

## The role of fire in the regeneration of conifer forests

### El papel del fuego en la regeneración de los bosques de coníferas

Jesús Eduardo Sáenz-Ceja<sup>1\*</sup> & Diego R. Pérez-Salicrup<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias Biológicas. Edificio D, 1.º piso, Circuito de Posgrados, Ciudad Universitaria. C. P. 04510. Coyoacán, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Antigua Carretera a Pátzcuaro, núm. 8701, col. Ex Hacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

\*Corresponding author: [jsaenz@cieco.unam.mx](mailto:jsaenz@cieco.unam.mx); tel.: +52 (443) 322 2777 ext. 42536

#### Abstract

Fire is a forest disturbance agent whose effects vary according to the natural fire regime, under which the species that inhabit it evolved. The aim of this paper is to present an overview of the role of fire in the regeneration of conifer forests. First, we review fire regimes and their effects on tree regeneration. Then, we describe the main methods for reconstructing fire regimes and explore montane tropical conifer forest fire regimes. Finally, the possible effect of timber harvesting on fire regimes is described. It has been suggested that this activity is currently the disturbance agent that has the greatest impact on fires regimes worldwide. In this review article, we propose that understanding the role of fire in the regeneration of conifer forests is essential to prevent catastrophic fires and that the use of this element as a forest management tool can contribute to the conservation of the integrity of these forests.

**Keywords:** Fire management; fire regime; timber harvesting; fire reconstruction; disturbance agents.

#### Resumen

El fuego es un agente de disturbio para los bosques, cuyos efectos varían de acuerdo con el régimen natural de fuegos en el que las especies que ahí habitan evolucionaron. El objetivo de este documento es exponer un panorama sobre el papel del fuego en la regeneración de los bosques de coníferas. Primeramente, se hace una revisión sobre el régimen de fuegos y sus efectos sobre la regeneración arbórea. Posteriormente, se describen los principales métodos de reconstrucción de los regímenes del fuego y se exploran los regímenes de bosques de coníferas tropicales montanos. Por último, se describe el posible efecto del aprovechamiento maderable sobre los regímenes del fuego. Se ha planteado que esta actividad es, actualmente, el agente de disturbio que ejerce mayor impacto sobre los regímenes de fuego a nivel mundial. En este artículo de revisión proponemos que el entendimiento del papel del fuego sobre la regeneración de los bosques de coníferas es fundamental para prevenir fuegos catastróficos y que el empleo de dicho elemento como herramienta de manejo forestal puede contribuir a la conservación de la integridad de estos bosques.

**Palabras clave:** Manejo del fuego; régimen de fuegos; aprovechamiento maderable; reconstrucción del fuego; agentes de disturbio.

## Introduction

Fire is a fundamental ecosystem process for the regeneration of conifer forests (Frelich, 2002); however, at a global level, forest fires have been considered a source of degradation of these forests (Biro, 2009). During the twentieth century, a policy of fighting and suppressing fires prevailed, especially in North America and Europe. This policy contributed to a higher incidence of catastrophic fires, resulting in the degradation of thousands of hectares, alteration of tree regeneration patterns, considerable economic costs and human losses (Morgan, Defossé, & Rodríguez, 2003). In this sense, it is essential to document the natural fire regime and its changes and effects on tree regeneration, in order to make decisions that ensure the integrity of forest ecosystems (Brown, 2006). As a result, direct and indirect techniques have been developed to reconstruct the spatio-temporal dynamics of fire, including dendrochronological, paleoecological and cartographic techniques, use of logbooks and interviews with forest managers (Yocom, 2014).

It is important to recognize that there is great variation in fire regimes in conifer forests (Fulé & Laughlin, 2007); for example, in montane tropical conifer forests, such as those distributed in the Transmexican Volcanic System and Sierra Madre del Sur, regimes vary according to elevation and differ from those documented in boreal and southern zones (Myers & Rodríguez-Trejo, 2009). On the other hand, fire regimes may vary due to the interaction of natural and anthropogenic disturbances (Buma, 2015); among the latter, timber harvesting is considered to have caused the greatest impact on fire dynamics and tree regeneration (Frelich, 2002).

The aim of this paper is to present an overview of the role of fire in the regeneration of conifer forests. First, a review of the fire regime and its effects on tree regeneration is made. Subsequently, the main methods of reconstructing fire regimes are described and regimes proposed for montane tropical conifer forests are explored. Finally, the possible effect of timber harvesting on fire regimes is described. Lack of understanding of fire dynamics in forest ecosystems and its relationship to tree regeneration could lead to adverse long-term consequences, especially when natural dynamics are altered by human activities. Therefore, through this paper, it is proposed that understanding the role of fire in the regeneration of conifer forests is essential to prevent catastrophic fires and that the use of this element as a forest management tool can contribute to the conservation of the integrity of these forests.

### Fire regime

Conifer forests experience disturbances; that is, discrete events in time and space that modify environmental

## Introducción

El fuego es un proceso ecosistémico fundamental para la regeneración de los bosques de coníferas (Frelich, 2002); no obstante, a nivel mundial, los incendios forestales se han considerado una fuente de degradación de estos bosques (Biro, 2009). Durante el siglo XX imperó una política de combate y supresión de fuegos, especialmente en Norteamérica y Europa. Esta política contribuyó a generar mayor incidencia de fuegos catastróficos, dando como resultado la degradación de miles de hectáreas, alteración de los patrones de regeneración arbórea, costos económicos considerables y pérdidas humanas (Morgan, Defossé, & Rodríguez, 2003). En este sentido, es fundamental documentar el régimen natural de fuegos, sus cambios y efectos sobre la regeneración arbórea, para tomar decisiones que aseguren la integridad de los ecosistemas forestales (Brown, 2006). Debido a ello, se han desarrollado técnicas directas e indirectas para reconstruir la dinámica espacio-temporal del fuego, entre las que destacan técnicas dendrocronológicas, paleoecológicas, cartográficas, uso de bitácoras y entrevistas con manejadores del bosque (Yocom, 2014).

Es importante reconocer que existe gran variación en los regímenes del fuego en los bosques de coníferas (Fulé & Laughlin, 2007); por ejemplo, en bosques de coníferas tropicales montañosos, como los que se distribuyen en el Sistema Volcánico Transmexicano y Sierra Madre del Sur, los regímenes varían según la altitud y difieren de los documentados en zonas boreales y australes (Myers & Rodríguez-Trejo, 2009). Por otro lado, el régimen de fuegos puede variar por la interacción de disturbios naturales y antropogénicos (Buma, 2015); entre estos últimos, se considera que el aprovechamiento maderable ha causado el mayor impacto sobre la dinámica de fuegos y la regeneración arbórea (Frelich, 2002).

El objetivo de este texto es exponer un panorama sobre el papel del fuego en la regeneración de los bosques de coníferas. En primer lugar, se hace una revisión sobre el régimen de fuegos y sus efectos sobre la regeneración arbórea. Posteriormente, se describen los principales métodos de reconstrucción de los regímenes del fuego y se exploran los regímenes propuestos para bosques de coníferas tropicales montañosos. Por último, se describe el posible efecto del aprovechamiento maderable sobre los regímenes del fuego. El desconocimiento de la dinámica de fuegos en ecosistemas forestales y su relación con la regeneración arbórea podría generar consecuencias adversas a largo plazo, especialmente cuando la dinámica natural es alterada por las actividades humanas. Por ello, a través de este artículo, se propone que el entendimiento del papel del fuego sobre la regeneración de los bosques de coníferas es fundamental para prevenir fuegos catastróficos y que

conditions, the availability of resources, and the structure of populations, communities, ecosystems, and landscapes. The origin of disturbances may be exogenous or endogenous, natural or anthropogenic (Brown, 2013). Among the most commonly reported disturbances are fires, pests, diseases, winter storms, landslides, floods, droughts and windstorms (Timoney, 2003). Of these, fire is considered the most important natural disturbance agent affecting the regeneration, structure and functioning of conifer forests (Frelich, 2002).

A fire regime is defined as the spatio-temporal integration of individual fire events according to their spatial and temporal attributes, magnitude, type of fire, synergy with other disturbances, and biotic and abiotic controls (Brown, 2013; Conedera et al., 2009) (Table 1). The fire regime can be characterized as: 1) natural, under which species evolved through geological time scales; 2) historical, under which ecosystems have been subject since humans began to use fire, and 3) current, the one governing forests in the present time (Jardel-Peláez, Pérez-Salicrup, Alvarado, & Morfín-Ríos, 2014). Globally, two main fire regimes have been identified that contrast in conifer forests: 1) surface fires, frequent, of low severity and intensity, and characteristic of forests dominated by *Pinus* sp. and *Juniperus* sp., and 2) active or passive crown fires, infrequent, of high severity and intensity, generally present in forests of *Abies* sp. and *Picea* sp. (Brown & Smith, 2000; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003).

### Natural fire regime and its effects

Conifers have developed mechanisms to ensure their regeneration depending on the fire regimes under which they have evolved (Figure 1A). At the species level, in forests that experience frequent fires, it is common to find trees with thick exfoliating bark that allows them to withstand fire damage (Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). Some species such as *Pinus palustris* Miller or *Pinus devoniana* Lindley present a cespitose stage during the seedling stage, which allows them to develop a deep root while the stem is protected in case of a mild fire (Nelson, Weng, Kubisiak, Stine, & Brown, 2003). By contrast, in places where fires are more severe, species such as *Pinus halepensis* Miller and *Pinus contorta* Douglas ex Loudon produce serotinous cones that open when exposed to the heat of the fire, in such a way that, in the clearings generated, their seeds are the first to germinate and establish (Keeley, 2012). Likewise, *Abies* sp. cones disintegrate releasing a rain of seeds that, potentially, germinate in the clearings formed by stand-replacing fires (Cremer et al., 2012). Other adaptive traits in *Abies* sp. are microphyllous leaves, volatile compounds and retention of dry leaves and branches, which increase the flammability of fuels and generate highly severe fires (Keeley, 2012).

el empleo de dicho elemento como herramienta de manejo forestal puede contribuir a la conservación de la integridad de estos bosques.

### El régimen de fuegos

Los bosques de coníferas experimentan disturbios; es decir, eventos discretos en el tiempo y espacio que modifican las condiciones ambientales, la disponibilidad de recursos y la estructura de poblaciones, comunidades, ecosistemas y paisajes. El origen de los disturbios puede ser exógeno o endógeno, por causas naturales o antropogénicas (Brown, 2013). Entre los comúnmente reportados destacan fuegos, plagas, enfermedades, tormentas invernales, deslizamientos, inundaciones, sequías y ventarrones (Timoney, 2003). De estos, el fuego es considerado el agente de disturbio natural más importante que incide sobre la regeneración, estructura y funcionamiento de los bosques de coníferas (Frelich, 2002).

El régimen de fuegos se define como la integración espacio-temporal de los eventos individuales de fuego en función de sus atributos espaciales y temporales, magnitud, tipo de fuegos, sinergia con otros disturbios, y controles bióticos y abióticos (Brown, 2013; Conedera et al., 2009) (Cuadro 1). El régimen de fuegos puede caracterizarse como: 1) natural, bajo el cual las especies evolucionaron a través de escalas de tiempo geológico; 2) histórico, bajo el cual los ecosistemas han estado sujetos desde que el ser humano comenzó a utilizar el fuego; y 3) actual, el que rige sobre los bosques en el tiempo presente (Jardel-Peláez, Pérez-Salicrup, Alvarado, & Morfín-Ríos, 2014). A nivel global, se han identificado dos regímenes principales del fuego que contrastan en los bosques de coníferas: 1) fuegos superficiales, frecuentes, de baja severidad e intensidad, y característicos de bosques dominados por *Pinus* sp. y *Juniperus* sp., y 2) fuegos de copa activos o pasivos, poco frecuentes, de alta severidad e intensidad, generalmente presentes en bosques de *Abies* sp. y *Picea* sp. (Brown & Smith, 2000; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003).

### Régimen natural de fuegos y sus efectos

Las coníferas han desarrollado mecanismos para asegurar su regeneración dependiendo de los regímenes del fuego bajo los cuales han evolucionado (Figura 1A). A nivel de las especies, en los bosques que experimentan fuegos frecuentes es común encontrar árboles con corteza gruesa y exfoliante que les permite resistir el daño ocasionado por el fuego (Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). Algunas especies como *Pinus palustris* Miller o *Pinus devoniana* Lindley presentan estado cespitoso durante el estadio de plántula, el cual les permite desarrollar una raíz profunda mientras que el tallo se encuentra protegido en caso de un fuego poco severo (Nelson, Weng, Kubisiak, Stine, & Brown, 2003). En contraste,

**Table 1. Fire regime properties.****Cuadro 1. Propiedades de los regímenes del fuego.**

Attributes/Atributos	Description/Descripción
Spatial/Espaciales	
Extent/Extensión	Average area affected by disturbances/ Superficie promedio afectada por los disturbios
Shape/Forma	Geometric shape of the formed clearings (oval, circular or amorphous)/ Forma geométrica de los claros formados (oval, circular o amorfa)
Spatial distribution/ Distribución espacial	Spatial arrangement of formed clearings (uniform or aggregate)/ Ordenación espacial de los claros formados (uniforme o agregada)
Temporal/Temporales	
Frequency/Frecuencia	Average number of events per unit of time/ Número promedio de eventos por unidad de tiempo
Duration/Duración	Average time from start to end of events/ Tiempo promedio desde el inicio hasta el final de los eventos
Return interval/ Intervalo de retorno	Average time between events/ Tiempo promedio entre eventos
Predictability/Predictibilidad	Return interval variance/Varianza del intervalo de retorno
Seasonality/Estacionalidad	Period of the year in which most events occur/ Periodo del año en que ocurre la mayoría de los eventos
Magnitude/Magnitud	
Intensity/ Intensidad	Average energy released by events/Energía promedio liberada por los eventos
Severity/Severidad	Degree of damage to the ecosystem (mortality and fallen trees)/ Grado de afectación al ecosistema (mortalidad y árboles caídos)
Type of fire/Tipo de fuego	
Underground/Subterráneo	Fire consumes the organic matter in the soil and spreads through the roots of trees/ El fuego consume la materia orgánica del suelo y se propaga por las raíces de los árboles
Surface/Superficial	Fire spreads horizontally over the ground and consumes shrub and herbaceous material, as well as juvenile trees/ El fuego se propaga de forma horizontal sobre el suelo y consume material arbustivo, herbáceo y árboles juveniles
Crown/De copa	Fire spreads vertically, between crowns of adult trees (active) or induces ignition of nearby tree crowns (passive)/ El fuego se propaga de forma vertical, entre copas de árboles adultos (activo) o induce la ignición de las copas de árboles cercanos (pasivo)
Synergies/Sinergias	Effect of a disturbance that influences the occurrence of others/ Efecto de un disturbio que incide en la ocurrencia de otros
Biotic controls/Controles bióticos	
Biomass production/ Producción de biomasa	Primary productivity and vegetation type/ Productividad primaria y tipo de vegetación
Fuel loads/ Cargas de combustible	Quantity, flammability, connectivity and compaction of dry material/ Cantidad, flamabilidad, conectividad y compactación de material seco
Abiotic controls/Controles abióticos	
Weather/Clima	Humidity, wind speed, cloud cover, precipitation and temperature/ Humedad, velocidad del viento, nubosidad, precipitación y temperatura
Sources of ignition/ Fuentes de ignición	Natural (lightning) and human (agricultural burning, careless or deliberate)/ Naturales (relámpagos) y humanas (quemadas agrícolas, por descuido o deliberados)

At the population level, two establishment patterns can be characterized (Figure 1B). First, in sites that experience frequent fires of low severity and intensity, seedling establishment is continuous, and the population structure is composed of individuals of different age categories (Brown, 2006). By contrast, in places that experience infrequent fires of moderate to high severity and intensity, seedling establishment occurs synchronously or by pulses; that is, discrete and massive establishment events during short periods following stand-replacing fires. In this case, stand individuals show little age variation (Flaver, Jonnson, Jönsson, & Esseen, 2008).

The composition, structure and dominance of tree communities also depends on fire magnitude and frequency. First, following the intermediate disturbance hypothesis (Svensson et al., 2007), the number of tree species and, in general, spatial heterogeneity are greater in sites with a mixed fire regime; that is, with fragments subject to small-area, low-severity, low-intensity fires and, in turn, with fragments subject to stand-replacing fires. This allows the coexistence of diverse tree species, contrary to the few species that dominate in sites with contrasting fire regimes (Kaufmann, Huckaby, Fornwalt, Stoker, & Romme, 2003). Second, the magnitude and frequency of fires affect ecological succession patterns and allow the coexistence of dominant tree species (Figure 1C). For example, the mixed forests of *Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson (pioneer species) and *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco (late species) are considered a successional stage, which is maintained by frequent surface fires that allow the co-dominance of both species (Sherriff & Veblen, 2006). Third, conifer regeneration is mediated by both fire and biotic interactions; for example, the nursing (facilitation) exerted by *Populus tremuloides* Michx (pioneer species) on *Abies lasiocarpa* (Hooker) Nuttall (late species) after severe fires, as it provides protection and shade to sunshine-intolerant *A. lasiocarpa* seedlings (Calder & St. Clair, 2012).

There is also a relationship between the fire regime and the incidence of other disturbances (Figure 1D). For example, after strong winds, such as hurricanes or winter storms, a large number of trees fall and this increases the fuel load that induces high-magnitude fires during dry years (Buma, 2015). Similarly, the likelihood of bark insect infestation may increase in remaining trees weakened by fires of moderate severity and intensity; in turn, the death of infested trees increases the fuel load, generating high-magnitude fires (Pelz & Smith, 2012).

### Alteration of fire regime and effects on conifer forests

Fire regimes can be modified by the direct or indirect action of biophysical factors (climate variability,

en sitios donde los fuegos son más severos, especies como *Pinus halepensis* Miller y *Pinus contorta* Douglas ex Loudon producen estróbilos serótimos que abren cuando se exponen al calor del fuego, de tal forma que, en los claros generados, sus semillas son las primeras en germinar y establecerse (Keeley, 2012). Asimismo, los estróbilos de *Abies* sp. se desintegran liberando una lluvia de semillas que, potencialmente, germinan en los claros formados por fuegos de reemplazo del rodal (Cremer et al., 2012). Otros rasgos adaptativos en *Abies* sp. son hojas micrófilas, compuestos volátiles y retención de hojas y ramas secas, que aumentan la flamabilidad de combustibles y generan fuegos de alta severidad (Keeley, 2012).

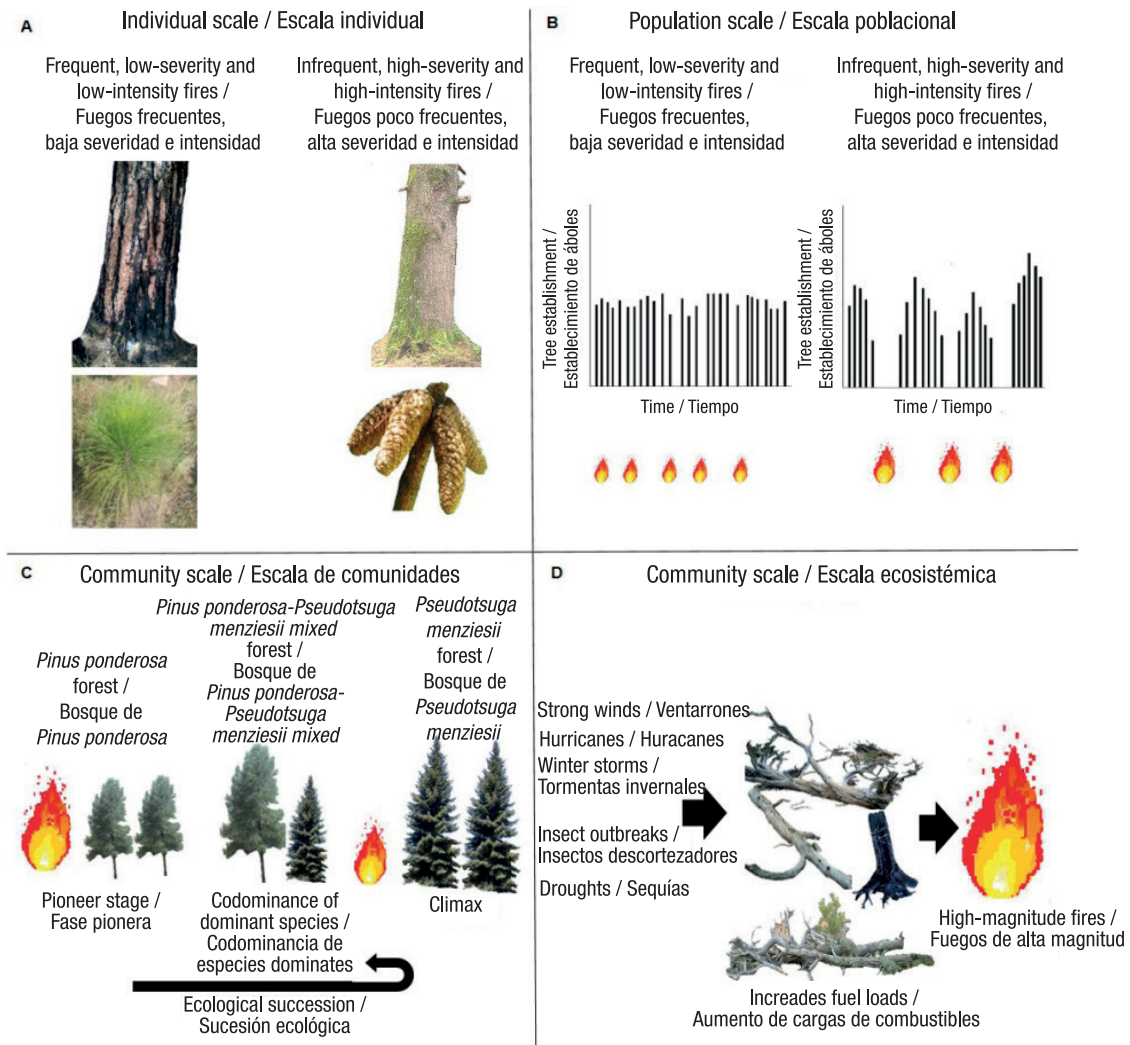
A nivel poblacional se pueden caracterizar dos patrones de establecimiento (Figura 1B). En primer lugar, en sitios que experimentan fuegos frecuentes y de baja severidad e intensidad, el establecimiento de plántulas es continuo y la estructura poblacional se compone por individuos de diferentes categorías de edad (Brown, 2006). En contraste, en lugares que experimentan fuegos poco frecuentes, de moderada a alta severidad e intensidad, el establecimiento de plántulas ocurre de modo sincrónico o por pulsos; es decir, eventos discretos y masivos de establecimiento durante periodos cortos, posterior a los fuegos de reemplazo del rodal. En este caso, los individuos de los rodales presentan poca variación en su edad (Flaver, Jonnson, Jönsson, & Esseen, 2008).

La composición, estructura y dominancia de las comunidades arbóreas también depende de la magnitud y la frecuencia de fuegos. En primer lugar, siguiendo la hipótesis del disturbio intermedio (Svensson et al., 2007), el número de especies arbóreas y, en general, la heterogeneidad espacial, son mayores en sitios con régimen de fuegos mixto; es decir, con fragmentos sujetos a fuegos de reducida extensión y baja severidad e intensidad y, a su vez, con fragmentos sujetos a fuegos de reemplazo del rodal. Esto permite la coexistencia de diversas especies arbóreas, contrario a las pocas especies que dominan en sitios con regímenes de fuego contrastantes (Kaufmann, Huckaby, Fornwalt, Stoker, & Romme, 2003). En segundo lugar, la magnitud y frecuencia de fuegos afectan los patrones de sucesión ecológica y permiten la coexistencia de las especies arbóreas dominantes (Figura 1C); por ejemplo, los bosques mixtos de *Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson (especie pionera) y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco (especie tardía) se consideran un estadio sucesional detenido por fuegos superficiales frecuentes que mantienen la codominancia de ambas especies (Sherriff & Veblen, 2006). En tercer lugar, la regeneración de las coníferas es mediada tanto por el fuego como por interacciones bióticas; por ejemplo, el nodricismo (facilitación) que ejerce *Populus tremuloides* Michx (especie pionera) sobre *Abies lasiocarpa* (Hooker)

elevation, changes in global circulation phenomena, climate change and natural disturbances) or human factors (increase in ignition sources, fire suppression and forest degradation) (Morgan et al., 2003). In conifer forests, alteration of the fire regime has repercussions on regeneration patterns, stand dominance and at ecosystem scale (Figure 2). For example, at population scale, in sites that experienced frequent and less severe fires, their suppression caused the accumulation of fuels, greater tree density in the stands, trees with small diameters, fires of high severity and establishment

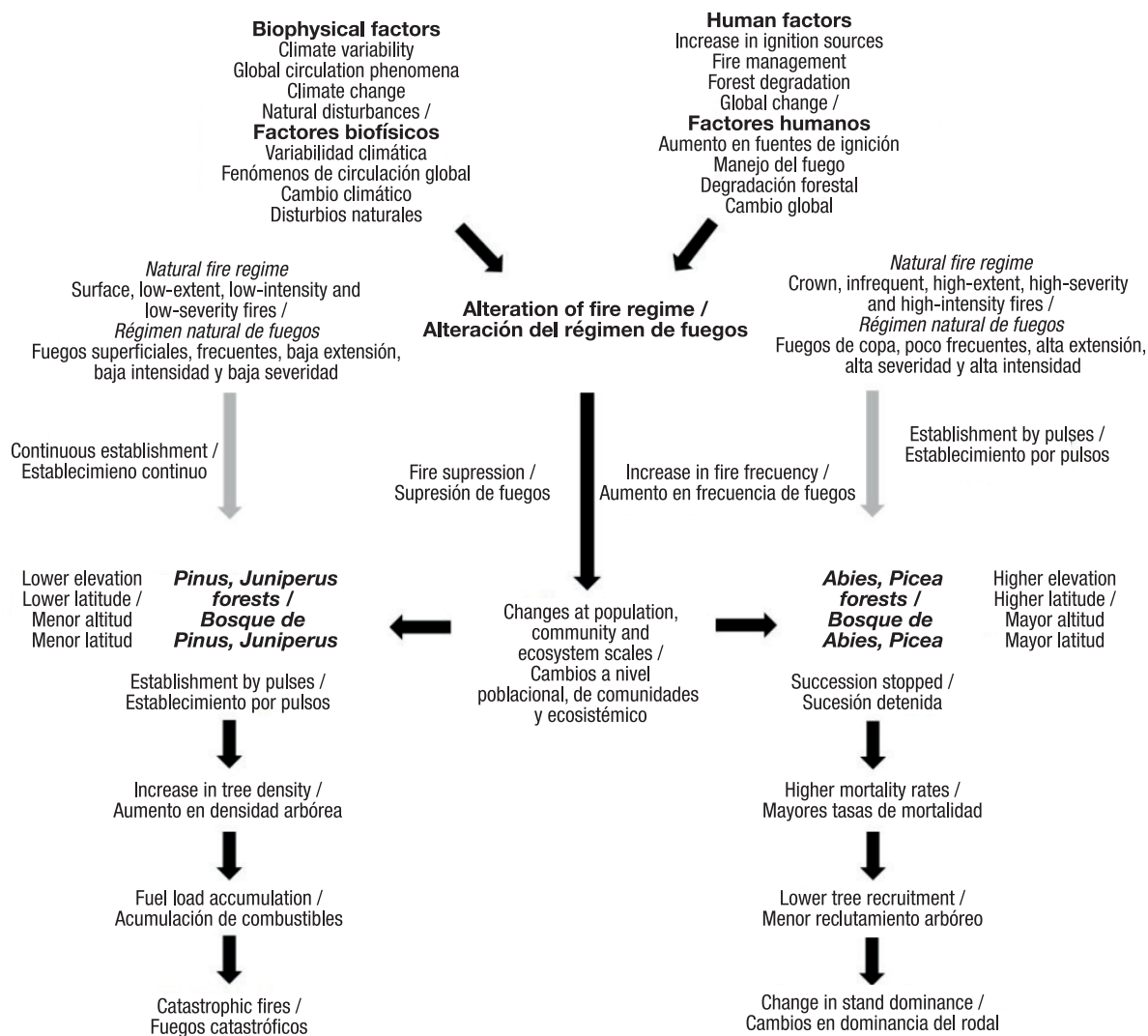
Nuttall (especie tardía) después de fuegos severos, ya que brinda protección y sombra a las plántulas de *A. lasiocarpa*, intolerantes a la insolación (Calder & St. Clair, 2012).

También existe relación entre el régimen de fuegos y la incidencia de otros disturbios (Figura 1D). Por ejemplo, después de vientos fuertes, como huracanes o tormentas invernales, se produce la caída de gran cantidad de árboles y esto incrementa la carga de combustible que induce la ocurrencia de fuegos de alta



**Figure 1.** Effects of the fire regime in conifer forests at individual scale (A), which are manifested in adaptive traits such as bark thickness, grass-stage and serotinous cones (Keeley, 2012); at population scale (B), where they determine patterns of continuous or pulsed establishment (Brown, 2006); at community scale (C), where they can stop forest succession and generate co-dominance of species (Sheriff & Veblen, 2006); at ecosystem scale (D), where other disturbances induce high-magnitude fires (Buma, 2015).

**Figura 1.** Efectos del régimen de fuegos en bosques de coníferas a escala individual (A), que se manifiestan en rasgos adaptativos como grosor de corteza, cespitosidad y estróbilos seróticos (Keeley, 2012); a escala poblacional (B), donde determinan patrones de establecimiento continuo o por pulsos (Brown, 2006); a escala de comunidades (C), donde pueden detener la sucesión forestal y generar la codominancia de especies (Sheriff & Veblen, 2006); a escala ecosistémica (D), donde otros disturbios inducen la aparición de incendios de alta magnitud (Buma, 2015).



**Figure 2. Effects of the alteration of the fire regime by biophysical and human factors on conifer forests, depending on the frequency, extent, severity and intensity of the events.**

**Figura 2. Efectos de la alteración del régimen de fuegos por factores biofísicos y humanos sobre los bosques de coníferas, dependiendo de la frecuencia, extensión, severidad e intensidad de los eventos.**

by pulses in species such as *P. ponderosa*, whose regeneration occurred continuously (Fulé, Korb, & Wu, 2009). On the contrary, in sites with infrequent and more severe fires, the increase in frequency generated higher mortality rates, especially in seedlings and juveniles, which resulted in lower tree recruitment of dominant species (Schwartz et al., 2015).

The structure of the communities is also affected, favoring or restricting the dominance of certain species; for example, the reduction in the fire return interval could displace shade-tolerant species, such as *Abies* sp. and *Quercus* sp., and favor the establishment of *Pinus* sp. (Frelich, 2002). In contrast, fire exclusion can generate the replacement of *Pinus* sp. populations by *Quercus* sp. or *Abies* sp. (Brose & Waldrop, 2010). Interactions between dominant species are also modified; for example, when

magnitude during dry years (Buma, 2015). De forma similar, la probabilidad de infestación por insectos descortezadores puede aumentar en los árboles remanentes debilitados por los fuegos de severidad e intensidad moderadas; a su vez, la muerte de árboles infestados incrementa la carga de combustible generando fuegos de alta magnitud (Pelz & Smith, 2012).

#### Alteración del régimen de fuegos y efectos sobre los bosques de coníferas

El régimen de fuegos puede modificarse por la acción directa o indirecta de factores biofísicos (variabilidad climática, altitud, cambios en fenómenos de circulación global, cambio climático y disturbios naturales) o humanos (aumento en fuentes de ignición, supresión del fuego y degradación forestal) (Morgan

fire cycles are shorter, the dominance of *P. tremuloides* is maintained because it limits the development of *A. lasiocarpa*, due to its intolerance to insolation (Calder & St. Clair., 2012).

Synergies between fire and other disturbances are also affected by the altered fire regime. For example, the occurrence of more severe fires due to the effect of suppression may induce greater incidence of bark beetles, due to the weakening of trees affected by fire (Kulakowski & Jarvis, 2011). On the other hand, the conditions of greater aridity, generated by the effect of climate change, induce the death of trees, increasing the fuel load that can trigger higher-intensity fires (Buma, 2015).

At ecosystem level, the alteration of the fire regime has the ability to drastically modify local environmental conditions and the physiognomy of landscapes. For example, in forests subject to frequent fires of low severity and intensity, such as those of *P. ponderosa*, fire suppression led to high-intensity fires that transformed the ecosystem from pine forests to scrub (Rother & Veblen, 2016). On the other hand, in forests subject to infrequent fires, but of greater intensity and severity, the effect of suppression is less evident, but in the long term it could lead to an atypical accumulation of fuels and generate catastrophic fires (Fulé & Laughlin, 2007). On a global scale, some effects of the alteration of the fire regime could be manifested in the modification of terrestrial carbon stocks, changes in the concentration of carbon dioxide and an increase in global temperature (Pan et al., 2011). Hence, it is essential to document natural and altered fire regimes at both local and larger scales.

### Reconstruction of fire regimes

There are direct and indirect methods for reconstructing fire regimes, which often focus on knowing seven attributes: frequency, seasonality, severity, intensity, type of fire (surface or crown), area and spatial complexity (Yocom, 2014). Among the most useful direct methods is the dating of fire scars, characterized by the presence of reaction wood that gradually envelops the affected trunk area. Based on annual growth rings and by means of partial or total cuts of the trunk, it is possible to locate the exact year of the fire and to infer the historical frequency of fires at stand scale (Grissino-Mayer, 2001). The second direct method is the analysis of the sediment layer in the soil, where carbon residues from generally intense and severe fires accumulate. These carbonized remains are deposited and covered by other sediments. The return interval of these fires can be accurately dated by paleoecological techniques, depending on the sedimentation rate (Conedera et al., 2009). The third direct method consists of describing

et al., 2003). En los bosques de coníferas, la alteración del régimen de fuegos tiene repercusión sobre los patrones de regeneración, dominancia de los rodales y a escala ecosistémica (Figura 2). Por ejemplo, a escala poblacional, en sitios que experimentaban fuegos frecuentes y poco severos, la supresión de estos originó la acumulación de combustibles, mayor densidad arbórea en los rodales, árboles con diámetros pequeños, fuegos de alta severidad y establecimiento por pulsos en especies como *P. ponderosa*, cuya regeneración ocurría de modo continuo (Fulé, Korb, & Wu, 2009). Al contrario, en sitios que presentaban fuegos poco frecuentes y de mayor severidad, el aumento en la frecuencia generó mayores tasas de mortalidad, especialmente en plántulas y juveniles, lo cual derivó en menor reclutamiento arbóreo de las especies dominantes (Schwartz et al., 2015).

La estructura de las comunidades también es afectada, favoreciendo o restringiendo la dominancia de ciertas especies; por ejemplo, la reducción en el intervalo de retorno de fuegos tiene la capacidad de desplazar a las especies tolerantes a la sombra, como *Abies* sp. y *Quercus* sp., y favorecer el establecimiento de *Pinus* sp. (Frelich, 2002). En contraste, la exclusión del fuego puede generar el reemplazo de las poblaciones de *Pinus* sp. por *Quercus* sp. o *Abies* sp. (Brose & Waldrop, 2010). También se modifican las interacciones entre las especies dominantes; por ejemplo, si los ciclos de fuego son más cortos, la dominancia de *P. tremuloides* se mantiene porque limita el desarrollo de *A. lasiocarpa*, debido a su intolerancia a la insolación (Calder & St. Clair., 2012).

Las sinergias entre el fuego y otros disturbios también se ven afectadas por la alteración del régimen de fuegos; por ejemplo, la presencia de fuegos más severos por efecto de la supresión puede inducir mayor incidencia de escarabajos descortezadores, debido al debilitamiento de los árboles afectados por el fuego (Kulakowski & Jarvis, 2011). Por otro lado, las condiciones de mayor aridez, por efecto del cambio climático, inducen la muerte de árboles, aumentando la carga de combustible que puede detonar fuegos de mayor intensidad (Buma, 2015).

A nivel ecosistémico, la alteración del régimen de fuegos tiene la capacidad de modificar drásticamente las condiciones ambientales locales y la fisonomía de los paisajes. Por ejemplo, en bosques sujetos a fuegos frecuentes de baja severidad e intensidad como los de *P. ponderosa*, la supresión del fuego derivó en fuegos de alta intensidad que incluso transformaron el ecosistema de pinares a matorrales (Rother & Veblen, 2016). Por otro lado, en bosques sujetos a fuegos poco frecuentes, pero de mayor intensidad y severidad, el efecto de la supresión es menos evidente, pero a largo



fires through historical records such as photographs, logbooks and permanent monitoring. In this case, the area, severity and intensity of the fires are generally documented (Yocom, 2014).

Among the indirect methods, the analysis of the age structure stands out, under the assumption that the history of tree establishment is correlated with the cyclic intervals of fires. An even-aged structure, with great age variation, suggests that trees experience frequent, low-severity, low-intensity fires (Brown, 2006), while a pulsed age structure suggests infrequent, moderate-to-high severity and intensity stand-replacing fires (Flaver et al., 2008). The second indirect method is remote sensing analysis of fire scars in the landscape, which consists of generating georeferenced polygons of fragments or clearings produced by fires, from satellite images. This method evaluates the extent of the fire and estimates the times of scar appearance and disappearance in the landscape; that is, the frequency and return intervals, as well as the severity, seasonality and spatial extent (Hudak & Brockett, 2004). The third indirect method is reconstructing frequency, intensity, type of fire and severity through interviews with owners, firefighters and forest managers. This technique is quite useful for recovering the empirical knowledge of rural communities about fire management (Raish, González-Cabán, & Condie, 2005).

Each method has strengths and weaknesses, and its implementation depends on the objectives of the study, the properties of the fire regime they address (Table 2), and the ecosystems in which they are applied. For example, the fire scar dating method has been used the most, although it is only applicable to sites with low-to-medium severity and intensity fires, since trees with scars are not always found in sites with stand-replacing fires (Yocom, 2014). In these cases, studies of age structures are generally used, assuming that the establishment is associated with this type of fire (Flaver et al., 2008).

An interesting application is to know the effect of climate on a fire regime by means of superposed epoch analysis, in which the values of precipitation, temperature or global circulation phenomena, such as the El Niño Southern Oscillation (ENSO), are correlated with the fire occurrence years. This allows knowing, for example, if prior or during the fire year the precipitation values were statistically low (Grissino-Mayer, 2001). Another important aspect is knowing whether tree regeneration responds to historical fire occurrence intervals. This involves carrying out, in conjunction with fire chronologies, studies of age structures and evaluation of population establishment patterns in order to know whether they are correlated with fire frequency (Brown, 2006).

plazo podría derivar en una acumulación atípica de combustibles y generar fuegos catastróficos (Fulé & Laughlin, 2007). A escala global, algunos efectos de la alteración del régimen de fuegos podrían manifestarse en la modificación de los almacenes de carbono terrestre, cambios en la concentración del dióxido de carbono y aumento en la temperatura global (Pan et al., 2011). De allí que es fundamental documentar los regímenes del fuego naturales y alterados tanto a escala local, como en escalas mayores.

### Reconstrucción de regímenes del fuego

Existen métodos directos e indirectos para reconstruir los regímenes del fuego, que a menudo se concentran en conocer siete atributos: frecuencia, estacionalidad, severidad, intensidad, tipo de fuego (superficial o de copa), superficie y distribución espacial (Yocom, 2014). Entre los métodos directos destaca el fechado de cicatrices de fuego, caracterizadas por la presencia de madera de reacción que envuelve paulatinamente el área del tronco afectada. Con base en los anillos anuales de crecimiento y mediante cortes parciales o totales del tronco es posible ubicar el año exacto del fuego e inferir la frecuencia histórica de fuegos a escala del rodal (Grissino-Mayer, 2001). El segundo método directo es el análisis de la capa de sedimentos en el suelo, donde se acumulan restos de carbón provenientes de fuegos generalmente intensos y severos. Estos restos carbonizados se depositan y son cubiertos por otros sedimentos. El intervalo de retorno de este tipo de fuegos se puede datar con precisión mediante técnicas paleoecológicas, dependiendo de la tasa de sedimentación (Conedera et al., 2009). El tercer método directo consiste en la descripción de los fuegos mediante registros históricos como fotografías, bitácoras y el monitoreo permanente. En este caso, generalmente, se documentan la extensión, severidad e intensidad de los eventos (Yocom, 2014).

Entre los métodos indirectos destaca el análisis de la estructura de edades, bajo el supuesto de que la historia de establecimiento de árboles está correlacionada con los intervalos cíclicos de fuegos. Una estructura de edades continua, con gran variación en la edad, sugiere que el arbolado experimenta fuegos frecuentes y de severidad e intensidad bajas (Brown, 2006); mientras que una estructura de edades por pulsos sugiere fuegos de reemplazo del rodal poco frecuentes y de moderada a alta severidad e intensidad (Flaver et al., 2008). El segundo método indirecto es el análisis por percepción remota de cicatrices de fuegos en el paisaje, que consiste en generar polígonos georreferenciados de los fragmentos o claros producidos por fuegos, a partir de imágenes de satélite. En este método se evalúa la extensión del fuego y se estiman los tiempos de aparición y desaparición de cicatrices en el paisaje;

A subject that has recently received attention is the potential existence of an altitudinal or latitudinal gradient in the fire return interval. Although there is no systematic review, there are some indications that the fire return interval is relatively lower in montane conifer forests developing within the intertropical zone (Yocom & Fulé, 2012). Therefore, it would be important to analyze whether these patterns can be observed in tropical conifer forests of central and southern Mexico, where in the higher mountains it is possible to find genera characteristic of higher-latitude zones such as *Abies*, *Pinus*, *Picea* and *Pseudotsuga* (Gernandt & Pérez de la Rosa, 2014).

### Fire regime in montane tropical conifer forests

Montane tropical conifer forests are those that are distributed in the mountain massifs within the

es decir, la frecuencia y los intervalos de retorno, así como la severidad, estacionalidad y distribución espacial (Hudak & Brockett, 2004). El tercer método indirecto es la reconstrucción de la frecuencia, la intensidad, el tipo de fuego y la severidad mediante entrevistas a propietarios, combatientes y manejadores del bosque. Esta técnica es bastante útil para recuperar el conocimiento empírico de las comunidades rurales sobre el manejo del fuego (Raish, González-Cabán, & Condie, 2005).

Cada método presenta fortalezas y debilidades, y su implementación depende de los objetivos del estudio, de las propiedades del régimen de fuegos que abordan (Cuadro 2), y de los ecosistemas en los que se aplican. Por ejemplo, el método de fechado de cicatrices de fuego es el que más se ha utilizado, aunque solo es aplicable para sitios con fuegos de baja a media

**Table 2. Properties that address fire regime reconstruction methods.**

**Cuadro 2. Propiedades que abordan los métodos de reconstrucción del régimen de fuegos.**

Methods/ Métodos	Frequency/ Frecuencia	Severity/ Severidad	Intensity/ Intensidad	Type of fire/ Tipo de fuego	Seasonality/ Estacionalidad	Area/ Extensión	Spatial distribution/ Distribución espacial
Direct/Directos							
Fire scars/ Cicatrices de fuego	x	x	x		x		
Sediment layers/ Capas de sedimentos	x		x				
Historical records/ Registros históricos	x	x	x	x	x	X	x
Indirect/Indirectos							
Age structure/ Estructura de edades	x	x					
Remote sensing/ Percepción remota	x	x			x	X	x
Interviews/ Entrevistas	x	x	x	X			

intertropical zone; that is, between the Tropic of Cancer and the Tropic of Capricorn. In Mexico, the distribution area corresponds to the Transversal Volcanic System and the Sierra Madre del Sur. Rodríguez-Trejo and Fulé (2003) indicate that, according to the altitudinal gradient, the fire regime in montane tropical conifer forests differs between forests dominated by *Abies* sp. and those dominated by *Pinus* sp.; the former are located generally at higher elevations and are subject to infrequent, moderate-to-high severity and intensity fires, while the latter are distributed on lower slopes and are subject to frequent, low-severity, low-intensity fires. However, both in forests dominated by *Pinus hartwegii* Lindley, at elevations above 3 400 m (Yocom & Fulé, 2012), and in forests dominated by *Pinus douglasiana* Martínez, at elevations below 2 700 m (Cerano et al., 2015), fires are frequent and of low severity and intensity. There are still no chronologies documenting the fire return interval at intermediate elevations (2 700 to 3 400 m), where other species of *Pinus* and *Abies* are distributed. On the other hand, there are indications that the regeneration of *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. responds better to moderate-to-high-severity fires (Angeles-Cervantes & López-Mata, 2009). Fuel load seems to be higher in forests dominated by this species with respect to pine forests, which would trigger greater-magnitude fires (Villers-Ruiz & López-Blanco, 2004). However, similar patterns of severity, intensity and tree establishment (continuous) have been detected in stands dominated by *Pinus pseudostrobus* Lindley and *A. religiosa*, which suggest that both experience frequent, low-severity, low-intensity fires, and that tree regeneration is not associated with cyclical fire events (Pérez-Salicrup et al., 2016).

It is not entirely certain whether the presence of frequent fires, of low extent, severity and intensity, in montane tropical conifer forests is due to biogeographic causes and is specific to this type of ecosystem in tropical latitudes, or whether it is a consequence of the alteration of the fire regime by human activities. On the one hand, it has been proposed that montane tropical conifer forests have different structural and functional attributes than higher-latitude conifer forests (Yocom & Fulé, 2012). For example, in montane forests, rainfall distribution is tropical with a dry and a wet season (García, 2003), and the fuel load dries and decomposes faster than in higher-latitude forests, which prevents the accumulation and generation of greater-magnitude fires (Quintero-Gradilla, García-Oliva, Cuevas-Guzmán, Jardel-Peláez, & Martínez-Yrizar, 2015). On the other hand, due to the long history of forest management of montane tropical conifer forests, it has been postulated that fire regimes are anthropogenic (Myers & Rodríguez-Trejo, 2009) and that fire frequency is weakly associated with periods of drought (Pompa-García, Camarero, Rodríguez-Trejo,

severidad e intensidad, ya que, en sitios con fuegos de reemplazo del rodal, no siempre se encuentran árboles con cicatrices (Yocom, 2014). En estos casos se recurre generalmente a estudios de estructuras de edades, suponiendo que el establecimiento está asociado a este tipo de fuegos (Flaver et al., 2008).

Una aplicación interesante es conocer el efecto del clima sobre el régimen de fuegos mediante un análisis de superposición de épocas, en el que se correlacionan los valores de precipitación, temperatura o de fenómenos de circulación global como El Niño Oscilación del Sur (ENSO), con los años de ocurrencia de fuegos. Esto permite saber, por ejemplo, si previo o durante el año de fuego, los valores de precipitación fueron estadísticamente bajos (Grissino-Mayer, 2001). Otro aspecto importante es saber si la regeneración arbórea responde a los intervalos históricos de ocurrencia de fuegos. Esto implica realizar, en conjunto con las cronologías de fuegos, estudios de estructuras de edades y evaluación de los patrones de establecimiento de las poblaciones para saber si están correlacionados con la frecuencia de fuegos (Brown, 2006).

Un tema que recientemente ha recibido atención es la posible existencia de un gradiente altitudinal o latitudinal en el intervalo de retorno de fuegos. Aunque no existe una revisión sistemática, existen algunos indicios de que el intervalo de retorno de fuegos es relativamente menor en bosques de coníferas montanos que se desarrollan dentro de la zona intertropical (Yocom & Fulé, 2012). Por lo anterior, sería importante analizar si estos patrones pueden observarse en bosques de coníferas tropicales del centro y sur de México, donde en las montañas más elevadas es posible encontrar géneros característicos de zonas con mayor latitud como *Abies*, *Pinus*, *Picea* y *Pseudotsuga* (Gernandt & Pérez de la Rosa, 2014).

### Régimen de fuegos en bosques de coníferas tropicales montanos

Los bosques de coníferas tropicales montanos son aquéllos que se distribuyen en los macizos montañosos dentro de la zona intertropical; es decir, entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio. En México, el área de distribución corresponde con el Sistema Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur. Rodríguez-Trejo y Fulé (2003) indican que, de acuerdo con el gradiente altitudinal, el régimen de fuegos en bosques de coníferas tropicales montanos difiere entre los bosques dominados por *Abies* sp. y los dominados por *Pinus* sp.; generalmente, los primeros están sujetos a fuegos poco frecuentes de moderada a alta severidad e intensidad, mientras que los segundos se distribuyen en laderas más bajas y están sujetos a fuegos frecuentes de baja severidad e intensidad. No

& Vega-Nieva, 2018). In this sense, fires are frequent because they are caused by human activities and are of low severity and intensity because they are fought and suppressed, which does not allow them to spread (Martínez-Torres, Castillo, Ramírez, & Pérez-Salicrup, 2016). For this reason, it is important to continue investigating fire regimes in montane tropical conifer forests in order to know if these characteristics are of natural origin, if they have been altered by humans or are the result of a mixture of both processes.

### Timber activity and fire regimes

In addition to the biogeographical aspect, fire regimes can be drastically altered by timber harvesting. In fact, this activity has replaced fire as the main disturbance agent that modifies the structure and function of conifer forests (Frelich, 2002). In forest management, two methods stand out: regular management, which consists of the extraction of large volumes of timber in large areas, commonly known as clear-cutting (Gustafsson, Kouki, & Sverdrup-Thygeson, 2010), while irregular management consists of selective cutting, in order to maintain balanced diameter structures and ensure a continuous supply of timber in the same stand, which leads to the maintenance of some canopy cover (Schwartz, Nagel, & Webster, 2005). So far, the effect of these and other silvicultural methods, such as salvage or illegal logging, has not been systematically evaluated on fire regimes in Mexico's conifer forests. However, some consequences could be inferred from information generated at other latitudes.

Regular management generally increases the fire risk, since a common practice is to extract commercial timber and leave residual material (poorly-shaped branches and trunks) on the ground, which increases fuel loading and susceptibility to fires of greater severity and intensity (Chen et al., 2015). In irregular management methods, the opening of small spaces promotes the establishment of shade-intolerant species, which can double or triple their density (Merschel, Spies, & Heyerdahl, 2014). If thinning is not applied, the accumulation of fuels and the possible increase in fire severity and intensity are generated (Morgan et al., 2003). On the other hand, salvage logging removes damaged trees and reduces fuel loads, but its application is controversial, as it modifies the natural fuel dynamics (Lindenmayer & Noss, 2006). Finally, illegal logging is characterized by extracting segments that are quickly loaded onto a truck, so that most of the tree is abandoned, a situation that increases the fuel load, fire severity and the speed of spreading to tree crowns (Kukavskaya et al., 2013). In some cases, fires are even deliberately set to eliminate evidence of illegal logging (Martínez-Torres et al., 2016; Mehring & Stoll-Kleemann, 2008). These situations suggest that timber harvesting should be consistent with fire regimes to ensure forest integrity.

obstante, tanto en los bosques dominados por *Pinus hartwegii* Lindley, en altitudes superiores a 3 400 m (Yocom & Fulé, 2012), como en los bosques dominados por *Pinus douglasiana* Martínez, en altitudes inferiores a 2 700 m (Cerano et al., 2015), los fuegos son frecuentes y de severidad e intensidad bajas. Aún no existen cronologías que documenten el intervalo de retorno de fuegos en altitudes intermedias (2 700 a 3 400 m), donde se distribuyen otras especies de *Pinus* y *Abies*. Por otra parte, existen indicios de que la regeneración de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham. responde mejor a fuegos de moderada a alta severidad (Ángeles-Cervantes & López-Mata, 2009). La carga de combustibles parece ser mayor en bosques dominados por esta especie con respecto a los bosques de pino, lo cual detonaría fuegos de mayor magnitud (Villers-Ruiz & López-Blanco, 2004). Sin embargo, se han detectado patrones similares de severidad, intensidad y establecimiento arbóreo (continuo) en rodales dominados por *Pinus pseudostrobus* Lindley y *A. religiosa* que sugieren que ambos experimentan fuegos frecuentes de baja severidad e intensidad, y que la regeneración arbórea no está asociada a eventos cíclicos de fuego (Pérez-Salicrup et al., 2016).

No hay certeza total sobre si la presencia de fuegos frecuentes de baja extensión, severidad e intensidad en bosques de coníferas tropicales montanos obedece a causas biogeográficas y sea propio para este tipo de ecosistemas de latitudes tropicales, o bien, sea consecuencia de la alteración del régimen de fuegos por actividades humanas. Por un lado, se ha propuesto que los bosques de coníferas tropicales montanos tienen atributos estructurales y funcionales distintos de los bosques de coníferas de mayor latitud (Yocom & Fulé, 2012); por ejemplo, en los bosques montanos, la distribución de la precipitación es de tipo tropical con una estación seca y otra húmeda (García, 2003), y la carga de combustible se seca y descompone más rápido que en los bosques de mayor latitud, lo cual impide la acumulación y la generación de fuegos de mayor magnitud (Quintero-Gradilla, García-Oliva, Cuevas-Guzmán, Jardel-Peláez, & Martínez-Yrizar, 2015). Por otro lado, debido a la larga historia de manejo forestal de los bosques de coníferas tropicales montanos, se ha postulado que los regímenes del fuego son antropogénicos (Myers & Rodríguez-Trejo, 2009) y que la frecuencia de fuegos está débilmente asociada a los periodos de sequía (Pompa-García, Camarero, Rodríguez-Trejo, & Vega-Nieva, 2018). En este sentido, los fuegos son frecuentes porque son provocados por actividades humanas y son de baja severidad e intensidad debido a que se combaten y suprimen, lo cual no permite que se propaguen (Martínez-Torres, Castillo, Ramírez, & Pérez-Salicrup, 2016). Por lo anterior, es importante seguir investigando los regímenes del fuego en bosques de coníferas tropicales montanos para conocer si estas características son de

## Fire regime management

Integrated fire management emerged as a proposal to prevent and counteract the negative effects of altering fire regimes. Such management is based on the premise of maintaining the structure and function of forest ecosystems through management practices that emulate the natural regime (Scott, Bowman, Bond, Pyne, & Alexander, 2014). For example, the application of silvicultural methods, such as the regular one, may mimic the effect of stand-replacing fires, while the irregular method may have effects similar to surface fires (Chen et al., 2015). Since conifers have evolved under different fire regimes, it is important that the management of this element be incorporated into forest management practices, especially in sites where the regime has been altered (Fulé et al., 2009). Fire management practices include thinning, implementation of firebreaks, removal of excess fuel material, closure of forest supply roads, grazing control, and prescribed burns (Brown & Smith, 2000).

Fire management should consider differences in the fire regimes of each type of conifer forest (Fulé & Laughlin, 2007). For example, for conifer forests in central Mexico, such as those dominated by *Pinus* sp., it is suggested to maintain a multi-stage age structure and induce frequent, low-severity surface fires. Unfortunately, as previously mentioned, for other forests such as those dominated by *Abies* sp. or those co-dominated by *Pinus* sp. and *Abies* sp., there is no information on fire regimes, which makes it difficult to formulate forest management recommendations in accordance with natural regimes. Therefore, following the uncertainty criterion that should govern ecosystem management, before implementing forest management practices it is necessary to evaluate their effect on ecosystems with the tree dominances previously described. Likewise, fuel loads must be monitored to maintain them at levels compatible with the dynamics of each dominance (Battaglia & Shepperd, 2007).

Fire management faces some barriers. First, the expansion of urban areas has increased the risk of property damage and fatalities from forest fires, which has led to the development of laws and public policies that restrict or prevent the use of fire as a forest management tool (Biro, 2009). The second barrier is the lack of information on fire regimes in particular sites or ecosystems, which prevents having a solid frame of reference to make appropriate decisions (Conedera et al., 2009). In this sense, a paradigm shift from the suppression to the use of fire as a forest management tool is required. Therefore, it is essential to have awareness-raising strategies and negotiation mechanisms to plan fire management among forest

origen natural, si han sido alteradas por el hombre o por una mezcla de ambos procesos.

## Actividad maderable y regímenes del fuego

Además del aspecto biogeográfico, los regímenes del fuego pueden ser alterados drásticamente por el aprovechamiento maderable. De hecho, esta actividad ha reemplazado al fuego como el principal agente de disturbio que modifica la estructura y función de los bosques de coníferas (Frelich, 2002). En el manejo forestal destacan dos métodos: el manejo regular, que consiste en la extracción de grandes volúmenes de madera en superficies extensas, conocido comúnmente como cortas a matarrasa (Gustaffson, Kouki, & Sverdrup-Thygeson, 2010); mientras que el manejo irregular consiste en la corta selectiva, con el fin de mantener estructuras diamétricas balanceadas y asegurar una provisión continua de madera en el mismo rodal, lo que deriva en el mantenimiento de alguna cobertura del dosel (Schwartz, Nagel, & Webster, 2005). Hasta ahora, el efecto de estos métodos silvícolas y otros, como las extracciones de contingencia o la tala ilegal, no se ha evaluado sistemáticamente sobre los regímenes del fuego en bosques de coníferas de México; sin embargo, se podrían inferir algunas consecuencias a partir de información generada en otras latitudes.

El manejo regular, generalmente, aumenta el riesgo de fuegos, ya que una práctica común es extraer la madera comercial y dejar el material residual (ramas y troncos mal conformados) en el suelo, el cual incrementa la carga de combustible y la susceptibilidad a fuegos de mayor severidad e intensidad (Chen et al., 2015). En los métodos de manejo irregular, la apertura de pequeños espacios promueve el establecimiento de especies intolerantes a la sombra, que pueden duplicar o triplicar su densidad (Merschel, Spies, & Heyerdahl, 2014). Si no se aplican cortas de aclareo, se genera la acumulación de combustibles y el posible aumento en la severidad e intensidad de los fuegos (Morgan et al., 2003). Por otro lado, el aprovechamiento por contingencia remueve los árboles dañados y reduce las cargas de combustibles, pero su aplicación es controvertida, puesto que modifica la dinámica natural de combustibles (Lindenmayer & Noss, 2006). Finalmente, la tala ilegal se caracteriza por extraer segmentos que se cargan rápidamente a un camión, por lo que la mayor parte del árbol se abandona, situación que aumenta la carga de combustible e incrementa la severidad de fuegos y la velocidad de propagación hacia las copas (Kukavskaya et al., 2013). Incluso, en algunos casos, los incendios son provocados deliberadamente para eliminar la evidencia de la tala clandestina (Martínez-Torres et al., 2016; Mehring & Stoll-Kleemann, 2008). Estas situaciones permiten sugerir que el aprovechamiento maderable debe ser

resource managers, researchers, authorities and society in general (Morgan et al., 2003). The most important aspect is to understand how fire limits or promotes the regeneration and development of conifer forests, including the effect of global change, in order to maintain resilient and sustainable ecosystems in the long term.

## Conclusions

Fire has effects on the regeneration of conifer forests at individual, population, community and ecosystem scales, in accordance with the natural fire regime. Their modification can alter the dynamics of tree regeneration drastically; therefore, it is essential to reconstruct and document natural fire regimes altered by human activities, in order to propose forest management strategies in line with the natural dynamics of fires. In montane tropical conifer forests, it is necessary to strengthen research on fire regimes and their relationship with tree regeneration and anthropogenic disturbances, such as timber harvesting. These forests offer the opportunity to compare the natural dynamics of fires and their alteration with higher-latitude forests. Finally, beyond focusing efforts on preventing and fighting fires, it is necessary to consider this element as a forest management tool to prevent catastrophic events and the alteration of tree regeneration.

## Acknowledgments

The first author is grateful for the support of the Postgraduate Program in Biological Sciences of the Universidad Nacional Autónoma de México and of the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for the scholarship received during his doctoral studies. Both authors gratefully acknowledge the financial support of the SEP-CONACYT 2010-154434 projects "Effect of natural and human disturbances on conifer forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve: implications for fire management", and PAPIIT-UNAM IN209716 "Synergy of natural and human disturbances in montane forests in eastern Michoacán". Research was supported by the PASPA-DGAPA program, UNAM. Special thanks go to Maribel Arenas, Lina Urrea, Leonardo Martínez and Claudia Guerrero for their suggestions in the development of this work.

consistente con los regímenes del fuego, para asegurar la integridad de los bosques.

## Manejo del régimen de fuegos

El manejo integral del fuego surgió como una propuesta para prevenir y contrarrestar los efectos negativos de la alteración de los regímenes del fuego. Tal manejo se basa en la premisa de mantener la estructura y función de los ecosistemas forestales, a través de prácticas de manejo que emulen el régimen natural (Scott, Bowman, Bond, Pyne, & Alexander, 2014). Por ejemplo, la aplicación de métodos silvícolas, como el regular, puede imitar el efecto de fuegos de reemplazo, mientras que el método irregular puede tener efectos similares a los fuegos superficiales (Chen et al., 2015). Dado que las coníferas han evolucionado según distintos regímenes del fuego, es importante que el manejo de este elemento se incorpore a las prácticas de manejo forestal, especialmente en sitios donde el régimen ha sido alterado (Fulé et al., 2009). Las prácticas de manejo del fuego incluyen cortas de aclareo, implementación de brechas cortafuego, retiro del exceso de material combustible, cierre de caminos de abastecimiento forestal, control de pastoreo y quemas prescritas (Brown & Smith, 2000).

En el manejo del fuego se deben considerar las diferencias en los regímenes del fuego de cada tipo de bosque de coníferas (Fulé & Laughlin, 2007). Por ejemplo, para bosques de coníferas del centro de México, como los dominados por *Pinus* sp., se sugiere mantener una estructura de edades multiétnica e inducir fuegos superficiales, frecuentes y de baja severidad. Desafortunadamente, como se mencionó previamente, para otros bosques como los dominados por *Abies* sp. o los codominados por *Pinus* sp. y *Abies* sp., no hay información sobre los regímenes del fuego, lo cual dificulta la formulación de recomendaciones de manejo forestal acordes con los regímenes naturales. Por ello, siguiendo el criterio de incertidumbre que debe regir en el manejo de ecosistemas, antes de implementar prácticas de manejo forestal es necesario evaluar su efecto en ecosistemas con las dominancias de arbolado previamente descritas. Del mismo modo, se deben monitorear las cargas de combustibles, para mantenerlas en niveles compatibles con la dinámica de cada dominancia (Battaglia & Shepperd, 2007).

El manejo del fuego enfrenta algunas barreras. En primer lugar, la expansión de las áreas urbanas ha incrementado el riesgo de daños en las propiedades y víctimas mortales por incendios forestales, lo cual ha derivado en la elaboración de leyes y políticas públicas que restringen o impiden el uso del fuego como herramienta de manejo forestal (Biro, 2009). La segunda barrera es la falta de información sobre los

*End of English version*

## References / Referencias

- Ángeles-Cervantes, E., & López-Mata, L. (2009). Supervivencia de una cohorte de plántulas de *Abies religiosa* bajo diferentes condiciones post-incendio. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 84, 25–33. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsbm/n84/n84a3.pdf>
- Battaglia, M. A., & Shepperd, W. D. (2007). *Ponderosa pine, mixed conifer, and spruce-fir forests*. Washington D. C., USA: U. S. Forest Service.
- Birot, Y. (2009). *Convivir con los incendios forestales: Lo que nos revela la ciencia*. Joensuu, Finlandia: European Forest Institute.
- Brose, P. H., & Waldrop, T. A. (2010). A dendrochronological analysis of a disturbance-succession model for oak-pine forests of the Appalachian Mountains, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(7), 1373–1385. doi: 10.1139/X10-077
- Brown, J. K., & Smith, J. K. (2000). *Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on flora*. Ogden, Utah, USA: U. S. Forest Service.
- Brown, P. (2006). Climate effects on fire regimes and tree recruitment in Black Hills ponderosa pine forests. *Ecology*, 87(10), 2500–2510. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2500:CEOFRA]2.0.CO;2
- Brown, P. M. (2013). Dendrochronology: Fire regimes. In W. J. Rink, & J. W. Thompson (Eds.), *Encyclopedia of scientific dating methods*. Dordrecht, Holanda: Springer. doi: 10.1007/978-94-007-6326-5
- Buma, B. (2015). Disturbance interactions: Characterization, prediction, and the potential for cascading effects. *Ecosphere*, 6(4), 1–15. doi: 10.1890/ES15-00058.1
- Calder, W. J., & St Clair, S. B. (2012). Facilitation drives mortality patterns along succession of aspen-conifer forests. *Ecosphere*, 3(6), 1–11. doi: 10.1890/ES12-00119.1
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Fulé, P., Yocom, L., Esquivel-Arriaga, G., & Jardel-Peláez, E. (2015). Historia de incendios en un bosque de pino de la Sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque*, 36(1), 41–52. doi: 10.4067/S0717-92002015000100005
- Chen, H., Hu, Y., Chang, Y., Bu, R., Li, Y., & Liu, M. (2015). Changes of forest fire regime and landscape pattern under different harvesting modes in a boreal forest of Northeast China. *Journal of Arid Land*, 7(6), 841–851. doi: 10.1007/s40333-015-0015-2
- Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A. F., & Krebs, P. (2009). Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 555–576. doi: 10.1016/j.quascirev.2008.11.005
- Cremer, E., Ziegenhagen, B., Schulerowitz, K., Mengel, C., Donges, K., Bialozyt, R., ... Liepelt, S. (2012). Local seed dispersal in European silver fir (*Abies alba* Mill.): Lessons learned from a seed trap experiment. *Trees*, 26(3), 987–996. doi: 10.1007/s00468-012-0676-9
- Flaver, S., Jonnson, B., Jönsson, M., & Esseen, P. (2008). Demographics and disturbance history of a boreal old

regímenes del fuego en sitios o ecosistemas particulares, lo cual impide tener un marco de referencia sólido para tomar decisiones adecuadas (Conedera et al., 2009). En este sentido, se requiere un cambio de paradigma de la supresión al uso del fuego como herramienta de manejo forestal. Por tanto, es imprescindible contar con estrategias de concientización y mecanismos de negociación, para planificar el manejo del fuego, entre manejadores de recursos forestales, investigadores, autoridades y sociedad en general (Morgan et al., 2003). El aspecto más importante es entender cómo el fuego limita o promueve la regeneración y el desarrollo de los bosques de coníferas, incluyendo el efecto del cambio global, para mantener ecosistemas resilientes y sostenibles a largo plazo. La ecología del fuego es una ciencia en pleno crecimiento, por lo que será posible evaluar los regímenes del fuego en más ecosistemas, como los bosques de coníferas.

## Conclusiones

El fuego tiene efectos sobre la regeneración de los bosques de coníferas a escala individual, poblacional, de comunidades y ecosistémico, de acuerdo con el régimen natural de fuegos. La modificación de estos puede alterar la dinámica de regeneración arbórea drásticamente; por tanto, es fundamental reconstruir y documentar los regímenes del fuego naturales y alterados por actividades humanas, para proponer estrategias de manejo forestal acordes con la dinámica natural de fuegos. En los bosques de coníferas tropicales montanos es necesario fortalecer la investigación sobre los regímenes de fuego y su relación con la regeneración arbórea y los disturbios antropogénicos, como el aprovechamiento maderable. Estos bosques ofrecen la oportunidad de comparar la dinámica natural de fuegos y su alteración con bosques de latitudes mayores. Por último, más allá de enfocar los esfuerzos en la prevención y combate de fuegos, es necesario considerar a este elemento como herramienta de manejo forestal para prevenir eventos catastróficos y la alteración de la regeneración arbórea.

## Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo del Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca recibida durante sus estudios de doctorado. Ambos autores agradecen el apoyo financiero de parte de los proyectos SEP-CONACYT 2010-154434 "Efecto de las perturbaciones naturales y humanas en bosques de coníferas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: implicaciones para el manejo del fuego", y PAPIIT-UNAM IN209716 "Sinergia de disturbios naturales y humanos en bosques montanos del oriente de Michoacán".

- growth *Picea abies* forest. *Journal of Vegetation Science*, 19, 789-798. doi: 10.3170/2008-8-18449
- Frelich, L. E. (2002). *Forest dynamics and disturbance regimes: Studies from temperate evergreen-deciduous forests*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Fulé, P. Z., & Laughlin, D. C. (2007). Wildland fire effects on forest structure over an altitudinal gradient, Grand Canyon National Park, USA. *Journal of Applied Ecology*, 44(1), 136-146. doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01254.x
- Fulé, P. Z., Korb, J. E., & Wu, R. (2009). Changes in forest structure of a mixed conifer forest southwestern Colorado. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 1200-1210. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.015
- García, E. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 50, 67-76. doi: 10.14350/rig.30432
- Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 126-133. doi: 10.7550/rmb.32195
- Grissino-Mayer, H. (2001). FHX2-Software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research*, 57(1), 115-124. Retrieved from <http://arizona.openrepository.com/arizona/handle/10150/263022>
- Gustaffson, L., Kouki J., & Sverdrup-Thygeson, A. (2010). Tree retention as a conservation measure in clear-cut forests of northern Europe: A review of ecological consequences. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(4), 295-308. doi: 10.1080/02827581.2010.497495
- Hudak, A. T., & Brockett, B. H. (2004). Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(16), 3231-3243. doi: 10.1080/01431160310001632666
- Jardel-Peláez, E. J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado, E. & Morfín-Ríos, J. E. (2014). *Principios y criterios para el manejo de fuegos en ecosistemas forestales: guía de campo*. Guadalajara, México: Comisión Forestal de México. Retrieved from [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Principios\\_y\\_criterios\\_para\\_el\\_manejo\\_del\\_fuego\\_en\\_ecosistemas\\_forestales.pdf](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Principios_y_criterios_para_el_manejo_del_fuego_en_ecosistemas_forestales.pdf)
- Kaufmann, M. L., Huckaby, L. S., Fornwalt, P. J., Stoker, J. M., & Romme, W. H. (2003). Using tree recruitment patterns and fire history to guide restoration of an unlogged ponderosa pine/Douglas fir landscape in the southern Rocky Mountains after a century of fire suppression. *Forestry*, 76(2), 231-241. doi: 10.1093/forestry/76.2.231
- Keeley, J. E. (2012). Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science* 69(4), 445-453. doi: 10.1007%2Fs13595-012-0201-8
- Kukavskaya, E. A., Buryak, L. V., Ivanova, G. A., Conard, S. G., Kalenskaya, O. P., Zhila, S. V., & McRae, D. J. (2013). Influence of logging on the effects of wildfire in Siberia. *Environmental Research Letters*, 8(4), 1-11. doi: 10.1088/1748-9326/8/4/045034
- Kulakowski, D., & Jarvis, D. (2011). The influence of mountain pine beetle outbreaks and drought on severe wildfires in northwestern Colorado and southern Wyoming: A look at the past century. *Forest Ecology and Management*, 262(9), 1686-1696. doi: 10.1016/j.foreco.2011.07.016
- Investigación apoyada por el programa PASPA-DGAPA, UNAM. Agradecimiento especial a Maribel Arenas, Lina Urrea, Leonardo Martínez y Claudia Guerrero por sus sugerencias para el desarrollo de este trabajo.

### Fin de la versión en español

- Lindenmayer, D. B., & Noss, R. E. (2006). Salvage logging, ecosystem processes and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 20(4), 949-958. doi: 10.1111/j.1523-1739.2006.00497.x
- Martínez-Torres, H. L., Castillo, A., Ramírez, M. I., & Pérez-Salicrup, D. R. (2016). The importance of the traditional fire knowledge system in a subtropical montane socio-ecosystem in a protected natural area. *International Journal of Wildland Fire*, 25(9), 911-921. doi: 10.1071/WF15181
- Mehring, M., & Stoll-Kleemann, S. (2008). Evaluation of major threats to forest biosphere reserves: A global view. *Gaia*, 17(1), 125-133. doi: 10.14512/gaia.17.S1.10
- Merschel, A. G., Spies, T. A., & Heyerdahl, E. K. (2014). Mixed-conifer forests of central Oregon: Effects of logging and fire exclusion vary with environment. *Ecological Applications*, 24(7), 1670-1688. doi: 10.1890/13-1585.1
- Morgan, P., Defossé, G. E., & Rodríguez, N. F. (2003). Management implications of fire and climate changes in the Western Americas. In T. T. Veblen, W. L. Baker, G. Montenegro, & T. W. Swetnam (Eds.), *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas* (pp. 413-440). New York, USA: Springer. doi: 10.1007/0-387-21710-X\_15
- Myers, R. L., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2009). Fire in tropical pine ecosystems. In M. A. Cochrane (Ed.), *Tropical fire ecology* (pp. 557-605). Berlin, Alemania: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8\_20
- Nelson, C. D., Weng, C., Kubisiak, T. L., Stine, M., & Brown, C. L. (2003). On the number of genes controlling the grass stage in Longleaf pine. *Journal of Heredity*, 94(5), 392-398. doi: 10.1093/jhered/esg086
- Pan, Y., Chen, J. M., Birdsey, R., McCullough, K., He, L., & Deng, F. (2011). Age structure and disturbance legacy of North American forests. *Biogeosciences*, 8, 715-732. doi: 10.5194/bg-8-715-2011
- Pelz, K. A., & Smith, F. W. (2012). Thirty year change in lodgepole and lodgepole/mixed conifer forest structure following 1980s mountain pine beetle outbreak in western Colorado, USA. *Forest Ecology and Management*, 280, 93-102. doi: 10.1016/j.foreco.2012.05.032
- Pérez-Salicrup, D., Cantú-Fernández, M., Carlón-Allende, T., Garduño-Mendoza, E., Jaramillo-López, P., Sáenz-Ceja, J. E., & Martínez-Torres, H. L. (2016). Restauración de un proceso: El fuego en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en los estados de México y Michoacán. En E. Ceccón, & C. Martínez-Garza (Eds.), *Experiencias mexicanas en restauración de ecosistemas*



- (pp. 215–236). México, D. F.: UNAM. Retrieved from <https://www.crim.unam.mx/web/sites/default/files/Experiencias%20mexicanas.pdf>
- Pompa-García, M., Camarero, J. J., Rodríguez-Trejo, D. A., & Vega-Nieva, D. J. (2018). Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1), 25–37. doi: 10.1007/s11769-017-0928-0
- Quintero-Gradilla, S. D., García-Oliva, F., Cuevas-Guzmán, R., Jardel-Peláez, E. J., & Martínez-Yrizar, A. (2015). Soil carbon and nutrient recovery after high-severity wildfire in Mexico. *Fire Ecology*, 11(3), 45–63. doi: 10.4996/fireecology.1103045
- Raish, C., González-Cabán, A., & Condie, C. J. (2005). The importance of traditional fire use and management practices for contemporary land managers in the American Southwest. *Environmental Hazards*, 6(2), 115–122. doi: 10.1016/j.hazards.2005.10.004
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Fulé, P. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23–37. doi: 10.1071/WF02040
- Rother, M. T., & Veblen, T. T. (2016). Limited conifer regeneration following wildfires in dry ponderosa pine forests of the Colorado Front Range. *Ecosphere*, 7(12), 1–17. doi: 10.1002/ecs2.1594
- Scott, A. C., Bowman, D. M. J. S., Bond, E. J., Pyne, S. J., & Alexander, M. E. (2014). *Fire on Earth: An introduction*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Schwartz, J. W., Nagel, L. M., & Webster, C. R. (2005). Effects of uneven-aged management on diameter distribution and species composition of northern hardwoods in Upper Michigan. *Forest Ecology and Management*, 211(3), 356–370. doi: 10.1016/j.foreco.2005.02.054
- Schwartz, M. W., Butt, N., Dolanc, C. R., Holguin, A., Moritz, M. A., North, M. P., ... Mantgem, P. (2015). Increasing elevation of fire in the Sierra Nevada and implications for forest change. *Ecosphere*, 6(7), 1–10. doi: 10.1890/ES15-00003.1
- Sherriff, R. L., & Veblen, T. T. (2006). Ecological effects of changes in fire regimes in *Pinus ponderosa*, Colorado Front Range. *Journal of Vegetation Science*, 17(6), 705–718. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4499175>
- Svensson, J. R., Lindgarth, M., Siccha, M., Lenz, M., Molis, M., Wahl, M., & Pavia, H. (2007). Maximum species richness at intermediate frequencies of disturbance: Consistency among levels of productivity. *Ecology*, 88(4), 830–838. doi: 10.1890/06-0976
- Timoney, K. P. (2003). The changing disturbance regime of the boreal forest of the Canadian Prairie Provinces. *The Forestry Chronicle*, 79(3), 502–516. doi: 10.5558/tfc79502-3
- Villers-Ruiz, L., & López-Blanco, J. (2004). Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: Un estudio en el volcán La Malinche. En L. Villers-Ruiz, & J. López-Blanco (Eds.), *Incendios forestales en México: métodos de evaluación* (pp. 57–73). México, D. F.: UNAM. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/238717127\\_Comportamiento\\_del\\_fuego\\_y\\_evaluacion\\_del\\_riesgo\\_por\\_incendios\\_en\\_las\\_areas\\_forestales\\_de\\_Mexico\\_un\\_estudio\\_en\\_el\\_Volcan\\_la\\_Malinche](https://www.researchgate.net/publication/238717127_Comportamiento_del_fuego_y_evaluacion_del_riesgo_por_incendios_en_las_areas_forestales_de_Mexico_un_estudio_en_el_Volcan_la_Malinche)
- Yocom, L. (2014). *An evaluation of fire regime reconstruction methods*. Flagstaff, Arizona, USA: Northern Arizona University.
- Yocom, L., & Fulé, P. Z. (2012). Human and climate influences on frequent fire in a high-elevation tropical forest. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1356–1364. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02216.x