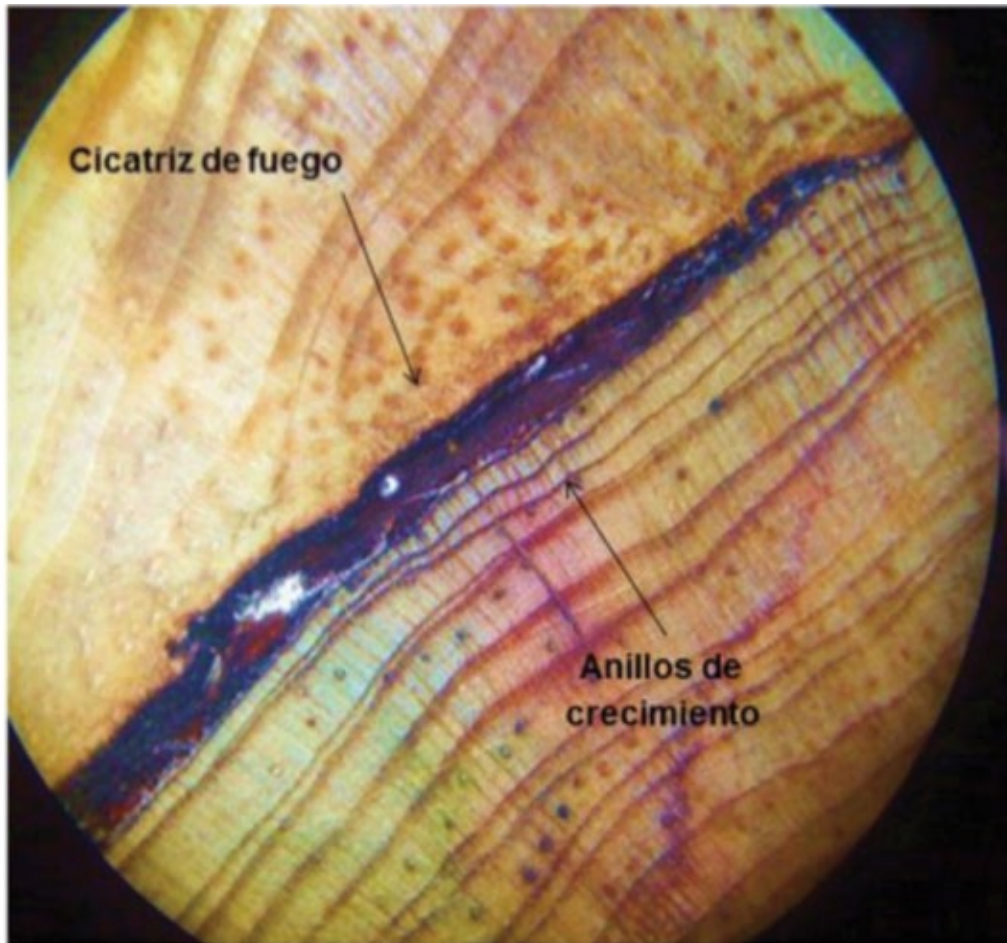


Figura 4. Vista de cicatriz de fuego, para identificación de la ubicación en el anillo de crecimiento.
Figure 4. Scar Vista fire, identifying the location in the ring growth.

Cuadro 1. Clasificación de la estacionalidad de la ocurrencia de incendios, con base en la posición relativa de la cicatriz de fuego en los anillos de crecimiento.

Clasificación (Siglas)*	Ubicación de la cicatriz
D: Dormancia	Entre la madera tardía del año anterior y al inicio de la madera temprana del año siguiente.
EE: Madera temprana	En la primera tercer parte de la proporción de la madera temprana.
ME: Mitad de la madera temprana	En la porción media de la madera temprana.
LE: Madera temprana tardía o final	En la última tercera parte de la madera temprana.
L: madera tardía	En la madera tardía.

*Las siglas son mostradas por su nomenclatura en inglés.

Table 1. Classification of the seasonability of fire occurrence, based upon the relative position of the fire scar in the growth rings.

Classification (Initials)*	Position of the scar
D: Dormancy	In late wood of the previous year and at the beginning of the early wood of the following year
EE: Early wood	In the first third part of the amount of early wood
ME: Half of early wood	In the middle part of early wood
LE: Late or final early wood	In the last third part of early wood
L: late wood	In late wood

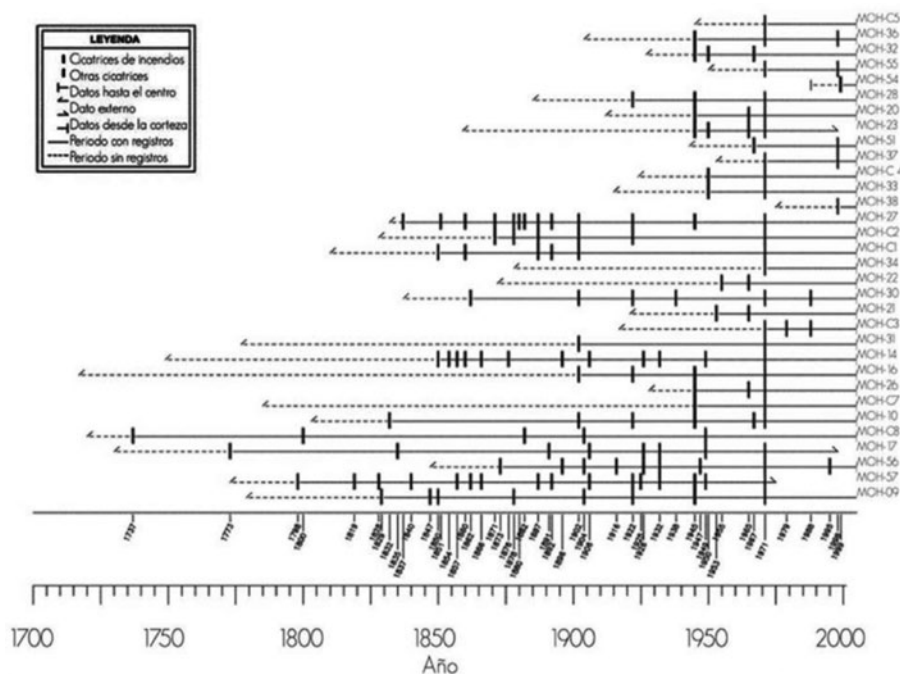
*Initials are shown because of its nomenclature in English.

Análisis del régimen de incendios

Con los datos derivados del análisis dendrocronológico se procede a la reconstrucción y análisis estadístico del régimen de fuego. El programa de cómputo más empleado es el FHX2 (Grissino-Mayer, 2001), creado para analizar la historia de incendios en ecosistemas forestales a partir de los datos de cicatrices de fuego registradas en los anillos de crecimiento anual de los árboles. Varios módulos integran el sistema FHX2,

Analysis of the fire regime

With data derived from dendrochronological analysis, reconstruction and statistical analysis of the fire regime proceed. The most frequently used computer program is FHX2 (Grissino-Mayer, 2001), which was created to analyze the history of fire in forest ecosystems from the data of fire scars in annual growth rings of trees. Several modules integrate the FHX2 system; it includes routines that provide statistical descriptions and analysis. It



Fuente: Cerano *et al.* (2010).

Source: Cerano *et al.* (2010).

Figura 5. Ejemplo de la reconstrucción de un régimen de fuego, mediante el análisis de cicatrices de fuego.

Figure 5. Example of the reconstruction of fire regime, by analyzing fire scars.

pues incluye rutinas que proporcionan descripciones estadísticas y análisis de datos; además genera representaciones gráficas del historial de incendios, lo que facilita su interpretación (Grissino-Mayer, 2001).

Los análisis estadísticos y gráficos del programa requieren el ingreso de diversos datos: identificador de muestra, año inicial y final, número de cicatrices, año(s) con registro de incendio y posición de cicatriz. El gráfico de la historia de fuego se compone de líneas horizontales que representan los árboles individuales de la muestra para un sitio determinado, y sobre las cuales los símbolos verticales son los incendios que se han fechado al año exacto de su ocurrencia (Figura 5). Al considerar todas las muestras, incluso aquellas con una sola cicatriz, los años en los cuales se verificaron los incendios se indican sobre el primer eje inferior de X y el segundo eje inferior de X señala la extensión en el tiempo del estudio.

En el análisis estadístico de los descriptores correspondiente a los intervalos de retorno del fuego se aplica la distribución *Weibull*, pues proporciona una medida menos sesgada de tendencia central que el intervalo medio de fuego tradicional. Los estadísticos evaluados son frecuencia de incendios (número de incendios por periodo), índice de cicatrices de fuego (número de árboles cicatrizados/número de árboles muestreados x 100), intervalos medios de probabilidad de *Weibull* (WMPI), intervalos de fuego máximos y mínimos, y desviación estándar de los intervalos de fuego. Se consideran lapsos de 10, 25 ó 50 años, y ayudan a identificar las posibles razones para los cambios en la frecuencia de incendios. Los mismos métodos pueden llevarse a cabo en términos espaciales, para determinar si los regímenes de incendios difieren entre dos o más sitios.

También es posible identificar los años en los que ocurrieron siniestros, especialmente fuertes. Para ello, se asume que altos porcentajes de muestras con registro de incendio, para un año en particular, fueron eventos con impactos significativos para el área, en comparación con aquellos que tuvieron valores porcentuales inferiores. Lo anterior se obtiene mediante la aplicación de filtros a 10 y 25 % de virutas con registro de incendio para cualquier año (Grissino-Mayer, 2001), para ello se incluyen varios componentes: 1) número mínimo de muestras, 2) porcentaje mínimo de muestras cicatrizadas en cualquier año, y 3) número mínimo de muestras cicatrizadas. De esta manera, se asume que aquellos años con registro de incendio y bajo porcentaje de presencia de cicatrices en el total de las muestras fueron incendios menos severos. La cicatriz es el resultado del tiempo de residencia del fuego y la intensidad calórica, lo que aumenta la huella por influencia de efectos locales de topografía, condiciones atmosféricas o disturbios relacionados con actividades humanas. Grissino-Mayer (2001) y Swetnam y Baisan (2003) infieren que años con altos porcentajes de cicatrices en el total de las muestras constituyen tamaños de superficie de mayor cobertura.

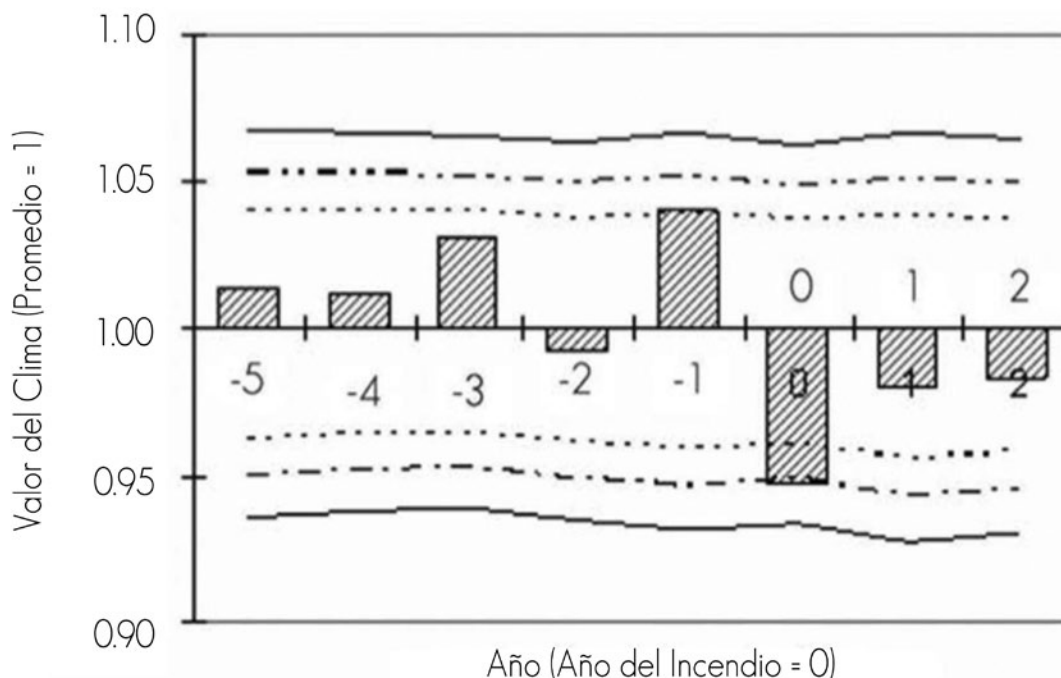
also generates graphical representations of fire history, which facilitates its interpretation (Grissino-Mayer, 2001).

Statistical analysis and the graphics of the program require the input of several data: sample identifier, initial and final year, number of scars, year (s) with fire record and scar position. The graph of the history of fire consists of horizontal lines representing individual trees sampled for a particular site, and on which the vertical symbols are fires that have been dated to the exact year of its occurrence (Figure 5). When considering all samples, even those with a single scar, the years in which fires were recorded are indicated on the first lower X axis, and the second lower X axis indicates the extension in the time of the study.

The statistical analysis of the descriptors corresponding fire return intervals the Weibull distribution is applied, as it provides a less biased measure of central tendency than the mean interval of the traditional fire. The statistics that are assessed are fire frequency (number of fires per period), fire scars index (number of scarred trees/number of trees sampled trees x 100), mean intervals of Weibull probability (WMPI), maximum and minimum intervals fire and standard deviation of the intervals of fire. Periods of 10, 25 or 50 years are considered, and help to identify possible reasons for changes in fire frequency. The same methods can be performed in spatial terms, to determine whether fire regimes differ between two or more sites.

It is also possible to identify the years in which losses occurred, especially if they were strong. Thus, it is assumed that a high percentage of samples with fire record for a particular year, significant impact events were for the area, compared with those who had lower percentages. This is obtained by applying a filter to 10 and 25 % of chips with fire record for any year (Grissino-Mayer, 2001), for which several components are included: 1) number of samples, 2) minimum rate samples healed in any year, 3) minimum number of samples healed. Therefore, it is assumed that those years with fire record and low rate of scarring on the total samples were less severe fires. The scar is the result of the residence time of fire and the heat intensity, which increases the trace influenced by local effects of topography, weather conditions or disturbances related to human activities. Grissino-Mayer (2001) and Swetnam and Baisan (2003) infer that years with high percentages of scars on the total sample mean surface sizes of greater coverage.

Another important aspect of analysis is the frequency of fire-climate relationship; this is done with the Superposed Epoch Analysis (SEA) of the FHX2 program (Grissino-Mayer, 2001) subroutine. The SEA is used to test the statistical significance of the associations between extreme weather events and the presence of fire. Statistical significance was determined by a randomization test; such an analysis is not based on the usual assumptions (normality, homogeneity of variance, independence of observations) of the parametric tests, so it is



Fuente: Cerano *et al.* (2010).

Source: Cerano *et al.* (2010).

Las líneas ubicadas en la parte superior e inferior del eje de las X representan los intervalos de confianza, a 95 %, 99 % y 99.9 %, respectivamente.

The lines at the upper part and under the x axis represent the confidence intervals of 95 %, 99 % and 99.9 %, respectively.

Figura 6. Análisis de las condiciones climáticas previas y posteriores a la ocurrencia de incendios.

Figure 6. Analysis of the previous and following conditions from the fire occurrence.

Otro punto importante de análisis es la relación clima-frecuencia de incendios; esta se determina con la subrutina *Superposed Epoch Analysis* (SEA) del programa FHX2 (Grissino-Mayer, 2001). El SEA se usa para probar la significancia estadística de las asociaciones entre acontecimientos climáticos extremos y la presencia de incendios. La significancia estadística se determina mediante una prueba de aleatorización; tal análisis no se basa en los supuestos habituales (normalidad, homogeneidad de varianza, independencia de las observaciones) de las pruebas paramétricas, por lo que se utiliza cuando los análisis de regresión, correlación o una prueba de *t* no son aplicables. Para ello, se consideran parámetros meteorológicos y los datos de registro de incendios. Los resultados permiten conocer las condiciones climáticas previas, durante y posteriores al siniestro.

En la Figura 6 se aprecian los resultados para una fácil interpretación. El valor de 1 en el eje de las Y representa el valor promedio del clima; cuando sus valores de años previos al incendio superan la media, se interpretan como húmedos y, en caso contrario, si son menores a la media indican condiciones secas. El año (0) sobre el eje de las X se refiere a la ocurrencia del incendio, los valores negativos a los años anteriores al mismo; y los positivos son los dos años posteriores a la ocurrencia del incendio.

used when regression analysis, correlation or the *t* test are not applicable. For this, meteorological parameters and fire record data are used. Results provide insight into climatic conditions prior, during and after the event.

In Figure 6 the results for easy interpretation is appreciated. The value of 1 on the y-axis represents the average value of the climate, when their values prior to fire years below average, which were interpreted as moist, otherwise if less than average indicate dry conditions. The year (0) on the x-axis refers to the occurrence of fire and the negative values to the previous years of it; and the positive are the two years after the occurrence of the fire.

In general, the information from these analyzes makes it possible to evaluate and relate fire frequency to the factors that influence its existence, providing elements that facilitate decision making and implementation of management programs and fire prevention (Cerano *et al.*, 2009).

Applications for management: reconstructing fire regimes

Historically, fire has been part of the evolution of most terrestrial ecosystems (Bowman *et al.*, 2009). However, humans have altered fire regimes since the beginning and the last decades

En general, la información derivada de estos análisis hace posible evaluar y relacionar la frecuencia de incendios con los factores que influyen en su existencia, lo que proporciona elementos que facilitan la toma de decisiones y ejecución de programas de manejo y prevención de incendios (Cerano *et al.*, 2009).

Aplicaciones para el manejo: reconstrucción de regímenes de fuego

Históricamente, el fuego ha formado parte de la evolución de la mayoría de los ecosistemas terrestres (Bowman *et al.*, 2009). No obstante, los humanos han alterado los regímenes de fuego desde sus inicios y las últimas décadas se han caracterizado por vertiginosos cambios en ellos, como consecuencia de las variaciones significativas en la población, en particular con respecto a su crecimiento, factores socioeconómicos y el manejo de tierras (Pausas y Keeley, 2009). Algunos cambios han llevado al desarrollo de investigaciones sobre la ecología del fuego, las cuales no solo han propiciado estrategias de manejo y uso del fuego en la prevención y combate de incendios, sino que también han servido para aceptar a este factor como un proceso ecológico e integrarlo en programas de restauración y conservación ambiental (Conedera *et al.*, 2009).

En este contexto, una de las técnicas que ha contribuido significativamente al entendimiento del papel del fuego en los ecosistemas es la dendrocronopirología, que destaca la importancia de la reconstrucción del historial de incendios como una valiosa fuente de información para la caracterización y estudio de las variables que componen un régimen de fuego. Con ella es factible relacionar las variables ecológicas que influyen en el comportamiento del fuego y su repercusión en los ecosistemas (Touchan y Hughes, 2000; Grissino-Mayer, 2005).

Los estudios de Williams y Baker (2012), al respecto, parten de la hipótesis de que los incendios actuales se comportan de manera diferente a cualquier otra época en la historia y su principal objetivo consiste en determinar las causas que han originado las modificaciones en su comportamiento, y estimar sus consecuencias ecológicas. Sus resultados evidencian que las principales causas de cambio en la frecuencia y severidad de los incendios se deben, principalmente, a los cambios de uso de suelo, desarrollo de infraestructura, políticas de supresión y variaciones de temperatura y precipitación asociadas al cambio climático. Lo que ha derivado en alteraciones significativas en los patrones y procesos de los ecosistemas, en la estructura y composición, así como en la resiliencia de los mismos (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Brown *et al.*, 2008; Nowacki y Abrams, 2008; González *et al.*, 2008; Rodríguez, 2008; Brown, 2010; Yocom *et al.*, 2010; Fulé *et al.*, 2011; Williams y Baker, 2012).

Las variaciones en los componentes de los regímenes de fuego, actualmente, son definidas con base en el nivel de

have been characterized by rapid changes in them, due to the significant variations in the population, particularly with respect to growth, socio-economic factors and land management (Pausas and Keeley, 2009). Some changes have led to the development of research on fire ecology, which have not only led to the management strategies and use of fire prevention and firefighting, but have also served to accept this factor as an ecological process and include it into restoration programs and environmental conservation (Conedera *et al.*, 2009).

In this context, one of the techniques that have contributed significantly to understand the role of fire in ecosystems is dendrochronopyrology, as it highlights the importance of the reconstruction of fire history as a valuable source of information for the characterization and study of the variables that make up a fire regime. With it, it is possible to relate the ecological variables that influence fire behavior and its impact on ecosystems (Touchan and Hughes, 2000; Grissino-Mayer, 2005).

The studies of Williams and Baker (2012) in this regard based on the assumption that the fires are behaving differently than any other time in history and its main objective was to determine the causes that have led to changes in behavior, and estimate their ecological consequences. Their results show that the main causes of changes in the frequency and severity of fires are mainly due to changes in land use, infrastructure development, political suppression and changes in temperature and precipitation associated with climate change. What has led to significant changes in the patterns and ecosystem processes in the structure and composition as well as the resilience of these (Heyerdahl and Alvarado, 2003; Brown *et al.*, 2008; Nowacki and Abrams, 2008; González *et al.*, 2008; Rodríguez, 2008, Brown, 2010; Yocom *et al.*, 2010; Fulé *et al.*, 2011; Williams and Baker, 2012).

Variations in the components of fire regimes currently are defined according to the level of change of each of the key attributes that comprise it (frequency, intensity, severity, seasonality, extent) (TNC, 2004). So, now, the concept of fire regime is a description of the ecological role this has on ecosystems (Bond and Keeley, 2005).

To comprehend fire regimes makes it possible to know and understand the patterns and ecological processes, since the distribution, diversity, structure and composition of ecosystems are not only determined by climate and soil, but also by historical regimes disturbances (TNC, 2004; Bond and Keeley, 2005; González, 2005). Therefore, the variability in the rate of forest fires should be regarded as a key aspect in management programs of fire, for their impact on conservation and environmental stability (Fulé *et al.*, 2005; Fulé *et al.*, 2011; Touchan *et al.*, 2012). Thus, the responsible use of fire requires an understanding not only of the handler on how to apply this tool to achieve management objectives, but also to recognize the side effects it produces (Moser and Wade, 2005).

cambio de cada uno de los atributos clave que lo integran (frecuencia, intensidad, severidad, estacionalidad, extensión) (TNC, 2004). Por lo que, ahora, el concepto de régimen de fuego es una descripción del papel ecológico que este tiene en los ecosistemas (Bond y Keeley, 2005).

La comprensión de los regímenes de fuego posibilita conocer y entender los patrones y procesos ecológicos, ya que la distribución, diversidad, estructura y composición de los ecosistemas no solo están determinados por el clima y el suelo, sino también por los regímenes históricos de los disturbios (TNC, 2004; Bond y Keeley, 2005; González, 2005). Es por ello, que la variabilidad en el régimen de los incendios forestales debe ser considerada como aspecto clave en los programas de manejo de fuego, por su impacto en la conservación y estabilidad ambiental (Fulé *et al.*, 2005; Fulé *et al.*, 2011; Touchan *et al.*, 2012). Por consiguiente, el uso responsable del fuego no solo requiere del entendimiento del operador en cómo aplicar esta herramienta para alcanzar objetivos de manejo, sino también en reconocer los efectos secundarios que produce (Moser y Wade, 2005).

Entender los cambios en los patrones de ocurrencia de incendios y la implicación de esas variaciones en la dinámica de los ecosistemas forestales constituye el primer paso para considerar al fuego como un instrumento básico para su manejo y conservación. Su comprensión provee bases para completar el diseño de soluciones socialmente aceptables y, desde el punto de vista ecológico, viables para atender los problemas de manejo y conservación asociados a la de los eventos de fuego (González, 2005; Brown, 2010).

La aplicación de las técnicas dendrocronológicas en el estudio de disturbios asociados con el fuego brinda la posibilidad de conocer la dinámica sucesional de los ecosistemas, con una perspectiva sobre los procesos evolutivos, y proporciona elementos para el desarrollo de estrategias eficaces de manejo y conservación. Por tal motivo, el conocimiento de los cambios en los regímenes de fuego en los ecosistemas trasciende como un punto importante al considerar los programas de las agencias encargadas del manejo y administración de los recursos naturales.

En México, las políticas públicas han comenzado a incluir este tema para la elaboración de los programas de manejo; un ejemplo es la Estrategia Nacional de Manejo del Fuego de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp, 2011). Sin embargo aún hace falta desarrollar estudios sobre los efectos del fuego en los ecosistemas del país. 🍂

REFERENCIAS

Agee, J. K. 1993. Fire ecology of the Pacific Northwest Forest. Island Press, Co. Washington, DC. USA. 477 p.

Understanding the changes in the patterns of fire occurrence and the implication of these changes in the dynamics of forest ecosystems is the first step to consider fire as a basic tool for the management and conservation of ecosystems. Its comprehension provides the basis to complete the design of socially acceptable solutions and from ecologically viable view to address the problems of management and conservation, associated with fire events (González, 2005; Brown, 2010).

The application of dendrochronological techniques in the study of disturbances associated with fire provides the possibility to know the successional ecosystem dynamics, with a perspective on evolutionary processes, and provides elements for the development of effective management and conservation strategies. Therefore, knowledge of changes in fire regimes in ecosystems goes beyond as an important point when considering programs of natural resource administration.

Public policies in Mexico have begun to include this issue in management programs; one example is the National Fire Management Strategy of the National Commission of Natural Protected Areas (Conanp, 2011). But, still there is a need to develop studies on the effects of fire on ecosystems of the country. 🍂

End of the English version



Arno, S. F. and K. M. Sneek. 1977. A method for determining fire history in coniferous forest of the mountain west. USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station. GTR-INT-42. Ogden, UT. USA. 35 p.

- Bergeron, Y., A. Leduc, B. D. Harvey and S. Gauthier. 2002. Natural fire regime; a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. *Silva Fenica* 36(1):81-95.
- Bond, W. J., F. I. Woodward and G. F. Midgley. 2004. The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytol.* 165: 525-538.
- Bond, W. J. and J. E. Keeley. 2005. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends Ecol. Evol.* 20(7):387-394.
- Bowman, D. M. J. S., J. K. Balch, P. Artaxo, W. J. Bond, J. M. Carlson, M. A. Cochrane, C. M. D'Antonio, R. S. De Fries, J. C. Doyle, S. P. Harrison, F. H. Johnston, J. E. Keeley, M. A. Krawchuk, C. A. Kull, J. B. Marston, M. A. Moritz, I. C. Prentice, C. I. Roos, A. C. Scott, T. W. Swetnam, G. R. van der Werf and S. J. Pyne. 2009. Fire in the earth system. *Science* 324: 481-484.
- Brown, P. M., E. K. Heyerdahl, S. G. Kitchen and M. H. Weber. 2008. Climate effects on historical fires (1630-1900) in Utah. *Int. J. Wildland* 17: 28-39.
- Brown, P. M. 2010. Wildfire risk and ecological restoration in mixed-severity fire regimes. In: Stoffel, M., M. Bollschweiler, D. R. Butler and B. H. Luckman (eds.). *Tree rings and natural hazards: a state-of-the-art, advances in global change research.* Springer. New York, NY, USA. pp. 361-363.
- Caldaro, N. 2002. Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology. *Science Total Environ.* 292 (3): 141-165.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., P. Z. Fulé, P. M. Brown, L. L. Yocom, V. Constante G. y J. Estrada A. 2009. Interpretación del historial de incendios en bosques mixtos de coníferas. Folleto Técnico No. 15. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. 59 p.
- Cerano P., J., J. Villanueva D. y P. Z. Fulé. 2010. Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la reserva Cerro El Mohinora, Chihuahua. *Rev. Mex. Cien. For.* 1(1): 63-74.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2011. Estrategia y Lineamientos de Manejo de Fuego en Áreas Naturales Protegidas. http://www.conanp.gob.mx/css/imagenes/estrategia_de_fuego.pdf. (septiembre de 2013).
- Conedera, M., W. Tinner, C. Neff, M. Meurer, A. F. Dickens and P. Krebs. 2009. Reconstructing past fire regimes: methods, applications and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Sci. Rev.* 28: 555-576.
- Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P. and J. Estrada A. 2009. Medición y calidad de fechado en anillos de árboles. Folleto técnico No. 14. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. 48 p.
- Fulé, P. Z., J. Villanueva D. and M. Ramos G. 2005. Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. *Can. J. Forest Res.* 35:320-330.
- Fulé, P. Z., M. Ramos G., C. Cortés M. and A. M. Miller. 2011. Fire regime in a Mexican forest under indigenous resource management. *Ecol. Appl.* 21(3): 764-775.
- Gauthier, S., T. X. Nguyen, Y. Bergeron, A. Leduc, P. Drapeau and P. Grondin. 2004. Developing forest management strategies based on fire regimes in northwestern Quebec, Canada. In Perera, A. H., L. J. Buse and M.G. Weber (eds.). *Emulating natural forest landscape disturbances: Concepts and Applications.* Columbia University Press, New York, NY, USA, pp. 219-229.
- González, M. A. 2005. Fire history data as reference information in ecological restoration. *Dendrochronologia* 22: 149-154.
- González T., M. A., L. Schwendenmann, J. Jiménez and W. Himmelsbach. 2007. Reconstrucción del historial de incendios y estructura forestal en bosques mixtos de pino encino en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 13(2):51-63.
- González T., M. A., L. Schwendenmann, J. Jiménez P. and R. Schulz. 2008. Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine-oak forest in the Oriental Sierra Madre Northeast Mexico. *Forest Ecol. Manag.* 256: 161-167.
- Gutiérrez M., E. 2008. La dendrocronología: métodos y aplicaciones. In: Nieto, X. y M. A. Cau (eds.). *Arqueología náutica mediterránea.* Barcelona, España. pp. 303-315.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. FHX2-software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research* 57: 115-124.
- Grissino-Mayer, H. D. 2005. The ultimate tree-ring web pages. <http://web.utk.edu/~grissino/references.htm> (septiembre de 2012).
- Heyerdahl, E. K. and V. Card. 2000. Implications of paleorecords for ecosystem management. *Trends Ecol. Evol.* 15: 49-50.
- Heyerdahl, E. K. and E. Alvarado. 2003. Influence of climate and land use on historical surface fires in pine-oak forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. In: Veblen, T. T., W. L. Baker, G. Montenegro and T. W. Swetnam (eds.). *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas.* Springer-Verlag. New York, NY, USA. pp. 196-217.
- Kaufmann, M. R., T. T. Veblen and W. H. Romme. 2006. Historical fire regimes in ponderosa pine forests of the Colorado Front Range and recommendations for ecological restoration and fuels management. *Front Range Fuels Treatment Partnership Roundtable, findings of the Ecology Workgroup.* www.frftp.org/roundtable/pipo.pdf. (septiembre de 2013).
- Lloret, F. 2004. Régimen de incendios y regeneración. In: Valladares, F. (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante.* Ministerio de Medio Ambiente- EGRAF, S. A., Madrid, España. pp. 101-126.
- Marques, S., J. G. Borges, J. García-Gonzalo, F. Moreira, J. M. B. Carreira, M. M. Oliveira, A. Cantarinha, B. Botequim and J. M. C. Pereira. 2011. Characterization of wildfires in Portugal. *Eur. J. Forest. Res.* 130: 775-784.
- McBride, J. R. 1983. Analysis of tree rings and fire scars to establish fire history. *Tree-Ring Bulletin* 43: 51-67.
- Moser, W. K. and D. D. Wade. 2005. Fire exclusion as a disturbance in the temperate forest of the USA: example from longleaf pine forest. *Scand. J. of Forest Res.* 20(6): 17-26.
- Nowacki, G. J. and M. D. Abrams. 2008. The demise of fire and "mesophication" of forests in the Eastern United States. *BioScience* 58(2): 123-138.
- Pausas, J. G. and J. E. Keeley. 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. *BioScience* 59(7): 593-601.
- Rodríguez, T. D. and P. Z. Fulé. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire.* 12: 23-37.
- Rodríguez, D. A. 2008. Fire regimes, fire ecology, and fire management in Mexico. *Journal of the Human Environment* 37(7):548-556.
- Schoennagel, T., R. L. Sherriff and T. T. Veblen. 2011. Fire history and tree recruitment in the Colorado Front Range upper montane zone: implications for forest restoration. *Ecol. Appl.* 21(6): 2210-2222.
- Scott, A. C., J. Moore and B. Brayshay. 2000. Introduction to fire and the palaeoenvironment. *Palaeogeogr.-Palaeoecol.* 164: 7-11.
- Stephens, S. L., N. Skinner and J. Gill. 2003. Dendrochronology-based fire history of Jeffrey pine-mixed conifer in the Sierra San Pedro Martir, Mexico. *Can. J. For. Res.* 33(6):1090-1101.
- Stephens, S. and L. Ruth. 2005. Federal forest fire policy in the United States. *Ecol. Appl.* 15(2):532-542.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. *An introduction to tree-ring dating.* University of Chicago Press, Chicago, IL, USA. 73 p.
- Swetnam, T. W. and C. H. Baisan. 2003. Tree-ring reconstructions of fire and climate history in the Sierra Nevada and Southwestern United States. In: Veblen, T. T., W. L. Baker, G. Montenegro and T. W. Swetnam (eds.). *Fire and climate change in temperate ecosystems of the Western Americas.* Ecological Studies. Springer. New York, NY, USA. pp. 158-195.
- The Nature Conservancy (TNC). 2004. *Fire, ecosystems and people.* The Nature Conservancy, Tallahassee, FL, USA. 9 p. <http://nature.org/initiatives/fire/science>. (septiembre de 2013).
- Touchan, R. and M. Hughes. 2000. The role of dendrochronology in natural resource management. *USDA Forest Service Proceedings RMRS.* Tucson, AZ, USA. p. 13.
- Touchan, R., C. Baisan, I. D. Mitsopoulos and A. P. Dimitrakopoulos. 2012. Fire history in European black pine (*Pinus nigra* Arn.) Forests of the Valia Kalda, Pindus Mountains, Greece. *Tree-Ring Research* 68(1): 45-50.
- Yocom, L. L., P. Z. Fulé, P. M. Brown, J. N. Cerano, J. Villanueva D., D. A. Falk and E. Cornejo O. 2010. El Niño-Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 91(6): 1660-1671.
- Williams, A. M. and W. L. Baker. 2012. Spatially extensive reconstructions show variable-severity fire and heterogeneous structure in historical western United States dry forests. *Global Ecol. Biogeogr.* 21: 1042-1052.