



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

**RELACIÓN CLIMA-INCENDIOS EN EL NORTE Y CENTRO
DE MÉXICO: UN ENFOQUE DENDROCRONOLÓGICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

JULIÁN CERANO PAREDES

TUTOR PRINCIPAL
DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. VÍCTOR O. MAGAÑA RUEDA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM
DR. JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ
INIFAP CENID-RASPA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

Para mi esposa Rosalinda Cervantes Martínez por su amor, paciencia y apoyo en todo momento. Profesionalmente, en reconocimiento a su excelente trabajo de laboratorio, que permitió alcanzar los objetivos de esta investigación.

A mis gemelos Rafael y Julián Cerano Cervantes, por ser la energía y alegría de mi vida y mi motivo de superación.

Con amor y admiración para mis padres Rafael Cerano Vázquez y Ma. Elena Paredes Gallegos por sus consejos, apoyo y amor incondicional.

A la memoria de mis padres Benigno Cerano y Ma. De Jesús Vázquez.

A mis hermanos (Gabriel, Estela y Rafael) por todo su cariño y apoyo.

Para la familia Cervantes Martínez. En especial para la Sra. Carmen Estela Martínez Palafox por su cariño y constante apoyo.

Agradecimientos

Primeramente a **Dios**, por darme salud y fortaleza para lograr concluir una etapa más en mi carrera profesional.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por darme la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida, etapa sustancial en mi formación científica y humana. Gracias a la **Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP)** por todo el apoyo durante mis estudios de doctorado.

Un profundo agradecimiento al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el soporte económico durante los cuatro años de mis estudios de doctorado.

Al **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)** por darme la oportunidad de superarme profesionalmente y por todo el apoyo recibido para el desarrollo de esta investigación. Al **Laboratorio de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera (CENID-RASPA)** del INIFAP, por todo el apoyo para el fechado y análisis de muestras, desarrollo de cronologías de incendios y de clima.

A mi director de tesis el **Dr. Lorenzo Vázquez Selem**, por todo el apoyo y disponibilidad incondicional en el desarrollo de la presente investigación. Gracias por su confianza y estar siempre al pendiente en cada una de las etapas académicas y de investigación durante mis estudios de doctorado.

Al **Dr. José Villanueva Díaz**, por ser parte importante en cada etapa de mi carrera profesional y darme la oportunidad de iniciar y crecer como investigador en la maravillosa ciencia de la Dendrocronología. Gracias por seguir de cerca esta investigación y siempre mostrar disposición para la revisión del trabajo con valiosas sugerencias.

Al **Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda**, por su disposición y tiempo para el análisis de la relación clima-incendios y sus sugerencias que contribuyeron a mejorar la calidad del trabajo. Gracias por las recomendaciones y excelentes ideas para futuros trabajos de investigación.

Al **Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo**, por su interés y disposición para colaborar en esta investigación. Gracias por sus revisiones, comentarios y oportunas sugerencias, que sin duda mejoraron la calidad de esta investigación.

Al **Dr. Diego Pérez Salicrup**, por su disponibilidad y valioso tiempo para la revisión de este trabajo de tesis.

Un reconocimiento especial al **Dr. Peter Z. Fulé**, por enseñarme el camino de la Dendropirocronología y compartir excelentes conocimientos en trabajo de campo y análisis. Por revisar y aportar valiosas sugerencias a cada uno de los capítulos de investigación de este trabajo. Así mismo, por el apoyo recibido en mis cortas pero productivas estancias en la Universidad del Norte de Arizona, lo que permitió desarrollar con éxito esta investigación.

A la **Dra. Larissa L. Yocom**, por su amistad y apoyo en el análisis e interpretación de la relación clima-incendios durante mi estancia en la Universidad del Norte de Arizona.

Al **Dr. Vidal Guerra de la Cruz**, por el apoyo brindado para el levantamiento de información de campo en el área de estudio de Chignahuapan, Puebla, la revisión y valiosos comentarios en este capítulo de la tesis.

Un agradecimiento especial para mi amigo y colega el **M.C. Gerardo Esquivel Arriaga**, por su arduo trabajo en el levantamiento de información de campo y apoyo en trabajo de oficina durante todo el proceso de esta investigación.

Un sincero agradecimiento y reconocimiento especial a todas las personas (compañeros, estudiantes y amigos) que me apoyaron en el trabajo de campo, cuyo apoyo permitió que esta investigación concluyera en tiempo: **Osvaldo Franco Ramos, Vicenta Constante García, Gilberto Cervantes Martínez, Omar Duran Guerra, Fernando Dorantes García**.

Gracias a los compañeros y amigos **Luis Enrique Montes** y **Luis Javier Sifuentes** por su valioso apoyo en la preparación de todo el material de campo (muestras dendrocronológicas).

*La presente investigación fue realizada gracias al financiamiento de **INIFAP** a través de los proyectos:*

- 1. Estudio de la relación clima-incendios en el norte-centro de México, financiado por el fondo SEP-CONACYT.*
- 2. Reconstrucción de la frecuencia histórica de incendios y caracterización de las cargas de combustible en ecosistemas forestales del norte-centro de México, financiado por Fondos Fiscales.*

*Al financiamiento otorgado por la **Universidad Nacional Autónoma de México**, a través de los proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) con clave IN105213 y IN109216.*

ÍNDICE DE LA TESIS

Pag.

Resumen	1
Abstract	5
Capítulo 1. Introducción general	8
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Justificación.....	9
1.3. Objetivo general.....	12
1.4. Objetivos específicos.....	12
1.5. Hipótesis.....	13
1.6. Estructura de la tesis.....	14
Capítulo 2. Marco teórico	16
2.1. Registros históricos ambientales.....	16
2.2. Registros proxy.....	17
2.2.1. Documentos históricos.....	18
2.2.2. Sedimentos lacustres y marinos.....	19
2.2.3. Polen.....	19
2.2.4. Arrecifes coralinos.....	20
2.2.5. Núcleos de hielo.....	20
2.2.6. Depósitos de Neotoma.....	21
2.2.7. Anillos de crecimiento de árboles.....	21
2.3. Formación de anillos de crecimiento.....	23
2.3.1. Factores que influyen en la formación del anillo de crecimiento.....	25
2.3.2. Precipitación.....	26
2.4. Dendrocronología.....	27
2.4.1. Fundamentos.....	27
2.4.2. Desarrollo de la Dendrocronología.....	30
2.4.3. Subcampos de la Dendrocronología.....	31
2.4.4. Principio del fechado-cruzado.....	33
2.4.5. Problemas para el fechado.....	34
2.4.5.1. Anillos perdidos o ausentes.....	34
2.4.5.2. Anillos dobles o falsos.....	37
2.4.6. Sensibilidad en el crecimiento del anillo del árbol.....	39
2.5. Dendroecología.....	40
2.6. Dendropirocronología.....	41
2.6.1. Regímenes de incendios.....	41
2.6.2. Estudios de los regímenes de incendios.....	42
2.6.3. Cicatrices en el árbol.....	44
2.6.4. Fuego de tipo superficial.....	45
2.7. Reconstrucciones de la historia del fuego.....	49
2.7.1. Suroeste de los Estados Unidos.....	49
2.7.2. Norte y centro de México.....	50
2.8. Dendroclimatología.....	51
2.8.1. Reconstrucciones dendroclimáticas en México.....	51

	Capítulo 3. Metodología	54
3.1.	Recorridos de campo y selección de áreas de estudio.....	54
3.2.	Reconstrucción de la historia del fuego.....	55
3.2.1.	Métodos de campo.....	55
3.2.2.	Métodos de laboratorio.....	58
3.2.3.	Análisis de datos.....	62
3.2.4.	Relación clima-incendios.....	63
3.3.	Reconstrucción de series dendroclimáticas.....	65
3.3.1.	Métodos de campo.....	65
3.3.2.	Métodos de laboratorio.....	66
3.3.3.	Análisis de datos.....	68
3.3.4.	Cronología de ancho de anillo.....	72
3.4.	Resultados.....	72

CASOS DE ESTUDIO

Capítulo 4. Influencia del clima en el régimen histórico de incendios en el noroeste del estado de Durango, México: 1700-2008

4.1.	Introducción.....	74
4.2.	Área de estudio.....	77
4.3.	Muestreo de árboles.....	79
4.4.	Variables climáticas.....	80
4.5.	Resultados.....	81
4.5.1.	Estacionalidad de los incendios.....	84
4.5.2.	Intervalos medios de frecuencia de incendios.....	86
4.5.3.	Relación clima-incendios.....	86
4.6.	Discusión.....	92
4.6.1.	Frecuencia de incendios.....	92
4.6.2.	Estacionalidad de los incendios.....	92
4.6.3.	Cambios temporales en los regímenes de incendios.....	93
4.6.4.	Relación clima-incendios.....	95
4.6.5.	Implicaciones de manejo.....	100
4.7.	Conclusiones.....	101

Capítulo 5. Regímenes históricos de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* Lyndley en el norte del estado de Puebla, México

5.1.	Introducción.....	103
5.2.	Área de estudio.....	105
5.3.	Muestreo de árboles.....	108
5.4.	Variables climáticas.....	109

5.5.	Resultados.....	110
5.5.1.	Frecuencia de incendios.....	110
5.5.2.	Estacionalidad de los incendios.....	111
5.5.3.	Relación clima-incendios.....	113
5.6.	Discusión.....	116
5.6.1.	Estacionalidad de los incendios.....	117
5.6.2.	Frecuencia de incendios.....	118
5.6.3.	Relación clima-incendios.....	120
5.7.	Conclusiones.....	123

Capítulo 6. Efectos del clima en los regímenes históricos de incendios (1451-2013) en el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. del Parque Nacional Cofre de Perote

6.1.	Introducción.....	124
6.2.	Área de estudio.....	128
6.3.	Muestreo de árboles.....	131
6.4.	VARIABLES CLIMÁTICAS.....	132
6.5.	Resultados.....	134
6.5.1.	Régimen de incendios.....	134
6.5.2.	Cambio en la frecuencia de incendios.....	137
6.5.3.	Sincronía entre incendios.....	139
6.5.4.	Estacionalidad de los incendios.....	140
6.5.5.	Efectos del clima en la ocurrencia de incendios.....	141
6.6.	Discusión.....	145
6.6.1.	Régimen de incendios.....	145
6.6.2.	Cambio en el régimen del fuego.....	146
6.6.3.	Estación de ocurrencia de incendios.....	150
6.6.4.	Relación clima-incendios.....	153
6.7.	Implicaciones de manejo y conclusiones.....	164

Capítulo 7. Discusión y conclusiones generales

7.1.	Reconstrucción de la historia del fuego.....	167
7.2.	Estación de ocurrencia de incendios.....	168
7.3.	Reconstrucción de regímenes de incendios.....	171
7.4.	Influencia del clima en la frecuencia de incendios.....	176

Referencias		186
Anexo 1. Cronologías para el Parque Nacional Cofre de Perote.....		203
Anexo 2. Artículo publicado.....		208

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Pag.

Capítulo 1

Capítulo 2

Figura 2.1.	Sección transversal de un árbol de <i>Pseudotsuga menziesii</i> que muestra los anillos anuales de crecimiento, la variabilidad en su espesor indica la variación del clima anual.....	22
Figura 2.2.	Secuencia de cuatro anillos de <i>Pseudotsuga menziesii</i> (1871-1874) del suroeste de Nuevo México. Cada anillo de crecimiento anual se compone de madera temprana de color claro (EW) y madera tardía de color oscuro (LW) (Fotografía tomada de Griffin, 2012).....	24
Figura 2.3.	Crecimiento anual (a la izquierda) (Griffin, 2012) y estructura celular (a la derecha) de la madera de Gimnospermas (coníferas) (Schweingruber, 1996).....	25
Figura 2.4.	Patrones de crecimiento de diferentes árboles, variabilidad común del crecimiento por la influencia del clima regional, procesos ecológicos y fenómenos geológicos (Cerano <i>et al.</i> 2014).....	29
Tabla 2.1.	Subcampos de la dendrocronología. Muchos de los subcampos también tienen subtítulos que describen más específicamente la disciplina.....	32
Figura 2.5.	Representación esquemática del fechado cruzado, principio de la dendrocronología. La presencia irregular de anillos anchos y delgados permite la comparación entre muestras para determinar el año exacto de formación (Schweingruber, 1989).....	34
Figura 2.6.	a) Diagrama que ilustra la porción basal del tallo de un árbol, muestra la superficie de secciones en tres niveles que permite observar la presencia de anillos perdidos (Stokes y Smiley, 1996) y b) muestra la comparación de patrones de crecimiento entre diferentes muestras para verificar la presencia de microanillos y encontrar anillos localmente ausentes (Foto Julián Cerano).....	35
Figura 2.7.	Imagen de una sección de madera que muestra anillos de crecimiento pequeños “microanillos” y anillos perdidos (Cerano, 2008).....	37
Figura 2.8.	Imagen de un anillo doble (a) (Cerano, 2008) o falso (b) (Foto Julián Cerano).....	38
Figura 2.9.	Modelos de crecimiento, uno sensible (a) y otro no sensible (b) a las condiciones ambientales (Stokes y Smiley, 1996).....	39
Figura 2.10.	Formación de las cicatrices de incendios en la parte basal de los tallos de árboles de pino (Cerano, 2008).....	43
Figura 2.11.	Bosque de pino con evidencia de registros de incendios, los árboles muestran áreas quemadas en la base del tronco conocidas como “caras de gato” o “viejas”, formadas por la repetida incidencia de incendios y su cicatrización (Cerano <i>et al.</i> 2009).....	45
Figura 2.12.	Esquema que muestra el proceso de la extracción de una muestra con cicatrices de incendios en un bosque de Pino (Fotos Julián Cerano)....	47

Capítulo 3

Figura 3.1.	Localización geográfica de las tres áreas de estudio, una en la parte norte del país enclavada en la Sierra Madre Occidental y dos en la parte centro en el eje neovolcanico transversal.....	55
Figura 3.2.	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en el Cofre de Perote con árboles que muestra la cicatrización característica de los incendios denominada cara de gato o viejas y excelentes registros de incendios (Fotos Julián Cerano).....	56
Figura 3.3.	Esquema que muestra un bosque de <i>P. hartwegii</i> (a), árboles vivos con registros de incendios (cicatrices) (b), extracción de muestras de arbolado muerto (c) y el proceso para la extracción de una muestra con cicatrices de incendios de un árbol en pie (Fotos Julián Cerano).....	57
Figura 3.4.	Proceso de preparación de muestras en laboratorio para su análisis, que permite identificar las diferentes cicatrices y un fechado exacto de cada una de las cicatrices (Fotos Julián Cerano).....	59
Figura 3.5.	(A) Árbol chamuscado con registros de incendios, una sección parcial con excelentes registros históricos de incendios (7 cicatrices) y un acercamiento microscópico de la cicatrización del incendio de 1998, que permite definir la época en el año en que se registró el fuego (Cerano <i>et al.</i> 2015).....	60
Figura 3.6.	Categorización de la época de ocurrencia de incendios con base en la metodología propuesta por Grissino-Mayer (2001).....	61
Figura 3.7.	Toma de muestras (virutas) de árboles vivos empleando taladro de Pressler de diferentes diámetros (5 y 12 mm) y diferentes longitudes para lograr obtener la muestra desde el centro del árbol y extracción de secciones transversales de arbolado muerto con el apoyo de una motosierra (Fotos Julián Cerano).....	66
Figura 3.8.	Anillos de crecimiento anual de <i>Pinus hartwegii</i> claramente visibles posterior al proceso de pulido, la comparación de anillos entre muestras permite definir la similitud en los patrones de crecimiento, técnica que logra identificar posibles problemas de anillos perdidos y falsos y un fechado exacto de los anillos de crecimiento (Foto Julián Cerano).....	67
Figura 3.9.	Sistema de medición VELMEX con platina de fase deslizable conectado a una computadora, que permite la medición del ancho de anillo total, madera temprana y tardía (Foto Julián Cerano).....	68
Figura 3.10.	Estandarización de una serie de crecimiento con una media de 1.0 y varianza homogénea, se eliminan las tendencias biológicas y geométricas maximizando la señal climática el grafico (Gráficos Julián Cerano).....	70
Figura 3.11.	Mediciones de ancho de anillo de cada una de las diferentes muestras, se observa variabilidad común y un crecimiento exponencial negativo por efecto de la edad (a), mientras que en la figura (b) el proceso de estandarización ha eliminado el efecto de la edad y maximizado la señal climática (Gráficos Julián Cerano).....	71

Capítulo 4

Figura 4.1.	Localización del área de estudio en la parte alta de la cuenca del río Nazas al noroeste del estado de Durango, México.....	78
Tabla 4.1.	Características de las dos áreas de trabajo en la cuenca del río Nazas, Durango.....	79
Figura 4.2.	Árbol de <i>Pinus ayacahuite</i> con excelente registros de cicatrices de incendios (a) y condición del bosque mixto de pino en la parte alta de la cuenca del río Nazas (b) (Fotos Julián Cerano).....	80
Tabla 4.2.	Características de los arboles muestreados.....	82
Figura 4.3.	Historia de incendios para el noroeste del estado de Durango, que comprende el período de 1575-2008.....	83
Tabla 4.3.	Categorización de la estación de ocurrencia de los incendios registrados en los últimos 400 años en la la cuenca del río Nazas, Durango.....	85
Tabla 4.4.	Estadísticas de la distribución de los intervalos de incendios, Ciénega de la Vaca, Durango, México.....	87
Figura 4.4.	Análisis de Sobreposición de Época (SEA) de la relación entre la precipitación reconstruida invierno-primavera para la parte alta de la cuenca del río Nazas (Cerano <i>et al.</i> , 2012) y los años de incendios de los sitios PB y PA.....	88
Figura 4.5.	Análisis de Sobreposición de Época (SEA) de la relación entre el índice NIÑO 3 (Cook, 2000a) y la ocurrencia de incendios para los sitios PB y PA.....	89
Figura 4.6.	Análisis de Sobreposición de Época (SEA) de la relación entre PDSI (Cook, 2000b) y la ocurrencia de incendios para los sitios PB y PA.....	91
Figura 4.7.	Wavelet Power Spectrum (Morlet) para las series de precipitación reconstruida (Invierno-Primavera) (a) y el NIÑO 3 SST (Diciembre-Febrero) (b); y Wavelet Coherence entre las series de tiempo reconstruidas de precipitación (Invierno-Primavera) y el NIÑO 3 SST (Diciembre-Febrero) (c).....	96
Figura 4.8.	Mapas de sequía desarrollados empleando el Mexican Drought Atlas (MXDA) (Stahle <i>et al.</i> , 2016).....	99

Capítulo 5

Figura 5.1.	Localización geográfica del área de estudio, bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, Puebla.....	106
Figura 5.2.	Climograma de la precipitación y temperatura media mensual del período 1961-2000 para la estación meteorológica El Rosario. El área muestra un régimen de lluvias de verano y una escasa precipitación durante el período invierno-primavera (IMTA 2009).....	107
Figura 5.3.	(A) Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> al norte del estado de Puebla. (B) Ejemplar tomado de un tocón que muestra evidencia de registros de incendios (seis cicatrices); este tipo de muestras permite extender en	

	el tiempo la historia de incendios. (C) Sección parcial de un árbol vivo de <i>Pinus hartwegii</i> posterior a su preparación y fechado (Fotos Julián Cerano).....	108
Tabla 5.1.	Intervalos de frecuencia de los incendios para el bosque de <i>P. hartwegii</i> del ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla.....	111
Tabla 5.2.	Determinación de la estacionalidad de las cicatrices de incendios en el ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla	111
Figura 5.4.	Historia del fuego en un bosque de <i>Pinus hartwegii</i> del ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla.....	112
Figura 5.5.	Análisis de sobreposición de época (SEA), para todos los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras.....	114
Figura 5.6.	Condición anual del clima durante años de incendio (triángulos). Los tres diferentes gráficos de precipitación (A), NIÑO 3 (B) y PDSI (C) representan la reconstrucción de la variabilidad climática con base en anillos de crecimiento.....	115
Figura 5.7.	Mapas de sequía desarrollados utilizando el Atlas de Sequía para México (MXDA).....	117

Capítulo 6

Figura 6.1.	Localización geográfica del Parque Nacional Cofre de Perote en el Cinturón Volcánico Transmexicano y distribución de las áreas de estudio.....	129
Figura 6.2.	Esquema que muestra un bosque de <i>P. hartwegii</i> (a), árboles vivos con registros de incendios (cicatrices) (b), extracción de muestras de arbolado muerto (c) y el proceso para la extracción de una muestra con cicatrices de incendios de un árbol en pie (Fotos Julián Cerano).....	132
Tabla 6.1.	Características e información sobre las cicatrices de incendios de cuatro sitios en los bosques de <i>Pinus hartwegii</i> en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.....	134
Figura 6.3.	Historia de incendios en un bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México.....	136
Tabla 6.2.	Características de los intervalos de incendios en cuatro sitios en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México.....	138
Figura 6.4.	Resumen de los incendios registrados en el $\geq 10\%$ de las muestras en los tres diferentes sitios del Valle la Teta.....	139
Figura 6.5.	Resumen de los incendios registrados en el $\geq 10\%$ de las muestras en las dos grandes áreas de estudio del Parque Nacional Cofre de Perote.....	140
Tabla 6.3.	Identificación de la posición de las cicatrices de incendios en los anillos anuales de crecimiento y determinación de estación del año en que se registraron.....	141
Figura 6.6.	Análisis de sobreposición de época que muestra la relación entre el clima local (índice de ancho de anillo de árboles), SPI, NINO 3 y PDO con la ocurrencia de incendios.....	142
Figura 6.7.	Índices climáticos anuales que muestran la condición ambiental	

	durante los años de incendios (triángulos).....	144
Figura 6.8.	Historia de incendios en un bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. Fechas de los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras.....	147
Figura 6.9.	Distribución mensual de la variabilidad de la lluvia (barras) y temperatura (rojo) en el Cofre de Perote, ejes internos. La distribución en el año de las tormentas eléctricas se indica en color azul y en color verde los valores de NDVI que indican la tasa fotosintética de la vegetación o el nivel de estrés, ejes externos.....	152
Figura 6.10.	Análisis de sobreposición de época que muestra el valor medio de la variabilidad climática para años El Niño y La Niña con incendios extensos.....	154
Figura 6.11.	Condición climática del índice anual NIÑO 3 SST durante el desarrollo de incendios extensos ($\geq 10\%$, triángulos) en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.....	155
Figura 6.12.	Mapas para años específicos que detallan las condiciones climáticas dominantes de sequía, en los cuales, se reconstruyeron incendios extensos.....	156
Figura 6.13.	Condición de los índices climáticos NIÑO 3 SST y PDO durante la ocurrencia de incendios extensos (triángulos) en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.....	161
Figura 6.14.	Análisis de sobreposición de época que muestra el valor medio de la temperatura máxima, mínima y precipitación (período de datos observados de 1923-2011) durante años de incendios.....	163

Capítulo 7

Figura 7.1.	Distribución mensual de la variabilidad de la lluvia (barras) y temperatura (rojo) para las tres áreas de estudio. La distribución en el año de las tormentas eléctricas se indica en color azul y en color verde los valores de NDVI, que indican la tasa fotosintética de la vegetación o el nivel de estrés (ejes externos).....	169
Tabla 7.1.	Reconstrucción de regímenes de incendios con base en métodos dendrocronológicos para bosques mixtos de pino en México.....	172
Tabla 7.2.	Sincronía de incendios en los últimos tres siglos (fechas en color rojo) entre las áreas de estudio de la región norte y centro de México.....	179
Figura 7.2.	Efectos del ENSO en sus dos diferentes fases (La Niña y El Niño) sobre el clima de México.....	180
Figura 7.3.	Imagen que muestra los efectos de El Niño y La Niña en el clima tanto en el norte como en el centro de México, variabilidad que modula la frecuencia y sincronía de incendios.....	182
Figura 7.4.	Ejemplos de las condiciones extremas de sequía a nivel nacional para seis de los 38 años que registran sincronía de incendios entre la región norte y centro de México, atribuible a la sincronía en fase negativa del ENSO y PDO.....	184

Resumen

Los estudios dendroecológicos, específicamente la reconstrucción de la historia del fuego y su relación con el clima, son posibles gracias al fechado exacto de los crecimientos anuales y a la identificación de cicatrices originadas por disturbios en los anillos de crecimiento, lo que permite establecer la frecuencia, extensión, intensidad, año y época del año en que se presentaron los eventos causantes de disturbio. En este trabajo de investigación, se consideraron tres casos de estudio, con el objetivo común de reconstruir los regímenes de incendios y analizar la influencia del clima en su frecuencia histórica en áreas forestales del norte y centro de México.

El primer caso de estudio, se localiza en la parte alta de la cuenca del río Nazas en el estado de Durango, sitio enclavado en la Sierra Madre Occidental. En este estudio se seleccionaron dos sitios de muestreo a lo largo de un gradiente de elevación; el sitio de la parte baja (PB), se ubicó a 2560 msnm y el de la parte alta (PA) a 2960 msnm. Se colectaron muestras con cicatrices de fuego de diferentes especies de coníferas (*Pinus arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. teocote*, *P. durangensis* y *Pseudotsuga menziesii*), 46 para la PB y 22 para la PA. Se fechó un total de 50 muestras (74 %), que registraron un total de 596 cicatrices de incendio. Se logró reconstruir el régimen de incendios para los últimos 300 años (1696-2008). El 93.8% de los incendios ocurrió en primavera y 6.2% en verano. El intervalo medio de incendios (MFI) para la PB fue de 3 años al considerar todas las cicatrices y de 8.6 años para los incendios que causaron cicatrices en $\geq 25\%$ de los árboles muestreados. El MFI fue menor en el sitio de la PA, 2.6 y 6.2 años, para todos los incendios y cicatrices en $\geq 25\%$ de los árboles, respectivamente. La frecuencia de incendios para ambas áreas, se interrumpió a mediados del siglo XX. La historia de incendios de los

últimos 300 años mostró una relación significativa ($P < 0.05$) con la variabilidad de la lluvia, donde la menor precipitación y valores negativos del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), se asociaron a incendios severos. La variabilidad de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) mostró un efecto significativo ($P < 0.05$) en la frecuencia histórica de incendios. ENSO en su fase fría (La Niña), se asoció significativamente con sequías severas y explicó en gran medida la frecuencia del fuego en el sitio para los últimos tres siglos.

El segundo caso de estudio, se localiza en el centro de México, un bosque de *Pinus hartwegii* en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, en la sierra norte de Puebla. Esta área representa la región de mayor incidencia de incendios forestales en el estado. Se tomaron 43 muestras con cicatrices de incendios. Se lograron datar 40 muestras (93%) y 235 cicatrices de incendios. Se reconstruyó la historia del fuego para el período 1876-2011 (136 años). El 91.7% de los incendios se registró en la estación de primavera y el 8.3% en verano. El MFI y el intervalo de la mediana de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés) al considerar todas las cicatrices fue de 5.6 y 5.0 años, respectivamente; mientras que, para los incendios más extensos, cuyas cicatrices se registraron en el 25% de las muestras o más, los valores de MFI y WMPI fueron de 9.2 y 8.5 años, respectivamente. La presencia de incendios fue continua hasta la primera década del siglo XXI. Sin embargo, posterior a 1988 se observó una disminución en su frecuencia. Se determinó una relación positiva entre la disminución de la precipitación (sequía) y la ocurrencia de incendios. De igual manera, valores negativos de NIÑO 3 y PDSI, asociados a condiciones de sequía, han influido de manera significativa ($P < 0.05$) y positiva, respectivamente; en la modulación de la frecuencia histórica de incendios en esta región del centro de México.

El tercer caso de estudio, se sitúa en el Parque Nacional Cofre de Perote en Veracruz, que forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano. Se trabajó en dos áreas, Valle la Teta (VT) y Barranca Honda (BH), donde se colectó para ambos sitios un total de 162 muestras con cicatrices de incendios, 103 y 59, respectivamente. Se logró fechar el 100% de las muestras para VT y 86% (51) para BH. Se identificó un total de 1240 cicatrices de incendios, 869 para VT y 371 para BH. El 95% de los incendios se registró en la estación de primavera y 5% en la estación de verano. Se logró reconstruir la historia del fuego para los últimos 550 años (1461-2013). Posterior a 1973, se observó un cambio en la frecuencia de incendios, siendo la exclusión del fuego atribuible a la influencia antropogénica. Incendios extensos (registrados en $\geq 10\%$ de las muestras) ocurrieron en años más secos que el promedio. El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), NIÑO 3 de ENSO y el Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), presentaron valores significativamente bajos (sequía) durante años de incendios. Se determinó que ENSO presenta una relación significativa con la ocurrencia histórica de incendios tanto en su fase cálida El Niño (21 incendios $\geq 10\%$ de las muestras) como fría La Niña (32 incendios $\geq 10\%$ de las muestras). Sin embargo, cuando se presenta la fase fría de ENSO (La Niña) y sincroniza con la fase negativa (fría) del PDO, se produce una condición de sequía severa, donde se presentan incendios extensos. Estos resultados soportan la relación clima-incendios en bosques de altura inferida en estudios previos, y se corrobora la influencia geográfica del PDO sobre la variabilidad del clima del centro de México y en la ocurrencia de incendios.

Al analizar la frecuencia de incendios en los tres sitios de estudios, se determinó una estacionalidad común para las tres áreas, más del 90% de los incendios se han presentado históricamente en la estación de primavera. Lo anterior se sincroniza con un período de mínima precipitación y altas temperaturas. Así mismo, cambios de usos del suelo y otras acciones de disturbio en las últimas décadas han modificado la frecuencia de incendios, siendo más afectados unos sitios que otros. En los últimos tres siglos, se observó una influencia significativa de ENSO en su fase fría (La Niña) para el norte de México; mientras que para el centro del país, tanto la fase cálida (El Niño) como fría pueden ser detonantes de incendios; este comportamiento es más severo para los bosques del centro de México cuando se sincronizan en fase negativa los índices de ENSO y PDO. Este fenómeno ha modulado la frecuencia de incendios durante los últimos 550 en el Parque Nacional Cofre de Perote.

Abstract

Dendroecological studies, particularly fire history reconstructions and their relationships with climate, are feasible thanks to the capability to date annual growths to the year of formation and to identify fire scars caused by disturbances in the ring of growth, which allows the possibility to establish the frequency, extension, intensity, year of occurrence and time of the year in which such event took place. In this research project, three case studies in forest of northern and central Mexico were developed, with the objective to reconstruct fire regimes and to analyze the influence of climate on their fire frequency.

The first case study is located at the upper Nazas watershed in the state of Durango, in the Sierra Madre Occidental. For this study two sampling sites were selected along an elevation gradient; the site at the lower part (PB), was located at 2560 msnm and the site at the upper part (PA) at 2960 msnm. Samples with fire scars were collected from different conifer species (*Pinus arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. teocote*, *P. durangensis* and *Pseudotsuga menziesii*), 46 and 22 cross-sections for PB and PA, respectively. A total of 50 cross-sections (74%) were crossdated, recording 596 fire scars in total. We were able to reconstruct the fire regime for the last 300 years (1696-2008). The 93.8% of the fires occurred in spring, whereas 6.2% in summer. The mean fire interval (MFI) for PB was 3 years considering all fire scars and 8.6 years for more widespread fires (those that burned $\geq 25\%$ of the trees). The MFI was lower at the PA site, 2.6 and 6.2 years for all fires and scars recorded in $\geq 25\%$ of trees, respectively. The frequency of fires for both areas was disrupted by the middle of the 20th century. The fire history for the last 300 years showed a significant relationship ($P < 0.05$) with rainfall variability, where the lower precipitation and negative values of the Palmer Severity Drought Index (PDSI) were associated with severe

fires. The variability of El Niño Southern Oscillation (ENSO) showed a significant effect ($P < 0.05$) on the historical fire frequency. ENSO in its cold phase (La Niña) was significantly associated with severe droughts and largely explained the fire frequency at the site for the last three centuries.

The second study case is located in central Mexico, in a *Pinus hartwegii* forest in the Rinconada ejido, Chignahuapan municipality, in the Sierra Norte de Puebla. This area represents the region with the highest incidence of forest fires in the Puebla state. A total of 43 fire-scarred samples were collected. We were able to crossdate 40 samples (93%) and 235 fire scars. The history of the fire was reconstructed for the period 1876-2011 (136 years). The 91.7% of the fires were recorded in the spring season and 8.3% in summer. The MFI and Weibull median probability interval (WMPI) for all scars was 5.6 and 5.0 years, respectively. The MFI and WMPI for more widespread fires (those that burned $\geq 25\%$ of the trees) were 9.2 and 8.5 years, respectively. The presence of fires was continuous until the first decade of the 21st century. However, after 1988 a decrease in the fire frequency was detected. A positive relationship between a decrease in precipitation (drought) and the occurrence of fires was determined. Likewise, negative values of NIÑO 3 and PDSI, have been associated to dry conditions ($P < 0.05$), modulating the frequency of fires in this region of central Mexico.

The third study case is located in the Cofre de Perote National Park in Veracruz, being part of the Transmexican Volcanic Belt. We selected two areas, Valle la Teta (VT) and Barranca Honda (BH), collecting a total of 162 cross-sections with fire scars for both sites, 103 and 59, respectively. We were able to crossdate 100% of samples for VT and 86% (51) for BH. A total of 1240 fire scars were dated, 869 and 371 for VT and BH, respectively. The 95% of the fires were recorded in the spring season and 5% in the summer season. We

reconstructed the fire history for the last 550 years (1461-2013). After 1973, a change in the fire frequency was observed attributed to anthropogenic fire exclusion. Widespread fires (recorded in $\geq 10\%$ of the samples) occurred in drier than average years. The Standardized Precipitation Index (SPI), NIÑO 3 of ENSO and the Pacific Decadal Oscillation Index (PDO) showed significant low values (dry conditions) in fire years. It was determined that ENSO presents a significant relationship with the historical fire occurrence in both its warm El Niño phase (21 fires $\geq 10\%$ of the samples) and cold La Niña phase (32 fires $\geq 10\%$ of the samples). However, when the cold phase of ENSO (La Niña) was synchronized with the negative (cold) phase of the PDO, a severe drought episode occurred favoring the presence of widespread fires. This result support the relationship between climate and fires occurrence in high elevation forests inferred from previous studies, and corroborates the geographical influence of the PDO on climate variability and fire occurrence in central Mexico.

When analyzing the frequency of fires for the study sites, we determined a common seasonality for the three areas, where over 90% of fires have historically occurred in the spring season. This finding is synchronized with a period of minimum precipitation and elevated temperatures. In addition, changes in land-use and other disturbances taken place in recent decades have changed the frequency of fires, resulting in some sites being more affected than others. On the last three centuries, a significant influence of the cold phase (La Niña) of ENSO has been observed for northern Mexico; whereas in central Mexico, both the warm phase (El Niño) and the cold phase could trigger the presence of fire; this behavior is more severe for the forests in central Mexico, particularly, when the ENSO and PDO phenomenon are synchronized in their negative phase, thus, modulating the fire frequency for the last 550 years in the Cofre de Perote National Park.

Capítulo 1. Introducción general

1.1. Antecedentes

Los regímenes históricos de incendios, se pueden definir como la manifestación del fuego (originado por causas naturales o humanas) a través de cierta frecuencia y su variación en tipo, extensión, intensidad y severidad; regularidad o irregularidad de afectación y época del año en que se presenta (Agee, 1993; White y Pickett, 1985; Wright, 1996). Los regímenes de fuego en los bosques pueden ser estudiados a través de observación directa, reportes, imágenes de satélite, entrevistas con pobladores de las áreas forestales y la interpretación de la estructura y composición de la vegetación, además del uso de técnicas que permiten reconstruir el historial de perturbaciones de un sitio a través de la datación de restos de carbono en sedimentos y por métodos dendrocronológicos (Arno y Snack, 1977).

La dendrocronología comparada con otros métodos de datación, es la técnica de mayor precisión y resolución, ya que permite fechar al año exacto la ocurrencia de eventos ecológicos de los últimos siglos y a veces hasta varios miles de años (Bull, 2007). La dendroecología es una rama de la dendrocronología que utiliza anillos de árboles para estudiar eventos ecológicos como incendios y brotes de insectos. La dendroecología fue desarrollada como campo de estudio por Theodor Hartig y Robert Hartig a finales del siglo XIX en Alemania (Schweingruber, 1996). En los Estados Unidos, la dendroecología no se desarrolló sino hasta la década de 1970 con los primeros trabajos propuestos por Harol Fritts (Fritts, 1971).

Desde los años setenta, la dendroecología se ha expandido (Fritts y Swetnam, 1989) y una de las principales aplicaciones ha sido la dendropirocronología, el estudio de la historia del fuego (Dieterich y Swetnam, 1984). La dendropirocronología utiliza la datación de los anillos de crecimiento de los árboles y el conteo de las cicatrices de fuego registradas en los anillos de crecimiento, para estudiar el pasado y presente de los incendios forestales con fines de reconstrucción de los regímenes de incendios (Grissino-Mayer, 2001).

Los estudios sobre los efectos del fuego en los árboles, se han llevado a cabo desde principios del siglo XX (Clements, 1910; Show y Kotok, 1924; Presnall, 1933). Sin embargo, fue hasta la década de 1980 cuando las historias de incendios se hicieron más comunes en el suroeste de los Estados Unidos, lo que condujo a una mejor comprensión de los patrones espaciales y temporales del fuego en muchos ecosistemas de pino (Madany *et al.*, 1982; Dieterich y Swetnam, 1984; Swetnam *et al.*, 1999). Swetnam y Baisan (1996) demostraron cómo los registros dendrocronológicos se pueden usar para examinar el fuego a través de múltiples escalas espaciales. La ocurrencia de incendios en el suroeste de los Estados Unidos se explica a menudo por patrones climáticos (Swetnam y Betancourt, 1990), especialmente a gran escala como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Swetnam *et al.*, 1999).

1.2. Justificación

El fenómeno ENSO, es un mecanismo de forzamiento climático que afecta la precipitación y ocurrencia de incendios forestales en muchas partes del mundo (Swetnam y Betancourt, 1990; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2008). En las últimas

décadas el incremento de la actividad de incendios se ha atribuido al cambio climático global y se pronostica un aumento alrededor del mundo (Westerling *et al.*, 2006). La fuerte vinculación entre el fuego y el clima (Swetnam y Betancourt, 1990), pone de manifiesto la relevancia de conocer la relación clima-incendios en los distintos tipos de ecosistemas forestales.

A pesar de que al fuego se le ha reconocido como una parte importante de la ecología de los bosques, en términos de investigación ha recibido poca atención en México (Smith y Young, 1987; Rodríguez, 2001). La historia del fuego en los bosques mexicanos, es relativamente desconocida; no se cuenta con una red de reconstrucciones de regímenes de incendios fundamentadas en técnicas dendrocronológicas que permitan conocer la frecuencia histórica del fuego y su relación con el clima (Rodríguez, 2001). Los primeros trabajos sobre reconstrucción de la historia del fuego y su relación con el clima en nuestro país, se desarrollaron a finales de la década de 1990 (Fulé y Covington, 1997, 1999).

Los pocos estudios desarrollados sobre historia del fuego, se han concentrado principalmente en el norte del país; a la fecha, se ha determinado que para algunas zonas, los incendios regulares y frecuentes continúan hasta el presente (Cerano *et al.*, 2010; Fulé *et al.*, 2011), y en otras, se registra un cese abrupto de incendios atribuido al aumento del cambio y uso del suelo, a la construcción de caminos o brechas forestales, aprovechamiento de madera y a menudo se asocia con la formación de ejidos (Fulé y Covington, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Yocom *et al.*, 2010).

Los estudios de historia del fuego en los bosques tropicales de alta elevación y en los

bosques tropicales en general, son escasos (Martin y Fahey, 2006). En los últimos años se han logrado generar dos estudios en bosques de *Pinus hartwegii* para el centro de México; uno en el Pico de Orizaba, Veracruz (Yocom y Fulé, 2012) y otro más en la sierra norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016). Estas investigaciones representan los únicos trabajos sobre reconstrucción de regímenes de fuego fundamentados en técnicas dendrocronológicas, que han permitido conocer la historia del fuego y su relación con el clima. Los bosques de México combinan dos aspectos importantes, uno, el potencial que existe para estudiar los regímenes de incendios y determinar la influencia del clima en su frecuencia histórica; y dos, la necesidad de generar este tipo de conocimiento. Un mejor entendimiento del papel ecológico de los incendios en cada uno de los diferentes ecosistemas permitirá un adecuado manejo del fuego y conservación de estos importantes ecosistemas de alta biodiversidad y proveedores de servicios ecosistémicos, que explican la existencia de grandes asentamientos humanos, particularmente en el centro de México.

La presente investigación busca incrementar la red de estudios dendroecológicos, generar mayor conocimiento sobre los regímenes históricos de fuego y su relación con el clima en los bosques del norte y centro de México. Para tal efecto, se consideraron tres casos de estudio: (1) los bosques mixtos de la parte alta de la cuenca del río Nazas en Durango, (2) el bosque de *Pinus hartwegii* enclavado en la Sierra Norte de Puebla, en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, y (3) los bosques de altura de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. Este trabajo representa una nueva perspectiva del estudio de los regímenes de incendios (frecuencia, extensión, intensidad, estacionalidad, sincronía, etc.) en México, y cómo analizar la influencia del clima en su frecuencia en una escala de tiempo extensa, a través de técnicas dendrocronológicas.

1.3. Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación fue, reconstruir los regímenes de incendios y analizar la influencia del clima en su frecuencia histórica en áreas forestales del norte y centro de México, con base en métodos dendrocronológicos.

1.4. Objetivos específicos

1. Seleccionar áreas con potencial para estudios dendroecológicos en el norte y centro de México.
2. Reconstruir la frecuencia histórica de los incendios (regímenes históricos) en áreas forestales del norte y centro de México.
3. Determinar si existe un cambio en la frecuencia histórica de incendios durante el siglo XX en las áreas forestales objeto de estudio y si ese cambio es atribuible al clima o a la influencia humana.
4. Desarrollar series dendrocronológicas en el centro de México, que permitan analizar la variabilidad climática en una escala de tiempo más amplia y determinar si dicha variabilidad históricamente ha modulado la frecuencia e intensidad de los incendios.
5. Analizar la influencia del clima en el comportamiento histórico del fuego.
6. Determinar la influencia de fenómenos de circulación general como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en la frecuencia histórica e intensidad de los incendios para la región norte y centro de México.

1.5. Hipótesis

1. Los regímenes del fuego de alta frecuencia que históricamente mantuvieron el funcionamiento ecológico de ecosistemas forestales mantenidos por el fuego, en la parte norte y centro de México, han cambiado su frecuencia de manera importante durante el siglo XX.
2. El cambio en la frecuencia de incendios en las últimas décadas del siglo XX, obedece principalmente a la influencia antropogénica.
3. El régimen histórico de los incendios está vinculado de manera importante a la variabilidad climática interanual y multianual (ciclos húmedos y secos), que a su vez, es modulada en gran medida por patrones circulatorios de amplia escala como el fenómeno climático ENSO.

1.6. Estructura de la tesis

Capítulo 1. Se dan a conocer antecedentes sobre trabajos de reconstrucción de los regímenes de incendios con base en técnicas dendrocronológicas a nivel internacional y las aplicaciones de esta ciencia en México, la importancia de este tipo de estudios, la poca información sobre este tipo de investigaciones y el potencial de los bosques mexicanos para desarrollar estudios dendroecológicos. Así mismo, se plantean los casos de estudio y se enlista el objetivo central y los objetivos particulares de la investigación.

Capítulo 2. Se presenta el marco teórico, que describe los registros proxy, enfatiza sobre el registro proxy “anillos de crecimiento de árboles” empleado en este estudio, se describen las bases y aplicaciones de la dendrocronología, ciencia empleada para estudiar los registros ambientales de los anillos de crecimiento. Así mismo, se indican estudios sobre la reconstrucción de regímenes de incendios y reconstrucciones climáticas, trabajos desarrollados con base en técnicas dendrocronológicas.

Capítulo 3. Se describen los materiales y métodos dendroecológicos y dendroclimáticos aplicados en esta investigación, métodos desarrollados en otros países que se aplican a nivel mundial y su adaptación para el estudio de los bosques de coníferas que crecen en el norte y centro de México.

Capítulo 4. Se presenta el primer caso de estudio de esta investigación, la reconstrucción de los regímenes de incendios para los últimos 400 años y su relación con la variabilidad del clima en bosques mixtos de pino en la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. Los resultados de este capítulo fueron enviados a una revista internacional para su publicación (*Fire Ecology Journal*) (Cerano *et al.*, en prensa).

Capítulo 5. Se presenta el segundo caso de estudio, la reconstrucción de los regímenes de incendios para los pasados 136 años y se analiza la relación clima-incendios en un bosque de *Pinus hartwegii* en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, enclavado en la sierra norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016). Los resultados de este capítulo fueron publicados en la revista internacional *BOSQUE*, indexada en la Web of Science, SCORPUS, SciELO, entre otros (Ver Anexo 2, al final de la tesis).

Capítulo 6. Se presenta el tercer caso de estudio, se analiza la reconstrucción de los regímenes de incendios generada con base en técnicas dendrocronológicas para los últimos 550 años (1451-2013) y su relación histórica con la variabilidad del clima en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.

Capítulo 7. Se presenta la discusión y conclusiones generales de la investigación, donde se dan a conocer los aportes más significativos, comparación de resultados entre las diferentes áreas de estudio y un análisis sobre la influencia del clima en la frecuencia de incendios a escala local y regional. Así mismo, con base en los resultados generados, se plantean alternativas de manejo y recomendaciones de trabajos futuros.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Registros históricos ambientales

El interés por conocer las variaciones climáticas que tuvieron lugar en los inicios de nuestro desarrollo cultural y su concreta ubicación temporal, siempre ha constituido uno de los aspectos fundamentales de las investigaciones sobre el medio ambiente. En la actualidad se están dando a conocer importantes avances en estas cuestiones, tanto en lo referente a las variaciones climáticas y ecológicas como a la edad cronológica en que se produjeron (Rivera, 2004).

Dado que el calentamiento global es un tema de gran importancia mundial, se han elaborado diversos modelos de circulación general o modelos climáticos globales (General Circulation Models, o Global Climate Models, GCMs), para examinar los posibles cambios provocados por la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Sin embargo, debido a que el cambio climático no se ha dado de la misma forma en todas las regiones del mundo, resulta importante conocer qué es lo que sucede en cada una de ellas, lo que servirá para realizar ajustes más finos a los modelos (Díaz, 2002). A falta de una vasta cobertura temporal y espacial de registros instrumentales, se pueden utilizar diversos registros históricos ambientales llamados también “proxys”.

Los primeros registros de temperatura medidos con termómetros son de finales del siglo XVII y principios del XVIII en el oeste de Europa. Con el tiempo, los registros climáticos en todo el mundo se han venido incrementando, pero desafortunadamente no

homogéneamente. Para México la mayoría de los registros climáticos son muy cortos, apenas iniciaron a mediados del siglo XX (IMTA, 2009).

2.2. Registros proxy

Los registros proxy son sistemas naturales que dependen del clima, que estuvieron presentes en el pasado y que aún existen, por lo que se puede derivar información de ellos. Estos registros contienen una señal climática, la cual puede ser débil embebida en mucho “ruido” provocada por el efecto de otras influencias no climáticas. Por ejemplo, en el caso de árboles, la ocurrencia de terremotos, erupciones volcánicas, avalanchas, incendios, o bien efectos biológicos como la edad del árbol, presencia de plagas y enfermedades, y competencia, entre otras. Para extraer la señal paleoclimática o ecológica de los datos proxy, primero se debe hacer una calibración del registro. La calibración involucra el uso de registros climáticos modernos y los materiales proxy, para entender cómo y cuán extenso son los materiales proxy dependientes del clima. El análisis de estos registros se basan en el principio de uniformidad, el cual asume que las relaciones modernas observadas han operado de la misma forma a través del tiempo (Bradley, 1999).

Entre los principales tipos de registros proxy, se encuentran: datos históricos, sedimentos lacustres y marinos, polen, arrecifes coralinos, núcleos de hielo, depósitos de rata del género *Neotoma* y anillos de crecimiento de los árboles. Este último proxy es el empleado para el análisis de la relación clima-incendios en las áreas de estudio del norte y centro de México.

2.2.1. Documentos históricos

Es posible obtener información sobre el medio ambiente del pasado, tanto cualitativa como cuantitativa, a partir del análisis adecuado de fuentes documentales. La obtención de información a partir de registros históricos se basa en la relación de los efectos que provocaron algunos fenómenos naturales en los diversos sitios y grupos sociales en que se presentaron en distintas épocas. Fenómenos climáticos tales como sequías prolongadas, heladas e inundaciones, abatieron de manera drástica las actividades productivas provocando desabasto, escasez y carestía, o modificando las características del paisaje. Para México, una buena fuente de información que permite conocer más sobre el periodo colonial, se encuentra en los registros de alhóndigas, pósitos y registros de diezmos. En general estos registros muestran lo que pasaba en las grandes ciudades de la Nueva España y su entorno, por lo que para muchas regiones no se documentó este tipo de información (Florescano y Swam, 1995). Sin embargo, la información histórica es de gran valor ya que da cuenta de fenómenos con precisión anual o subanual (por ejemplo, García Acosta *et al.*, 2003).

A finales del siglo XX aparecen ya las gacetas y los periódicos que ofrecen una posibilidad más de obtención de datos sobre fenómenos naturales. Existen otras fuentes de información que pueden ampliar el abanico histórico, como podrían ser los registros de tributos los informes de virreyes, diarios de viajeros o crónicas de soldados y religiosos (García y Escobar, 2000).

2.2.2. Sedimentos lacustres y marinos

El fondo de algunos lagos y mares revelan variaciones estacionales en el contenido y color de las capas sedimentarias, estratificaciones llamadas varvas, que comúnmente pueden verse a simple vista. Los investigadores barrenan núcleos de los fondos de las cuencas para analizarlos. Los sedimentos se forman de materiales que fueron producidos en el cuerpo de agua o que han sido lavados de las tierras cercanas entre los que se encuentran restos de organismos. El análisis de los depósitos revela variaciones en los isótopos de oxígeno del material calcáreo causado por fluctuaciones en el volumen del océano, que reflejan temperaturas globales y periodos glaciales. Las variaciones de patrones climáticos pueden derivarse tanto por la identificación de especies estenotérmicas como por análisis radioisotópico (Gates, 1993).

2.2.3. Polen

Los granos de polen producidos por las plantas tienen formas distintivas que pueden utilizarse para identificar el tipo de planta de la que provino. El análisis de los granos de polen preservados en capas de sedimentos que se forman en los fondos marinos o lacustres, indican qué tipo de planta creció en el tiempo en el que se depositó el sedimento y de esta forma, se pueden inferir las condiciones climáticas. Israde *et al.* (1998) quienes trabajaron en el lago de Cuitzeo, Michoacán, generaron información paleoambiental desde hace 35,000 años A.C. Otro trabajo es el realizado por Castañeda (1998) quien al encontrar restos de mamut en la cuenca del Lerma, México, y mediante análisis palinológico, pudo inferir el ambiente en el que vivió esa especie.

2.2.4. Arrecifes coralinos

Los corales se desarrollan en mares cuya temperatura superficial es mayor a los 22-23° C, por lo que su distribución se limita a las regiones tropicales. El esqueleto del coral está compuesto de carbonato de calcio con diferencias de densidad debido a variaciones en la tasa de crecimiento, la cual está relacionada con las condiciones de temperatura y nubosidad, por lo que los corales exhiben bandas estacionales de crecimiento. El carbonato contiene oxígeno e isótopos de oxígeno, así como metales traza, que pueden usarse para determinar la temperatura del agua en la que el coral creció. Los registros de temperatura se usan para reconstruir el clima durante el periodo en que el coral vivió, el cual puede llegar a ser de cientos o miles de años (Andrews, 1996). Investigaciones de este tipo se han realizado por Dunbar (1998) quien reconstruyó la variabilidad climática relacionada con El Niño Oscilación del Sur (ENSO) desde 1853 en la región tropical del este del Océano Pacífico.

2.2.5. Núcleos de hielo

En lo alto de las montañas o en los casquetes polares, el hielo se acumula en capas anuales producidas durante las nevadas. El hielo provee un registro único, no solo de precipitación, sino de temperatura del aire, composición atmosférica, la ocurrencia de erupciones volcánicas y variaciones pasadas de la actividad solar (Bradley, 1999). El grosor de la capas varía de acuerdo con la temperatura. Se han llegado a contar capas anuales que llegan 6000 años atrás en un núcleo mayor a 2 km de profundidad, con una resolución no mayor a 50 años (Greene, 1995).

2.2.6. Depósitos de Neotoma

En los ambientes áridos, la rata de campo del género *Neotoma* construye su madriguera en lugares muy protegidos. Estas madrigueras tienen áreas de depósitos donde se van acumulando capas de materiales que traen de su alrededor. Los materiales incluyen hojas, polen, tallos, huesos de animales, partes de insectos, rocas, etc. que se preservan en muy buena condición al estar en lugares secos y protegidos, además de estar endurecidos por la orina del ratón, que les da una apariencia cristalina oscura. De esta forma, se pueden encontrar depósitos antiguos que han persistido a cambios ambientales y que revelan muestras de comunidades bióticas pasadas. Las muestras se fechan con la ayuda del análisis de isótopos de carbón para tener un registro del cambio de vegetación y del clima a través del tiempo (Finley, 1990). Con base en la composición de la vegetación, resultado del análisis de los nidos de *Neotoma* spp. en el desierto de Sonora, Van Devender (1990), describe evidencias de cambio climático durante el Cuaternario tardío.

2.2.7. Anillos de crecimiento de árboles

Un anillo, es una banda de crecimiento anual en el árbol, que ha registrado información climática y ecológica cada año a lo largo su vida (Figura 2.1). Cada anillo es el resultado de un crecimiento anual que inicia en primavera y culmina en verano o principios de otoño, de tal manera que un anillo de crecimiento se presenta cada año (Fritts, 1976). Si se considera a cada árbol como un instrumento capaz de registrar todos los fenómenos que ocurren en el medio que lo rodea, la dendrocronología no es otra cosa que la ciencia que permite interpretar o leer ese registro ambiental.

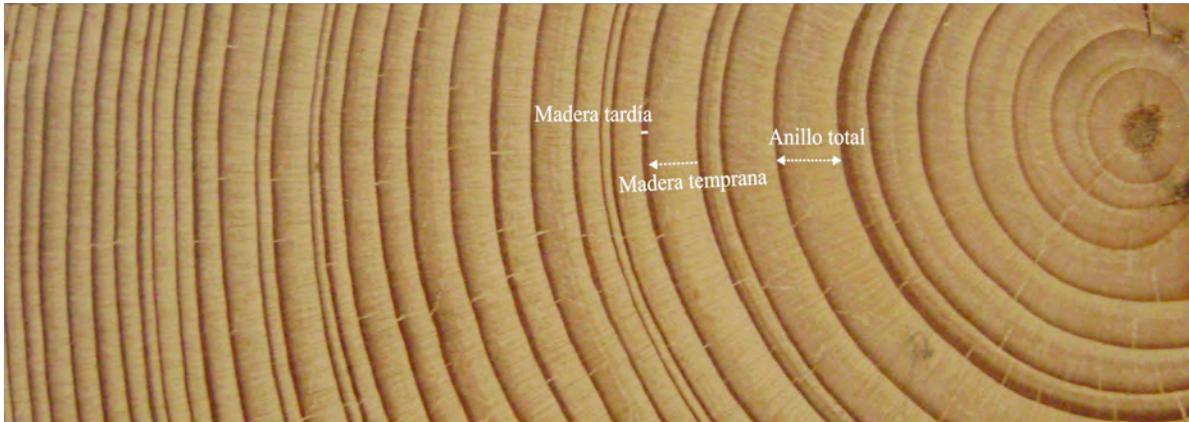


Figura 2.1. Sección transversal de un árbol de *Pseudotsuga menziesii* que muestra los anillos anuales de crecimiento, la variabilidad en su espesor indica la variación del clima anual (anillos anchos representan condiciones de buena precipitación y anillos delgados condiciones de escasez de lluvia o sequía) registrada a lo largo de la vida del árbol (Foto Julián Cerano).

Existen muchos registros indirectos (fuentes alternas de información de los fenómenos naturales) del clima y el medio ambiente, pero la dendrocronología proporciona la datación más confiable, con la más alta exactitud y precisión que cualquiera de los registros proxy, ya que su resolución es anual. La técnica del fechado cruzado o crossdating (sincronía del patrón de crecimiento entre anillos anchos y delgados para demostrar la datación entre árboles) que fue desarrollada por A. E. Douglass a principios de 1900, se utiliza ahora como un método de control o verificación de la datación de otros registros proxy que forman crecimientos regulares (a veces anuales), tales como núcleos de hielo, corales, anillos en conchas de almeja, entre otros (Black *et al.*, 2005).

2.3. Formación del anillo de crecimiento

En las Gymnospermas, las traqueidas de la madera temprana tienen un diámetro radial mayor y una membrana secundaria más fina que las que se diferencian más tardíamente (Gemmell, 1969). Un mayor diámetro en la traqueida en la madera temprana es una respuesta a la función principal que desempeña: el transporte. La madera tardía, por su parte, cumple dos funciones: el transporte y la resistencia mecánica, por lo que, un diámetro reducido junto con una pared gruesa puede evitar embolismos (Bernal y Terrazas, 2000).

Los términos madera temprana y madera tardía, se usan respectivamente para distinguir entre el crecimiento inicial menos denso y el subsiguiente crecimiento con mayor densidad formado durante la secuencia del crecimiento radial (Figura 2.2). La diferencia estructural entre la madera tardía de una estación y la madera temprana del año siguiente, es la base para el reconocimiento de la naturaleza periódica de producción de madera, tal como se ve claramente en el anillo anual (Figura 2.2). La transición de madera temprana a tardía está asociada con dos aspectos experimentalmente separables, pero que coinciden normalmente, la diferenciación del xilema celular, disminución del tamaño de la célula y aumento del grosor de la pared celular (Esau, 1965; Stokes y Smiley, 1996; Fritts, 1976).

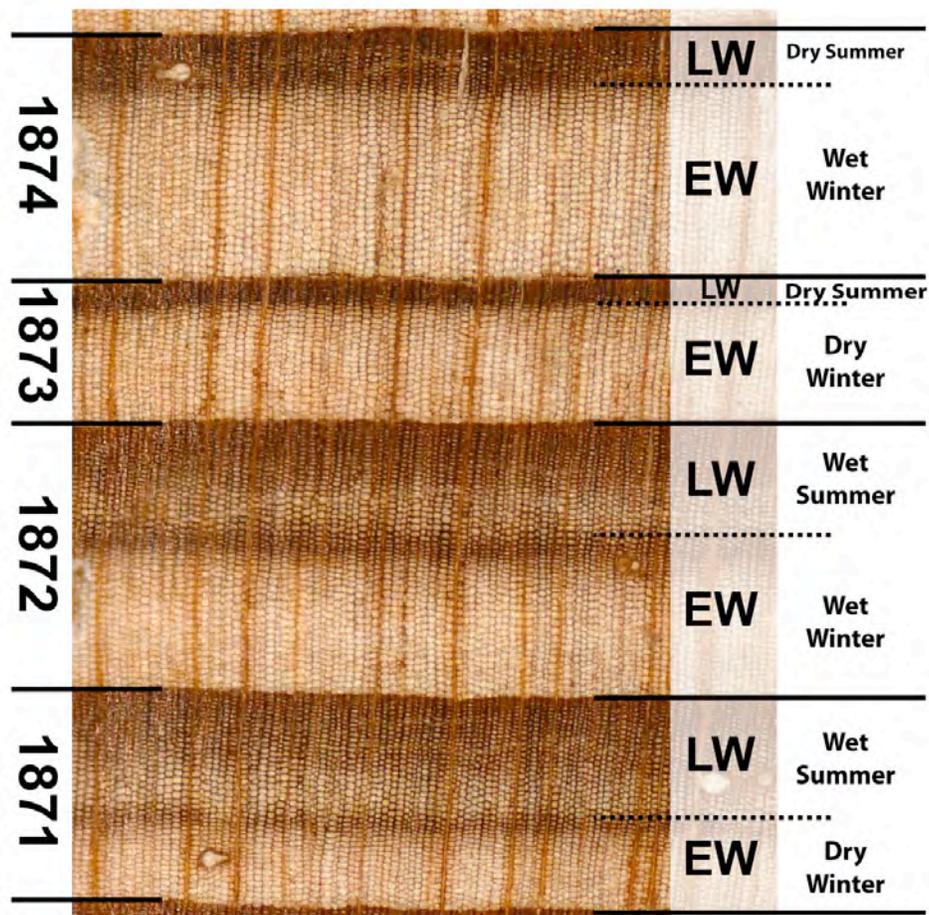


Figura 2.2. Imagen que ilustra una secuencia de cuatro anillos de *Pseudotsuga menzeisii* (1871-1874) del suroeste de Nuevo México. Cada anillo de crecimiento anual se compone de madera temprana de color claro (EW) y madera tardía de color oscuro (LW). Los años 1871 y 1872 contienen variaciones de densidad intra-anual conocidas como "anillos falsos", que probablemente están relacionados con la humedad del suelo reducida en el período pre-monzón de mayo-junio. Para el año 1871, la variabilidad de la anchura de EW, es una función de la precipitación de la estación fría y la variabilidad independiente de la anchura de LW, que corresponde a la precipitación de la estación cálida. La variabilidad de la anchura independiente para EW y LW en 1872, corresponden a las variaciones de humedad específicas de la estación (Fotografía tomada de Griffin, 2013).

El anillo anual de crecimiento del xilema, se forma al exterior del que se formó en el año anterior y se divide en dos partes, madera temprana y madera tardía (Figura 2.3). Las células (traqueidas) de la madera temprana se forman al inicio de la estación de crecimiento, durante un periodo rápido de crecimiento radial. En la madera tardía la

actividad del cambium decrece y las traqueidas presentan paredes gruesas con cavidades progresivamente más reducidas. El contraste de las últimas células con las primeras del año siguiente es lo que delimita a un anillo (Schweingruber, 1996).

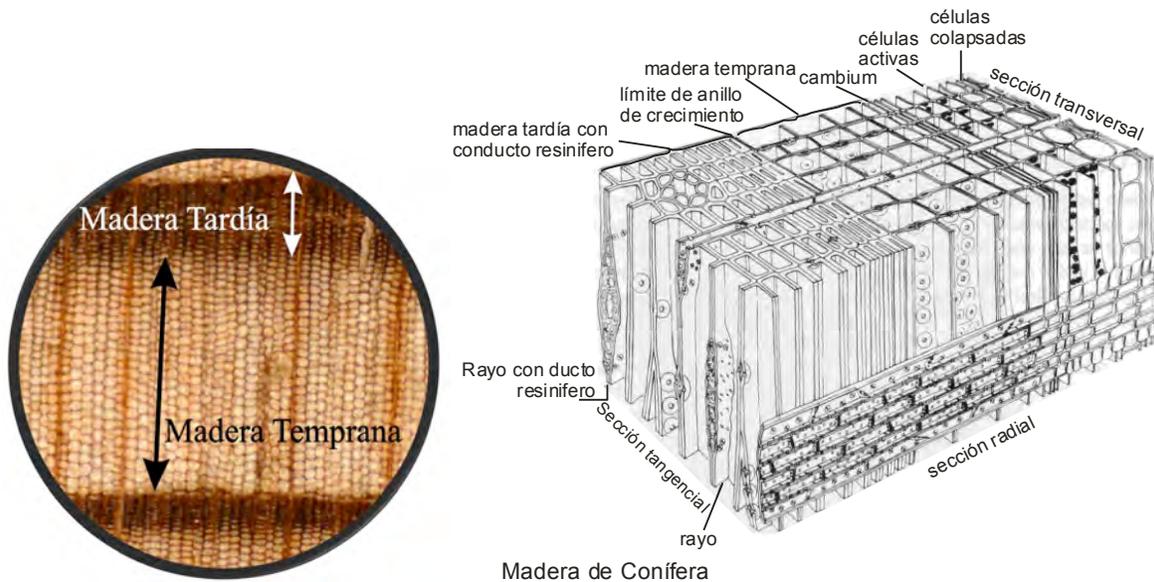


Figura 2.3. Crecimiento anual (a la izquierda) (Griffin, 2013) y estructura celular (a la derecha) de la madera de Gimnospermas (coníferas) (Schweingruber, 1996).

2.3.1. Factores que influyen en la formación del anillo de crecimiento

Fritts (1976) menciona que la relación entre el clima y el ancho de anillos ocurre debido a que el crecimiento de la planta está influenciado por diversas condiciones ecológicas, las cuales varían a través de su ciclo de vida y en ciertos períodos pueden afectar el crecimiento y la forma de muchas estructuras de la misma. Las condiciones limitantes específicas que pueden afectar el crecimiento de la planta pueden clasificarse como factores externos e internos. Siendo los factores externos: agua, temperatura, luz, dióxido de

carbono, oxígeno y sales minerales, y los factores internos: cantidad de nutrientes disponibles, minerales, reguladores de crecimiento, enzimas y agua.

Los factores ambientales, como un fotoperiodo corto y la sequía, disminuyen el alargamiento de los brotes y activan la formación de la madera tardía, en condiciones de fotoperiodo largo se forma madera temprana y esto se correlaciona con el contenido de auxina elevado en el brote que crece rápidamente (Larson, 1962).

Estudios realizados en *Pinus resinosa* demuestran que el engrosamiento de la pared en la formación del leño tardío está asociada con la mayor disponibilidad de productos de la fotosíntesis a medida que madura el follaje del brote. En general, la transición del leño temprano al tardío está asociada con dos sucesos: (1) la repentina disponibilidad de productos de la fotosíntesis para la zona del cambium, asociado con la maduración de las hojas de los brotes del año y (2) disminución del nivel de auxina cuando el crecimiento en extensión cesa en la copa (Gordon y Larson, 1968).

La actividad del cambium vascular se asocia estrechamente con la cantidad de fotosintatos disponibles, el metabolismo hormonal del árbol y éstos con el fotoperiodo, la disponibilidad de agua y la temperatura, que modifican en conjunto la tasa fotosintética en los árboles (Larson, 1962; Torelli *et al.*, 1986; Venugopal y Krishnamurthy, 1987).

2.3.2. Precipitación

Aunque el crecimiento estacional total del árbol es el resultado de muchos factores interrelacionados, tanto genéticos como ambientales, la precipitación es el factor ambiental

que principalmente domina, limitando el crecimiento de especies arbóreas en el suroeste americano (Stokes y Smiley, 1996; Stahle *et al.*, 2009; Griffin *et al.*, 2013b) y norte de México (Villanueva *et al.*, 2007; Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2009; Santillán *et al.*, 2010; Cerano *et al.*, 2011). La variación en la precipitación total anual es fuerte, y a su vez, esta variabilidad es registrada por los árboles, desarrollando patrones de anillos anchos y estrechos, modelos básicos que permiten el fechado cruzado entre árboles que crecen a muchos kilómetros de distancia, lo que fundamenta la ciencia de la dendrocronología.

2.4. Dendrocronología

2.4.1. Fundamentos

La palabra dendrocronología se deriva del griego: *dendros* que significa árbol, *cronos* tiempo y *logos* conocimiento. La dendrocronología es la ciencia que fecha los anillos anuales de crecimiento de los árboles, analizando su estructura e investigando la información registrada en ella para aplicaciones a cuestiones ambientales e históricas (Tomazello *et al.*, 2001). Permite reconstruir la variabilidad climática y los cambios ambientales del pasado empleando los anillos de crecimiento anual de los árboles (Fritts, 1976), basándose en el hecho de que el crecimiento radial de las especies leñosas es rítmico y de forma anual, de acuerdo a condiciones ambientales determinadas por la estación del año (Stokes y Smiley, 1996).

La dendrocronología es una de las técnicas de registro ambiental más importantes para una variedad de procesos ambientales naturales y para monitorear los cambios causados por el hombre al medio ambiente como la contaminación (Speer, 2010). De acuerdo con Stokes y

Smiley (1996), la dendrocronología se hace posible por el hecho que la variabilidad del crecimiento anual es visible en muchos árboles al comparar los patrones de crecimiento. En lugar de que todos parezcan igual, los anillos exhiben modelos de crecimiento característicos (Figura 2.4). Cuatro condiciones son necesarias para que estos modelos sean utilizados en el fechado de una muestra.

1. La primera condición es que los árboles deben presentar sólo un anillo para cada estación de crecimiento; lo que se conoce como anillo anual. No pueden usarse especies que desarrollen más de un anillo durante una estación de crecimiento para el propósito del fechado.
2. La segunda condición es que, aunque el crecimiento estacional total es el resultado de la interrelación entre muchos factores (entre ellos genéticos y ambientales), sólo un factor ambiental debe dominar, limitando el crecimiento. En el suroeste de los Estados Unidos y norte de México este factor limitante que domina es la precipitación.
3. La tercera condición es que el crecimiento limitado por el factor climático debe variar fielmente en intensidad de año a año y los anillos anuales resultantes reflejen tal variación en su grosor. Aunque la anchura del anillo no es directamente proporcional a la precipitación, el anillo debe ser delgado en años de sequía y notoriamente más ancho en años lluviosos.
4. La cuarta condición es que la variable ambiental que limita el crecimiento debe ser uniforme y efectiva sobre un área geográfica extensa. Si esto no fuera así, las cronologías compuestas tendrían que ser desarrolladas para cada área pequeña.

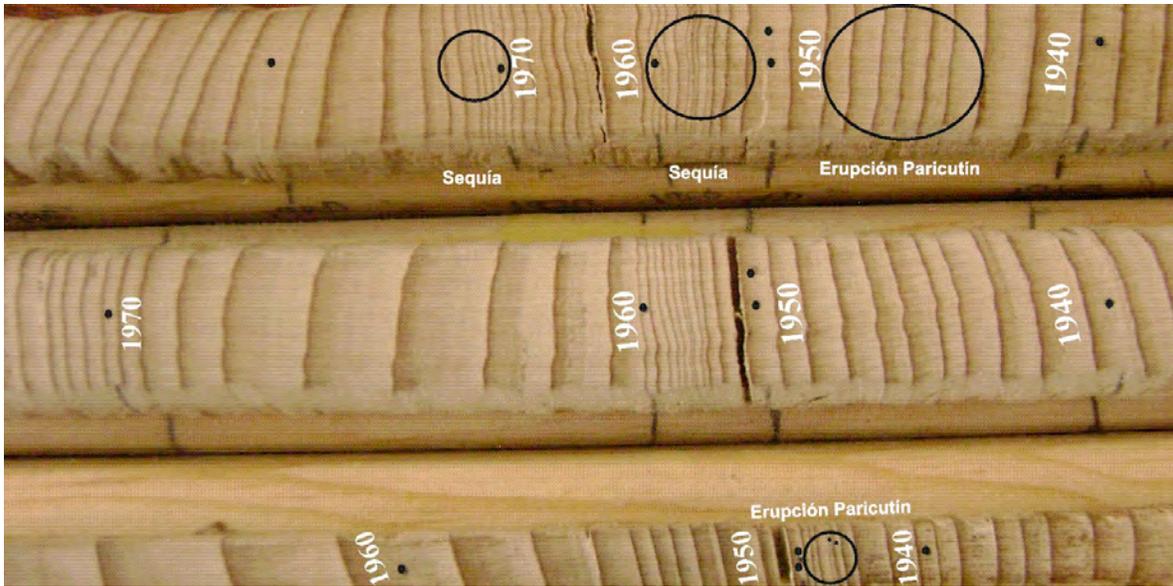


Figura 2.4. Imagen que muestra los patrones de crecimiento de diferentes árboles de *Abies religiosa* del Pico de Tancítaro, Michoacán. La variación en el crecimiento se debe a la influencia del clima regional, procesos ecológicos y fenómenos geológicos (Cerano *et al.*, 2014). Los diferentes árboles muestran variabilidad común en el crecimiento por efecto de las bajas precipitación a inicio de las décadas de 1970 y 1950. Así mismo, una disminución en el crecimiento posterior al año 1943 está asociado a los efectos de la erupción del volcán Parícutín.

En las regiones templadas, donde hay una estación de crecimiento definida, los árboles generalmente producen un anillo anual de crecimiento, que registra las condiciones climáticas y ecológicas imperantes de ese año (Figura 2.4). De esta forma, se pueden presentar patrones en el ancho, densidad y composición isotópica de sus anillos, que reflejan las variaciones climáticas (Figura 2.4). Así, con el análisis dendrocronológico es posible fechar con seguridad años individuales y se puede obtener un registro continuo de más de mil años con información paleoclimática de alta frecuencia (Fritts, 1976). Este tipo de registro proxy es el utilizado en el desarrollo del presente estudio.

Al obtener las muestras de árboles vivos, las cronologías generadas son tan antiguas como la longevidad de la especie utilizada. Sin embargo, las cronologías se pueden extender en el

tiempo, cuando el patrón de los anillos de crecimiento de muestras de madera muerta obtenidas de tocones, troncos fósiles, o construcciones arqueológicas donde hayan utilizado troncos, coincida con parte de la cronología conocida a partir de madera viva (fechaado cruzado) y de esta manera poder asignar las fechas a los anillos de crecimiento (Figura 2.5). Entre las cronologías más largas del mundo se puede citar la de *Pinus longaeva* Edm. en California con 8400 años; la de *Picea/Larix* en Europa con una duración cercana a los 6000 años; la de *Quercus* de 7250 años también en Europa; la de *Austrocedrus* en Argentina y Chile con 1100 años y *Limboedrus* en Australia con 700 años, entre otras (Schweingruber, 1987). En años recientes en México, se ha desarrollado la cronología más extensa a la fecha con base en los crecimiento anuales de *Taxodium mucronatum*, una cronología de 1238 años (Stahle 2011).

2.4.2. Desarrollo de la Dendrocronología

Las primeras observaciones que relacionaron el ancho de los anillos de crecimientos de los árboles con el clima datan de mediados de 1400, y fue el propio Leonardo da Vinci quien observó la relación entre los crecimientos anuales de los árboles y la variabilidad del clima (Sarton, 1954; Corona, 1986).

En el año 1901, Andrew E. Douglass, conocido como “el padre” de la dendrocronología, observó que los anillos expuestos en un tronco cortado de un pino en Flangstaff, Arizona EUA, exhibían variaciones en el ancho. Se preguntaba si los árboles de Arizona eran influenciados más por la humedad disponible que por la competencia dentro del rodal y si la carga de humedad tenía un efecto de correlación sobre el ancho de los anillos. Douglass analizó que si esto fuera así, los años secos deberían registrarse como anillos delgados y

podría usar el ancho de los crecimientos como una prueba para un registro de largo alcance del clima en el tiempo. No fue sino hasta 1911 que Douglass reconoció el verdadero significado de sus observaciones.

De esta manera estableció el cofechado, un procedimiento que él reconocía podía ser aplicado en áreas donde el crecimiento de un anillo es frecuentemente limitado por el clima. Observó dos importantes implicaciones en su descubrimiento. La primera, que el cofechado podría ser usado como una herramienta cronológica para identificar el año calendario exacto en que se desarrollaron los anillos de crecimiento, al estudiar el patrón de anillos anchos y delgados. Para esto se requiere que el año del último anillo sea conocido y que las variaciones relativas de los anillos sean observadas en muchos árboles. Los modelos de crecimiento de anillos anchos y delgados en sí representan un registro de las condiciones ambientales sobre una región. La segunda, que las variaciones del ancho de algunos de los anillos se pueden atribuir a las condiciones locales del hábitat de los árboles, pero una gran parte de la variación se puede observar en todos los árboles y refleja cambios que ocurren sobre toda la región (Fritts, 1976).

2.4.3. Subcampos de la Dendrocronología

Dentro de la dendrocronología han sido desarrollados muchos subcampos que posteriormente han sido nombrados manteniendo la base de la palabra “dendro” y añadiendo un prefijo secundario para describir el campo específico que se estudia (Tabla 2.1; Speer, 2010).

Tabla 2.1. Subcampos de la dendrocronología. Muchos de los subcampos también tienen subtítulos (escritos en negritas) que describen más específicamente la disciplina.

Subcampo	Descripción
Dendroarqueología	<p>Datación de restos arqueológicos. Las muestras de anillos de árboles provienen de vigas y postes de construcciones arqueológicas, son fechadas para conocer la fecha de construcción de las viviendas. La posición de las vigas en la construcción pueden ser usadas para estudiar la sincronización de la construcción y expansión de la vivienda, esto permite iniciar a conocer el comportamiento de las personas de esta cultura. La correlación con una cronología maestra regional puede ayudar a conocer la procedencia arqueológica e histórica de la madera.</p>
Dendroclimatología	<p>Desarrollo de registros del pasado. Las muestras de los árboles pueden proporcionar registros a corto y largo plazo sobre la variabilidad climática, registros tan extensos como la longevidad de los árboles. Generalmente se reconstruyen índices de temperatura, precipitación y sequía, aunque todo lo que afecta el proceso de crecimiento de los árboles, como el número de días nublados, la humedad relativa o la fuerza del viento, pueden reconstruirse también si tienen un crecimiento limitado por estas variables. La información procedente de la Dendroclimatología ha aportado información importante sobre el cambio climático del pasado y nos ha ayudado a comprender el futuro del clima. Este subcampo también incluye la Dendrohidrología que es la reconstrucción del nivel del agua o flujos de ríos, aunque a menudo ésta es separada como una propia subdisciplina.</p>
Dendroecología	<p>Debido a que los árboles son una característica funcional importante de muchos ecosistemas, pueden utilizarse como un registro natural de procesos ecológicos, como el movimiento de la línea de árboles (tree-line), procesos sucesionales a través del establecimiento y muerte de árboles, ocurrencia de incendios, ataque de insectos y movimiento de especies arbóreas invasoras.</p> <p>Dendropirocronología (Ocurrencia de incendios) Dendroentocronología (Brotos de insectos) Dendromastecología (Fructificación en árboles)</p>
Dendrogeomorfología	<p>Datación de fenómenos geomorfológicos/geológicos del pasado. La estructura vertical de un árbol le permite recolectar la mayor cantidad de luz mientras crece recto. Cuando es afectado por algún fenómeno geomorfológico, la inclinación y la formación de madera de reacción resultante (anillos de crecimiento más gruesos producidos para enderezar el tallo del árbol) permite reconstruir la edad del fenómeno perturbador. También la muerte de los árboles o el establecimiento se pueden utilizar para fechar fenómenos geológicos tales como deslizamientos de tierra flujos de lodo, actividad sísmica a lo largo de fallas (Dendrosismología), actividad glacial (Dendroglaciología) o eventos volcánicos (Dendrovolcanología).</p>

Dendroquímica

Uso anillos de árboles como monitores de contaminación o elementos en el suelo y aire. Los árboles hacen uso de los iones y cationes diluidos en el agua que absorben del suelo y los gases procedentes de la atmósfera. Estos productos químicos se depositan en la madera que se forma en el tallo, las raíces y ramas de los árboles. La concentración de estos compuestos puede emplearse como un registro de contaminación y disponibilidad de nutrientes. Los **isótopos estables** también se pueden medir en la estructura de la madera para reconstruir la temperatura pasada, la humedad y la fuente de agua o las condiciones de crecimiento de los árboles.

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon dos subcampos de la Dendrocronología, la **Dendroecología** (específicamente la **Dendropirocronología**) para la reconstrucción de la historia de incendios; y la **Dendroclimatología** para la reconstrucción de la variabilidad climática.

2.4.4. Principio del fechado-cruzado

El principio de fechado cruzado o crossdating es el principio básico de la dendrocronología (Figura 2.5). Es la herramienta principal por la cual se determina el año exacto de crecimiento de cada anillo anual. Sin un adecuado fechado, con un simple conteo de anillos, es probable que se produzcan errores debido a anillos localmente ausentes o falsos. El fechado-cruzado es imprescindible cuando se comparan las mediciones de anchura de anillo con fenómenos anuales tales como datos meteorológicos. Sin la datación anual exacta de los anillos de los árboles, la calibración precisa es imposible, la cronología presentará un desfase en el fechado por uno o más años (Speer, 2010).

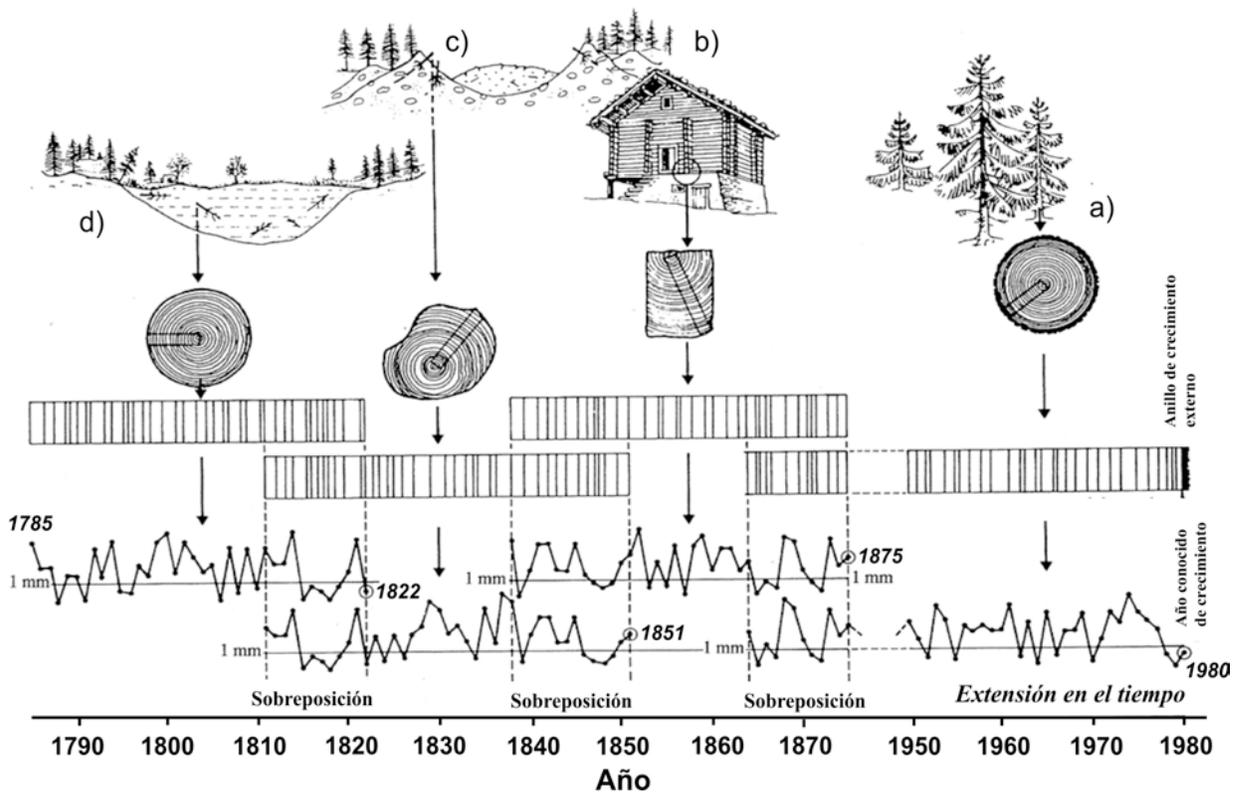


Figura 2.5. Representación esquemática del fechado cruzado, principio de la dendrocronología. La presencia irregular de anillos anchos y delgados permite la comparación entre muestras para determinar el año exacto de formación de cada anillo al hacer coincidir los crecimientos internos de los árboles vivos (a) con los crecimientos externos de vigas de casas (b), troncos muertos (c) y enterrados o semienterrados (d). Las muestras de edad conocida y desconocida se pueden organizar en orden cronológico y con base en la similitud de los patrones de crecimiento es factible extender en el tiempo las series dendrocronológicas para propósitos de reconstrucción climática (Schweingruber, 1983).

2.4.5. Problemas para el fechado

2.4.5.1. Anillos perdidos o ausentes

Las hormonas de crecimiento (como la auxina y la citoquinina) desencadenan la división celular, la elongación celular y el desarrollo del fruto. Durante años de buenas condiciones ambientales, las hormonas de crecimiento se producen en abundancia en el meristemo apical y son transportadas hacia la parte baja del tallo por el floema del árbol, iniciando el crecimiento a lo largo del cambium. En años estresantes, la producción insuficiente de la

hormona de crecimiento puede fallar en iniciar el crecimiento de algunas partes del tallo, especialmente cerca de la base del árbol. Los resultados de este fenómeno son anillos localmente ausentes que sólo están presentes en ciertas regiones del tallo (Figura 2.6a). Las hormonas del crecimiento tienden a moverse de la punta de las ramas a las puntas de las raíces, de modo que en un árbol es más probable que falten anillos cerca de su base (Speer, 2010).

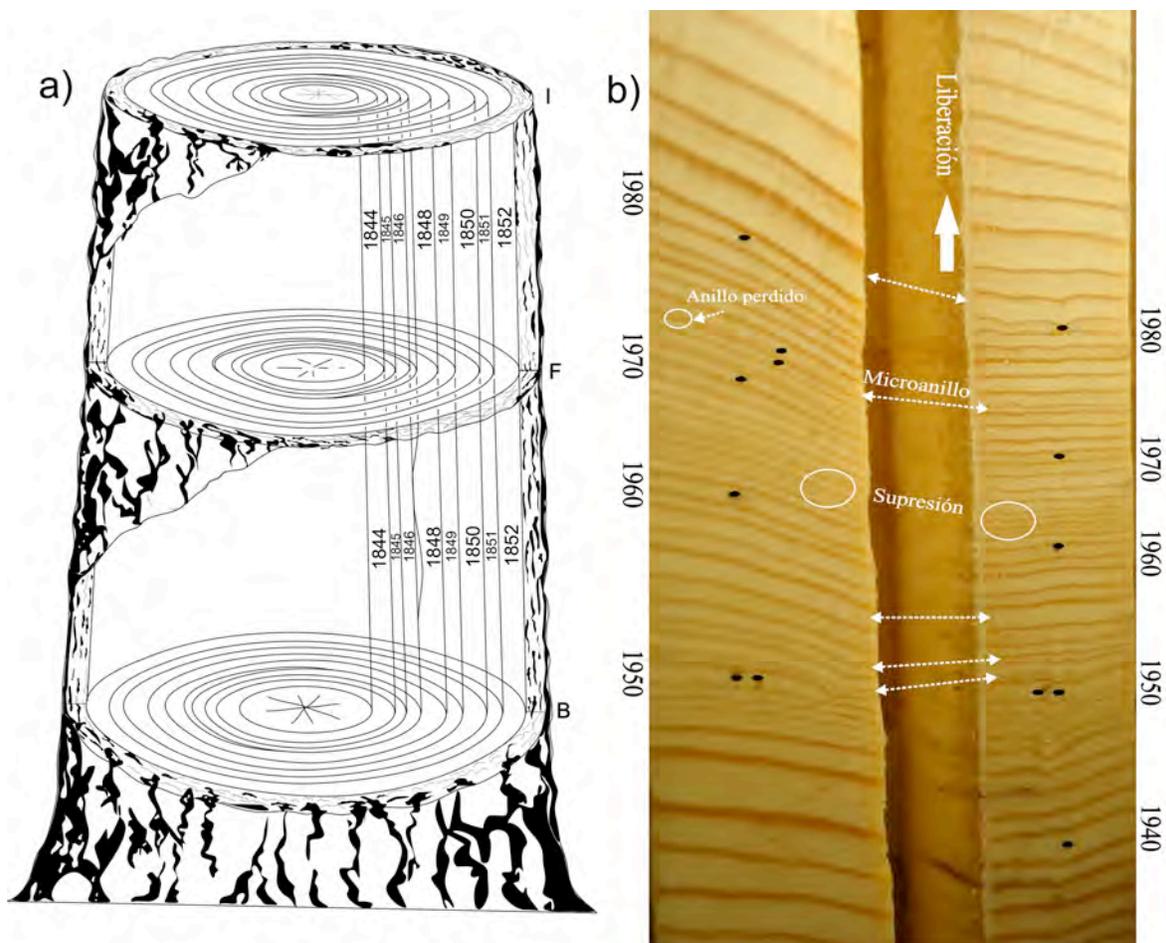


Figura 2.6. a) Diagrama que ilustra la porción basal del tallo de un árbol, muestra la superficie de secciones en tres niveles, cada uno de los anillos es conectado con una línea vertical. El anillo representado por el año 1847 está ausente en la sección inferior, aparece como un lente entre B-F y aparece como anillo pequeño en la sección F-I (Stokes y Smiley, 1996). b) Comparación de patrones de crecimiento entre diferentes muestras para verificar la presencia de microanillos y ubicar anillos localmente ausentes (Foto Julián Cerano).

Un problema que se presenta en el proceso de fechado cruzado es la ausencia de uno o varios anillos anuales en el árbol donde fue tomada la muestra. Un anillo se compara a una estructura geométrica en forma de cono largo y delgado. El espesor de este cono no es uniforme a lo largo y ancho del tallo, por lo cual las anchuras relativas de los anillos a probar de cualquier lugar variarán ligeramente (Figura 2.6a). Los problemas se presentan, cuando los anillos se desarrollan durante años muy secos (Stokes y Smiley, 1996).

Un anillo se forma anualmente, pero en años de crecimiento limitado, este anillo no puede observarse en cada punto a lo ancho del cono, lo que se conoce como “efecto de lente” (Figura 2.6a). Durante ciertos años, el crecimiento en el árbol probablemente sólo ocurra en puntos de tensión, como el lado de la pendiente de un tronco o en un punto cerca y bajo las ramas. Dado que éstas son las áreas que normalmente se evitan utilizar para muestrear, es posible que en una muestra ciertos anillos no pueda verse. Estos anillos “perdidos” pueden descubrirse fácilmente durante el proceso de fechado cruzado al comparar varios individuos anillo por anillo (Figura 2.6b). Los patrones de crecimiento de los anillos se comparan anillo-por-anillo y esto permite detectar la sección donde un anillo está perdido en una de las muestras (Stokes y Smiley, 1996).

Por medio del fechado cruzado pueden localizarse anillos perdidos en las muestras (Figura 2.7); sin embargo, algunas muestras presentan crecimientos muy suprimidos y con muchos anillos que no se aprecian claramente, probablemente no fechables. Un punto importante es que no todos los anillos en las muestras son fechables (Stokes y Smiley, 1996).

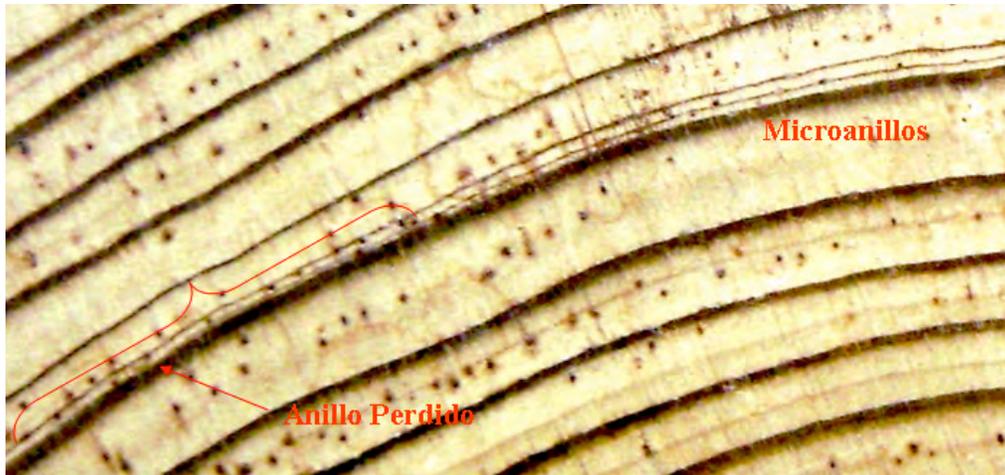


Figura 2.7. Imagen de una sección de madera que muestra anillos de crecimiento pequeños “microanillos”, los crecimientos suprimidos comúnmente en determinada parte de una sección transversal se pueden perder (Cerano, 2008).

2.4.5.2. Anillos dobles o falsos

Otra anomalía que se presenta en el proceso de fechado es la ocurrencia ocasional de “anillos dobles” (Figura 2.8a) o “falsos anillos” (Figura 2.8b) en la viruta o sección transversal. Los dos términos se usan indistintamente porque el efecto es el mismo. Hay varias maneras posibles de descubrir anillos falsos. Frecuentemente, la madera tardía última en formarse en un anillo falso, no se delinea claramente o no presenta un cambio abrupto con la madera temprana, y la madera tardía gradualmente se mezcla con la madera temprana de color claro (Figura 2.8a y b). Esta combinación gradual en el borde exterior de un anillo falso, es el contrasta con el cambio abrupto de la madera tardía a la madera temprana en anillos normales. Esta es la mejor característica para distinguir anillos falsos y resulta fácil de detectar con una lupa en una superficie bien preparada.

Si una sección transversal está disponible, un anillo que presente este problema puede observarse alrededor de la circunferencia entera. Si la madera tardía es de circunferencia discontinua, es un anillo falso (Figura 8a). Con mayor amplificación otros detalles de diagnóstico se pueden notar. A veces la madera temprana de células delgadas puede verse completamente a través de la falsa madera tardía (Stokes y Smiley, 1996).

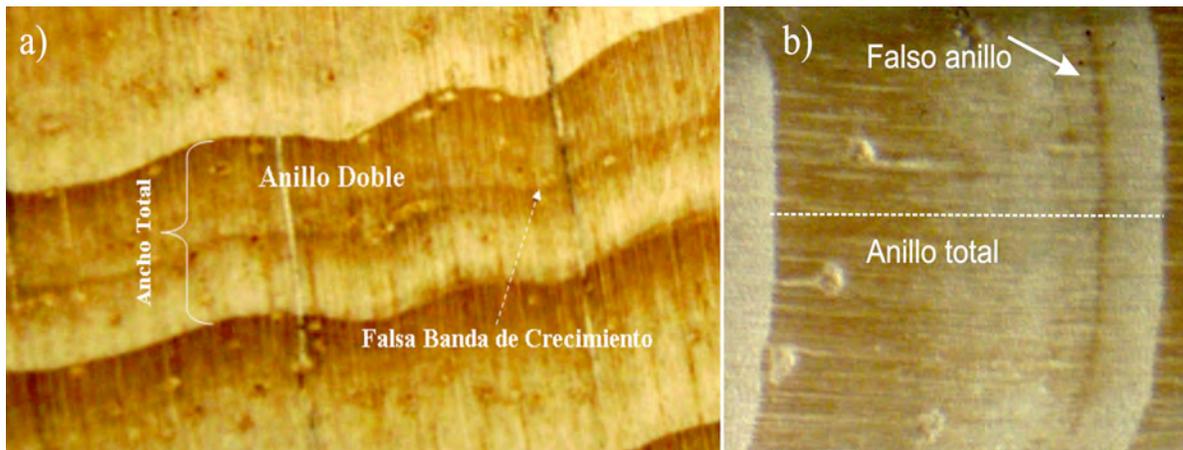


Figura 2.8. En un anillo doble (a) (Cerano, 2008) o falso (b) (Foto Julián Cerano), se desarrolla una banda oscura que a simple vista indica un anillo de crecimiento. La diferencia entre un anillo verdadero y otro, es el cambio abrupto de madera oscura (tardía) que indica el final del período de crecimiento y la madera clara (temprana) del nuevo crecimiento, mientras que en un anillo doble o falso se aprecia la combinación de ambas porciones de madera, no existe un limite claro entre madera temprana y madera tardía.

En muestras con conductos de resina, comúnmente uno puede observar que la madera tardía falsa termina en un conducto que lo parte en dos, mientras la verdadera madera tardía rodea el conducto y lo incorpora en el anillo anual (Figura 2.8a). Cuando estos métodos de identificación fallan, la forma más común de descubrir anillos falsos es hacer la comparación de gráficos de crecimiento o comparar muestras anillo por anillo, primero entre muestras del mismo árbol y posteriormente entre árboles distintos (Stokes y Smiley, 1996).

2.4.6. Sensibilidad en el crecimiento del anillo del árbol

Se define como el grado de variación anual en el crecimiento de los anillos, que se presentan como anillos anchos y delgados. El factor más común que limita el crecimiento es la lluvia, que de año a año se muestra muy variable y es responsable de la variación anual (Figura 2.9a). Árboles con alta sensibilidad en el crecimiento son los mejores individuos para fines dendrocronológicos (Stokes y Smiley, 1996).

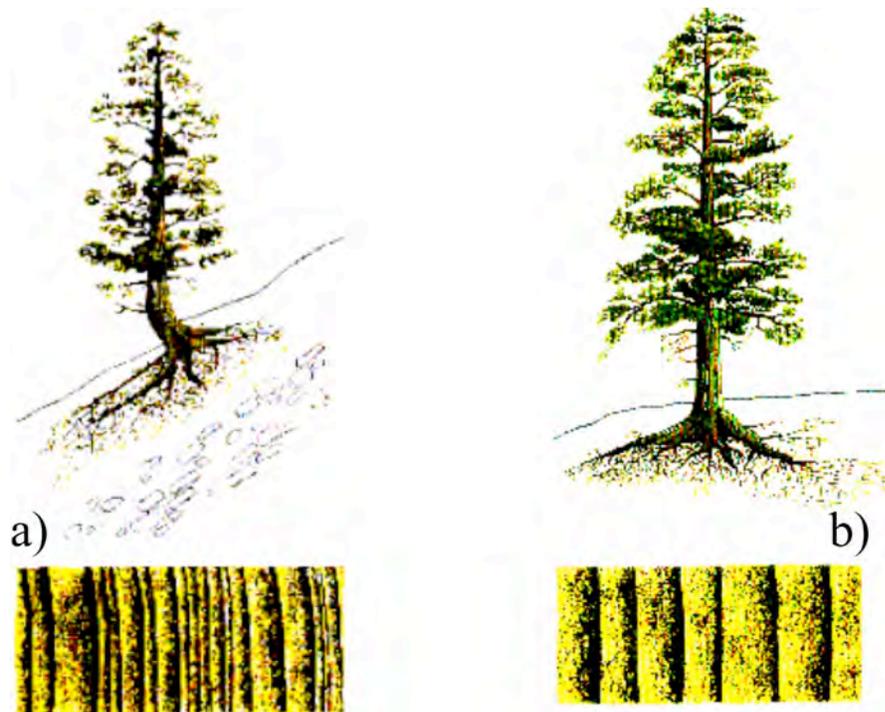


Figura 2.9. Diferentes modelos de crecimiento, uno sensible (a) y otro no sensible (b) a las condiciones ambientales (Stokes y Smiley, 1996).

Se define como un grado bajo de variación interanual; es decir, el ancho de los anillos es similar durante muchos años consecutivos; en este caso, el factor lluvia que limita el crecimiento es muy similar de año a año (Figura 2.9b). El emplear muestras de

crecimientos no sensibles pueden dificultar el fechado, este tipo de muestras son poco útiles para reconstrucciones climáticas (Stokes y Smiley, 1996).

La inspección de anillos bajo un microscopio, puede proporcionar una idea de la influencia del clima en el desarrollo del crecimiento radial. Un espécimen con mayor sensibilidad ha estado limitado por factores ambientales, el árbol más sensible exhibirá variación en el grosor de los anillos cercanos (Figura 2.9a). El dendrocronólogo se refiere a individuos con esta variabilidad en anchura del anillo como sensibles y a aquellos sin variabilidad de anchura como no sensibles (Figura 2.9b). Tales fluctuaciones en anchura de los anillos pueden ser estimadas cualitativamente por inspección visual de los anillos, o calcularse las medidas de ancho y expresarse como una estadística llamada sensibilidad, que es una medida de las diferencias relativas en anchura entre los anillos adyacentes (Fritts, 1976).

2.5. Dendroecología

La dendroecología utiliza anillos de árboles fechados al año exacto para estudiar eventos ecológicos como incendios y brotes de insectos. La dendroecología fue desarrollada como campo de estudio entre finales del siglo XIX (por Theodor Hartig y Robert Hartig) y la primera mitad del siglo XX (con Bruno Huber) en Alemania (Schweingruber, 1996) y posteriormente en los Estados Unidos en la década de 1970 con los primeros trabajos de Fritts (1971). Desde entonces ha mostrado gran expansión (Fritts y Swetnam, 1989), por ejemplo, en el estudio de la historia del fuego (Dieterich y Swetnam, 1984), brotes de insectos (Swetnam *et al.*, 1985; Lorimer y Frelich, 1989), brotes de patógenos (Welsh, 2007) e historia de perturbaciones endógenas (Abrams y Nowacki, 1992).

2.6. Dendropirocronología

Una de las ramas de la dendroecología es la dendropirocronología, que utiliza la datación de los anillos de crecimiento de los árboles para estudiar el pasado y presente de los incendios forestales, reconstrucción de los regímenes de incendios (Grissino-Mayer, 2001).

2.6.1. Regímenes de incendios

Los regímenes históricos de incendios se pueden definir como la manifestación del fuego (originado por causas naturales o humanas), a través de cierta frecuencia y su variación en tipo, extensión, intensidad y severidad; regularidad o irregularidad de afectación, época del año en que se presenta o temporalidad y el sinergismo con otros tipos de perturbación (Agee, 1993; White y Pickett, 1985; Wright, 1996). El estudio de los regímenes de incendios en una comunidad vegetal, proporciona información fundamental acerca de su funcionamiento (Medina *et al.*, 2000) ya que su diversidad, composición y estructura se deben tanto a las condiciones del medio físico como a los regímenes históricos de perturbación (Wright, 1996).

De manera simplificada, el rango de variación en el régimen de incendios en un ecosistema, depende en gran medida de la frecuencia de eventos de fuego, ya que ésta afecta a otras dos variables, la severidad y la extensión. Por ejemplo, intervalos largos pueden provocar mayor severidad e incrementar la mortalidad de plantas y formar claros, y en la extensión de los incendios a consecuencia de la acumulación de combustibles. A intervalos más cortos estos efectos se disminuyen (Swanson *et al.*, 1994).

2.6.2. Estudio de los regímenes de incendios

Los regímenes de fuego en los bosques pueden ser estudiados a través de la observación directa, el análisis de reportes sobre áreas afectadas a través del tiempo, la obtención de información mediante entrevistas con pobladores de las áreas forestales, la toma de datos sobre indicadores de los efectos del fuego y la interpretación de la estructura y composición de la vegetación, además del uso de técnicas que permiten reconstruir el historial de perturbaciones de un sitio a través la datación de restos de carbono en sedimentos y métodos dendrocronológicos (Arno y Snack, 1977; Heinselman, 1981; Jardel, 1991; Agee, 1993; McKenzie, 2004).

Con la ayuda de la dendropirocronología podemos analizar la frecuencia de los incendios mediante el conteo de las cicatrices de fuego presentes en los anillos de crecimiento de los árboles (Arno y Snack, 1977; Agee, 1993; Wright, 1996). Estas cicatrices se forman cuando el fuego es lo suficientemente intenso, o tiene un tiempo de residencia lo suficientemente largo como para penetrar la corteza y matar parte del cambium (cuando se alcanza una temperatura mayor a 61°C, Figura 2.10a). Si el árbol sobrevive al incendio, comenzará a cubrir la parte afectada mediante el crecimiento (Figura 2.10b), de manera que la cicatriz quedará grabado en el árbol el año en que fue quemado (Agee, 1993).

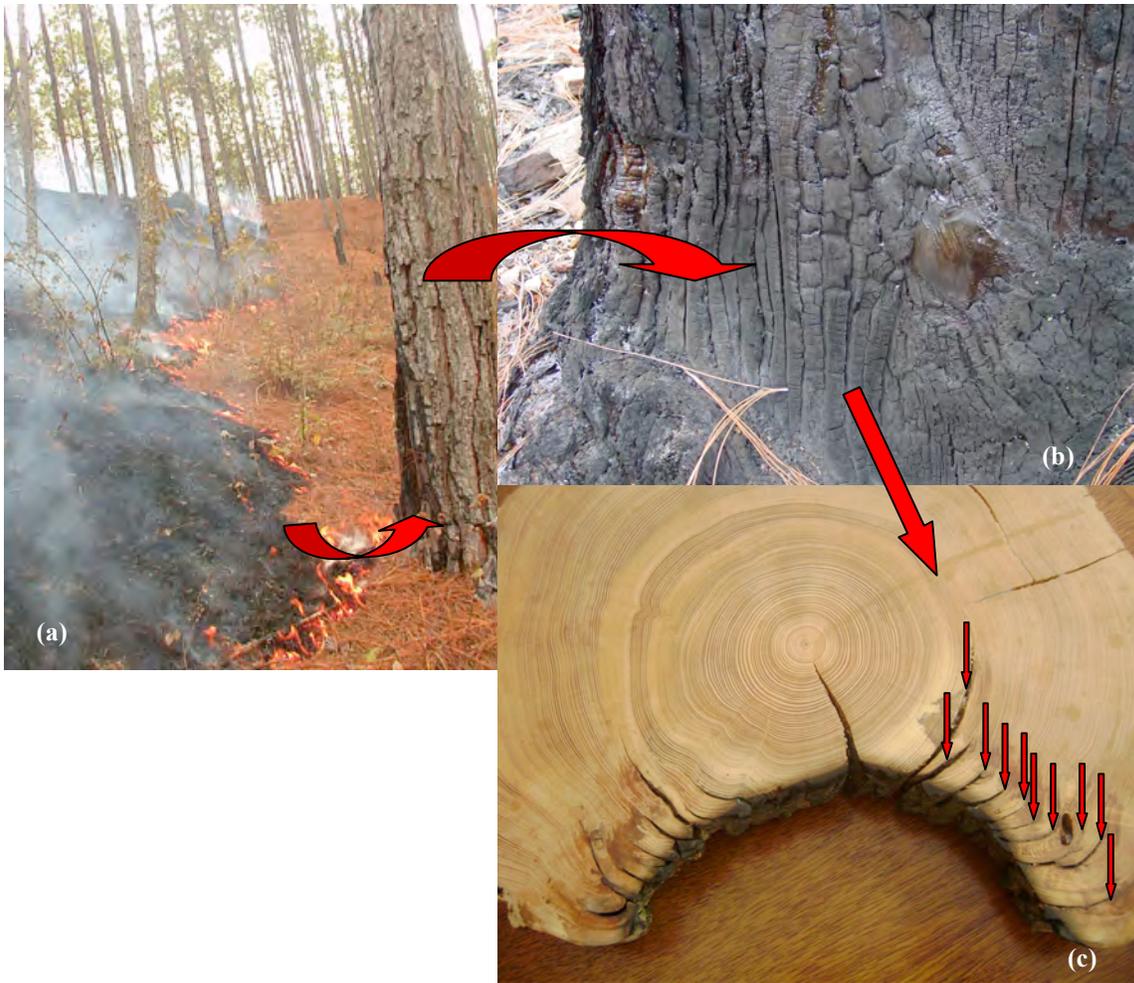


Figura 2.10. Formación de las cicatrices de incendios en la parte basal de los tallos de árboles de pino. Cuando el fuego quema la corteza y parte del cambium (a), en la parte quemada del tronco se inhibe el crecimiento del árbol y se forma una cicatriz (b); la incidencia de nuevos incendios formará nuevas cicatrices, localizadas en la sección transversal del tallo de árboles afectados por el fuego (c). La lectura de los anillos de crecimiento anuales y las cicatrices de fuego (indicadas por las flechas), permite datar los incendios y analizar su frecuencia histórica (Cerano, 2008).

Las cicatrices que deja el fuego en varios árboles de un sitio pueden ser utilizadas como señal de incendios históricos. Otros factores como heridas provocadas por la caída de troncos o ramas de árboles aledaños, el daño de insectos barrenadores o el picoteo de pájaros carpinteros, por ejemplo, pueden producir también cicatrices. Sin embargo, las cicatrices de fuego presentan restos de carbón que permiten diferenciarlas (Figura 2.10c).

2.6.3. Cicatrices en el árbol

Varios tipos de fenómenos ecológicos pueden dejar cicatrices en los árboles que proporcionan un registro de eventos para el dendrocronólogo. Una perturbación comúnmente estudiada es el fuego (Figura 2.11a y b), que causa cicatrices en el tronco cuando parte del cambium es destruido por el calor excesivo durante un incendio superficial (Swetnam y Baisan, 1996).

El fuego afecta el patrón de crecimiento de los anillos de los árboles de diferentes maneras. De acuerdo con el grado y la extensión del daño en el tallo, el cambium reacciona de una manera particular. La acción del calor en el tronco hace que se formen tejidos de células localizadas o que se desarrollen anillos falsos; en coníferas pueden formarse canales tangenciales de resina traumática (Figura 2.11c), pero los efectos más evidentes del daño por el fuego son las cicatrices que deja en el tronco del árbol (Figura 11b) (Schweingruber, 1996).



Figura 2.11. (a) Bosque de pino con evidencia de registros de incendios, los árboles muestran áreas quemadas en la base del tronco conocidas como “cara de gato” o “viejas”, formadas por la repetida incidencia de incendios y su cicatrización; (b) base del árbol con excelentes registros de incendios, cada una de las diferentes capas representan la cicatriz de un incendio; a simple vista se observa evidencia de 11 incendios, y (c) muestra un acercamiento microscópico de la cicatrización de un incendio, que permite definir la posición de la cicatriz en el anillo de crecimiento (mitad de la madera temprana) que define la época en el año en que se registró (Fotos Julián Cerano).

2.6.4. Fuego de tipo superficial

Tres tipos principales de incendios ocurren en todo el mundo: incendios superficiales, de copa y subterráneos. Los incendios de tipo superficial son los más comunes en los bosques, dejan árboles vivos que registran el incendio (Figura 2.12a). Un fuego superficial quema sobre la superficie del suelo, consumiendo combustibles superficiales (finos y pesados).

Estos incendios por lo general se mueven a través de un área con bastante rapidez y queman con una severidad de baja a moderada.

Muchos tipos de bosques de pino dependen de estos frecuentes incendios superficiales de baja severidad para eliminar la competencia y quemar la capa de materia orgánica, permitiendo a las plántulas el acceso al suelo mineral. Cada tipo de fuego requiere un método de muestreo diferente para registrar con precisión la ocurrencia de incendios en el pasado. Los ecosistemas de pino parecen ser los más adaptados a los incendios de superficie y son frecuentemente los más muestreados para realizar estudios de la frecuencia histórica de incendios. Las historias de incendios en este tipo de bosques se logran de manera más exitosa cortando muestras con cicatrices de troncos muertos y árboles vivos (Speer, 2010).

Los fuegos superficiales son a menudo empujados por el viento y se mueven hacia arriba de la pendiente mientras consumen combustibles. El fuego puede quemar más intensamente en los lados cuesta arriba de los árboles, porque el fuego remolinea en esta parte en un vórtice de las corrientes de aire ascendentes. Aunado a esto, las acículas del pino y los conos se depositan en el lado cuesta arriba del árbol y proporcionan más combustibles para que el fuego queme en este lugar. La primera vez que un árbol está cicatrizado, el fuego no suele dañar el xilema del árbol. El cambium es dañado porque el fuego lo calienta a través de la corteza, provocando más tarde que la corteza se desprenda. La parte cicatrizada del árbol tendrá un área de corteza más delgada y, si es un árbol de pino, el tono de coloración que tome será diferente. Una vez que el árbol es inicialmente cicatrizado, es más probable que a lo largo de la parte expuesta del cambium los incendios posteriores quemen, estos

desarrollarán una cicatriz triangular, llamada cara de gato o vieja (Figura 2.12a y b), en la base del árbol (Speer, 2010).



Figura 2.12. Esquema que muestra un bosque de Pino (a), árboles vivos con excelentes registros de incendios (cicatrices) y el proceso de la extracción de una muestra con cicatrices de incendios. Selección del árbol y el lado con los registros más claros (b), la extracción de la muestra inicia con dos cortes transversales en la base del tronco del árbol (c), corte de los bordes para despegarla la muestra del centro del árbol (c y d) y extracción de la muestras (e); finalmente la muestra se etiqueta y se envuelve en plástico para evitar daños durante su traslado al laboratorio (Fotos Julián Cerano).

Las cicatrices de fuego registradas en la base del árbol pueden ser muestreadas tomando una sección parcial de árboles vivos (Figura 2.12a) o muertos (Arno y Sneek, 1973, Cochrane y Daniels, 2008). Esta técnica de muestreo implica dos cortes con una motosierra a lo largo de la superficie de la sección transversal del tronco dañado (Figura 2.12c), seguido por uno o dos cortes de inmersión a lo largo de los bordes para romper o soltar la muestra del centro del árbol (Figura 2.12c y d). Las secciones obtenidas tienen toda la información del historial de incendios ocurrido durante la vida del árbol (Figura 2.12e), mientras que la mayor parte de la base del árbol, no se daña para la estabilidad y el transporte de sustancias a través del xilema.

Heyerdahl y McKay (2001) reexaminaron 138 árboles seis años después de muestrear secciones parciales para una reconstrucción del historial de incendios con el fin de investigar el impacto del muestreo de cicatrices de fuego en la salud de los árboles. Estimaron que sólo el 8% del área de la sección transversal fue eliminada en el muestreo y que estos árboles no tuvieron mayor mortalidad que un grupo control de 386 árboles de tamaño similar, que no fueron muestreados para el historial de incendios. Concluyen que el muestreo parcial en el tronco de los pinos es una técnica de muestreo no letal que proporciona la información necesaria para el manejo del bosque.

2.7. Reconstrucciones de la historia del fuego

La dendropirocronología es la encargada de la reconstrucción de la historia de incendios y una de las mayores aplicaciones de la dendrocronología para el manejo de bosques y el restablecimiento del fuego como agente perturbador. Cualquier política de quema prescrita en los Estados Unidos es apoyada con evidencia científica para cada bosque en específico. Las reconstrucciones de incendios han generado una visión completa del papel que el fuego juega en estos ecosistemas propensos a incendios. El objetivo del dendrocronólogo es determinar el rango natural de variabilidad del fuego en un sitio particular (Landres *et al.*, 1999).

El rango natural de variabilidad describe la ocurrencia pasada del fuego, la frecuencia con que afecta a un sitio y el área que ha cubierto en el pasado. A partir de esta información, los administradores forestales pueden determinar cómo el fuego se ha comportado en un bosque en el pasado y cómo los regímenes de incendios han cambiado en el siglo XX (Heyerdahl y Card, 2000). Esta información se puede utilizar para simular el régimen natural de incendios, establecer acciones de manejo forestal que permitan el restablecimiento de las acciones naturales de los incendios y establecer medidas de protección de especies sujetas a incendios menos frecuentes o sensibles a este fenómeno ecológico.

2.7.1. Suroeste de los Estados Unidos

Los estudios sobre los efectos del fuego en los árboles se han llevado a cabo desde principios del siglo XX (Clements, 1910; Show y Kotok, 1924; Presnall, 1933). En la

década de 1980, las historias de incendios se hicieron mucho más comunes en el suroeste de los Estados Unidos, lo que condujo a una mejor comprensión de los patrones espaciales y temporales del fuego en muchos ecosistemas de pino (Madany *et al.*, 1982; Dieterich y Swetnam, 1984; Swetnam *et al.*, 1999). Los administradores forestales pueden utilizar la quema prescrita para devolver los bosques a una condición más natural y mejorar la salud de los mismos (Swanson *et al.*, 1994). Los registros del historial de incendios se extienden fácilmente hasta antes de finales del siglo XIX, que fue un período de pastoreo excesivo de ovejas y ganado, seguido por la extinción de incendios por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Savage y Swetnam, 1990).

Swetnam y Baisan (1996) demostraron cómo los registros dendrocronológicos se pueden usar para examinar el fuego a través de múltiples escalas espaciales. Swetnam y Betancourt (1990) demostraron que la ocurrencia de incendios en el suroeste puede explicarse a menudo por los patrones climáticos, especialmente a gran escala. Swetnam *et al.* (1999) examinaron historias de incendios de 55 sitios en todo el suroeste de los Estados Unidos, algunos de los cuales se remontan a la década de 1600. En este análisis encontraron que la ocurrencia de incendios regionales fue impulsada por fluctuaciones climáticas a gran escala moduladas por El Niño Oscilación del Sur (ENSO).

2.7.2. Norte y centro de México

Estudios sobre reconstrucción de regímenes de incendios en México han sido desarrollados en bosque de pino, pino-encino y en bosques mixtos de coníferas en la zona fronteriza entre México y los Estados Unidos (Fulé *et al.*, 2012; Poulos *et al.*, 2013), en la Sierra Madre Oriental (Yocom *et al.*, 2010) y en la Sierra Madre Occidental (Heyerdahl y Alvarado,

2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010; Fulé *et al.*, 2011). Aunque existen algunos estudios preliminares sobre la frecuencia histórica de incendios en bosques de pino de México al sur del Trópico de Cáncer (Rubio, 2006; Cassell, 2012; Llamas, 2013; Cerano *et al.*, 2015), actualmente solo se han publicado dos cronologías de incendios para los pinares de alta montaña, en el Pico de Orizaba, Veracruz (Yocom y Fulé, 2012) y uno más en la sierra norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016). La historia de los regímenes históricos de los incendios forestales y su relación con el clima es poco conocida aún en México (Rodríguez y Fulé, 2003).

2.8. Dendroclimatología

La dendrocronología es el estudio de los anillos de crecimiento de árboles para fechar eventos pasados. Se habla de dendroclimatología cuando estos eventos pasados son climáticos (Stokes y Smiley, 1996). La dendroclimatología ha aportado información importante sobre el cambio climático del pasado y nos ha ayudado a comprender el futuro del clima (Speer, 2010).

2.8.1. Reconstrucciones dendroclimáticas en México

Las primeras cronologías de anillos de árboles desarrolladas para México, se realizaron en el periodo de 1940 a 1950 (Schulman, 1944, 1954, 1956). Scott (1966) generó una cronología de 485 años para lograr fechar porciones de las ruinas de Casas Grandes, Chihuahua, cronología datada de 851 a 1336. Como parte del proyecto mexicano de anillos de árboles, de la Universidad de Arizona, Stokes y Taylor desarrollaron para México 20 cronologías de anillos de árboles en la década de 1970.

Naylor (1971) evaluó el potencial dendrocronológico de cuatro especies de pinos oaxaqueños, sin tener éxito. Suzan y Franco (1981) encontraron que *P. hartwegii* Lindl. localizado en los bosques de los volcanes del centro de México, podía ser fechado, desarrollando una cronología de 200 años (1780-1980); sin embargo, encontraron que las series de ancho de anillo no eran muy sensibles a cambios climáticos. Suzan y González (1984) y Suzan (1985) desarrollaron cronologías cortas de *P. nelsonii* Shaw en Miquihuana Tamaulipas, para investigar la respuesta climática. Serrano *et al.* (1990) analizaron el potencial dendrocronológico de *Abies religiosa* Kunth. para reconstrucción de temperatura en el Desierto de los Leones, México. Sin embargo, fueron Huante *et al.* (1991) quienes demostraron el buen potencial dendrocronológico de *Abies religiosa* en Michoacán, al desarrollar una cronología corta, pero climáticamente sensible para el período 1922-1986.

Nuevos estudios con anillos de árboles, analizan la variabilidad histórica del clima en México. Cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco desarrolladas en la Sierra Madre Occidental y en la Sierra Madre Oriental han permitido analizar la variabilidad climática de los últimos siglos en el norte de México (Stahle *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003; González, 2003; Cerano *et al.*, 2011a, 2012; Villanueva *et al.*, 2009, 2015). Se ha determinado la recurrencia de eventos extremos tales como sequías con períodos de retorno de 50 y 100 años y su efecto en la sociedad (Cerano *et al.*, 2011b), la influencia de fenómenos de circulación general como ENSO en la modulación de la variabilidad del clima (Stahle *et al.*, 1998; Cerano *et al.*, 2011c).

El ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) es el árbol nacional de México y se desarrolla en hábitats riparios a lo largo de la República Mexicana (Martínez, 1963). Actualmente se están desarrollando cronologías con ahuehuete en áreas subtropicales de México, a la fecha se cuenta con excelentes cronologías. Stahle *et al.* (2011) desarrollaron una cronología de 1238 años, que permitió analizar las sequías más fuertes en los últimos 1000 años para el centro de México. Se ha reconstruido la variabilidad hidroclimática para la cuenca Lerma-Chapala en Guanajuato de los pasados dos siglos (Villanueva *et al.*, 2012) y los escurrimientos históricos para los últimos 800 años en el río Nazas, Durango (Villanueva *et al.*, 2014).

Así mismo, se ha desarrollado una red de cronologías con base en los crecimientos anuales del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) en el noreste y centro de México, esta especie ha permitido el desarrollo de series centenarias y el análisis regional de la variabilidad climática (Villanueva *et al.*, 2015). Sin embargo, falta mucho trabajo por realizar y muchas especies por explorar. Se está realizando un arduo trabajo en la identificación de nuevas especies potencialmente útiles para estudios dendrocronológicos, con el objetivo de desarrollar reconstrucciones de variables climáticas (precipitación y temperatura) de varios siglos que permitan analizar tendencias y recurrencia de eventos extremos.

Capítulo 3. Metodología

Los métodos utilizados para lograr generar las reconstrucciones de los regímenes históricos de incendios y el desarrollo de cronologías o series paleoclimáticas con base en el análisis de anillos de crecimiento de árboles en el norte y el centro de México, se basaron en técnicas dendrocronológicas ampliamente documentadas para este tipo de estudios (Arno y Sneek, 1977; Schweingruber, 1983; Stokes y Smiley, 1996; Fritts, 2001). Para reconstruir la frecuencia histórica de incendios principalmente se consideraron los criterios de Arno y Sneek (1977); Dieterich y Swetnam (1984); Baisan y Swetnam (1990); Swetnam y Baisan (1996); Fulé y Covington (1999); Grissino-Mayer (2001); Swetnam y Baisan (2003). Para el desarrollo de cronologías y reconstrucción de series paleoclimáticas se consideraron los métodos descritos por Holmes (1983); Cook y Holmes (1984); Cook (1987); Stokes y Smiley (1996); Fritts (2001).

La metodología seguida para desarrollar la presente investigación se describe en seis fases: (1) recorrido de campo y selección de áreas de estudio, (2) método de campo, (3) métodos de laboratorio, (4) análisis de datos, (5) relación clima-incendios y (6) resultados.

3.1. Recorridos de campo y selección de áreas de estudio

Tanto para el norte como para el centro de México, se visitaron varias áreas para definir aquellas con potencial para desarrollar estudios de reconstrucción de la historia de incendios y generar cronologías centenarias que permitieran conocer la variabilidad de ambos fenómenos y su relación a través del tiempo.

Finalmente, se seleccionaron tres áreas de trabajo (Figura 3.1), (1) la parte alta de la cuenca del río Nazas, enclavada en la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, (2) el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, enclavado en la sierra norte de Puebla y (3) el Parque Nacional Cofre de Perote en el estado de Veracruz, que forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano.

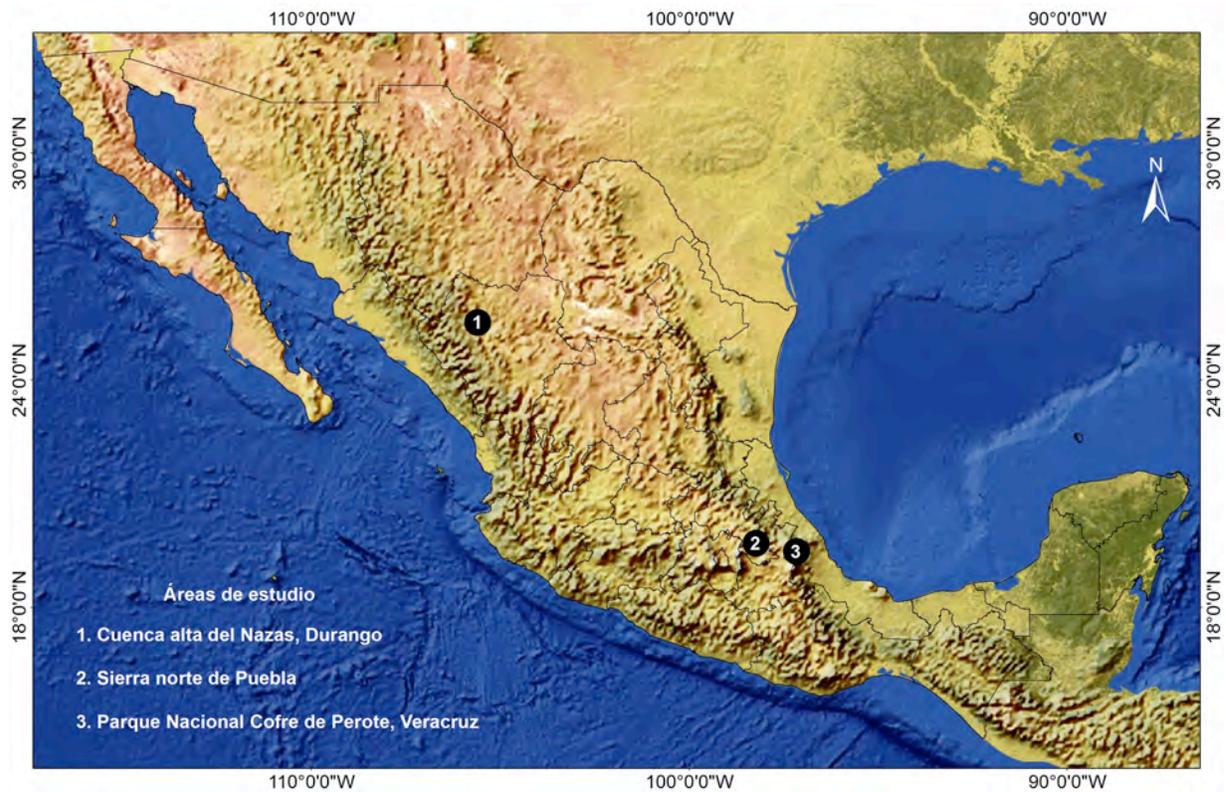


Figura 3.1. Localización geográfica de las tres áreas de estudio, una en la parte norte del país enclavada en la Sierra Madre Occidental y dos en la parte centro en el eje neovolcánico transversal.

3.2. Reconstrucción de la historia del fuego

3.2.1. Métodos de campo

La segunda fase que corresponde a métodos de campo tuvo como principal objetivo, que para cada una de las diferentes áreas, se seleccionaran árboles con cicatrices de incendios (Figura 3.2b). Se consideraron los individuos con el mayor número de registros de incendios (cicatrices; Figura 3.2c, d y e), bien preservados y lo más longevos posible (Figura 3.2a y b) (Arno and Sneck, 1977).

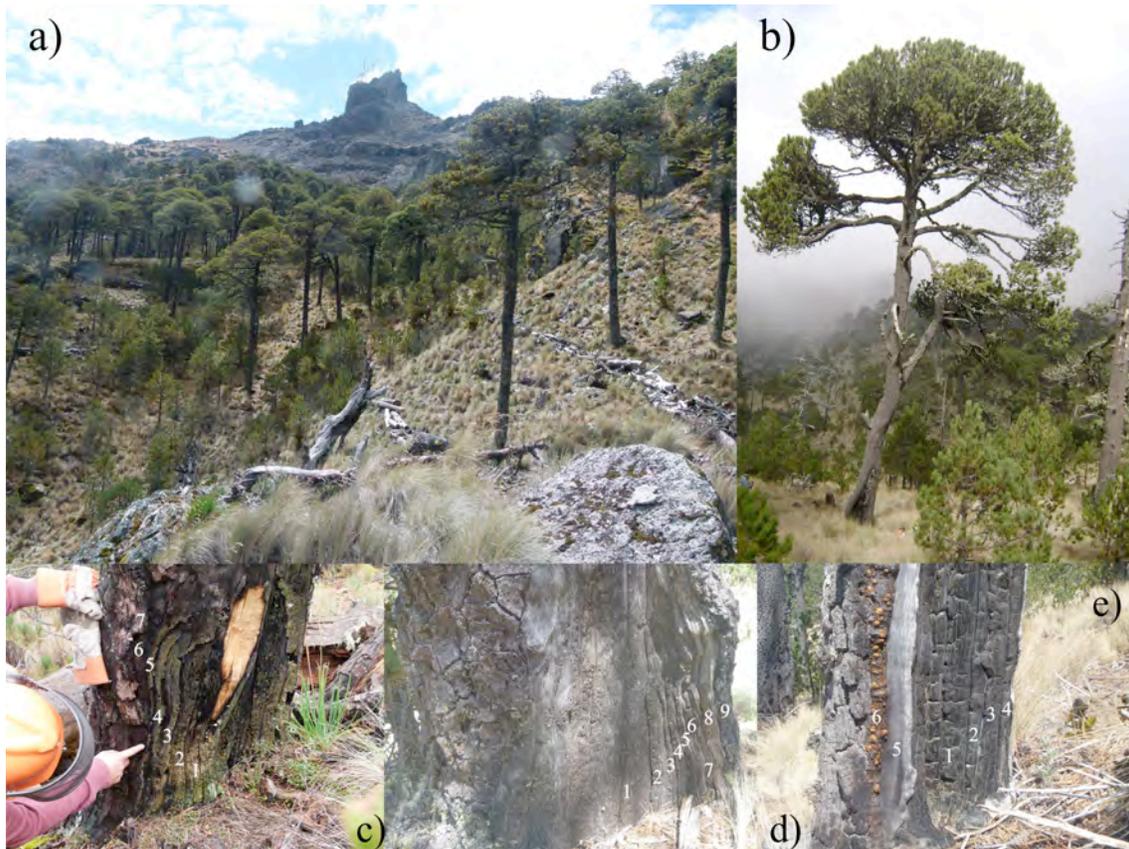


Figura 3.2. Bosque de *Pinus hartwegii* en el Cofre de Perote (a), árbol que muestra la cicatrización característica de los incendios denominada cara de gato o viejas (b) y diferentes individuos (c, d y e) con excelentes registros de incendios 7, 9 y 6, respectivamente (Fotos Julián Cerano).

Las muestras de incendios fueron tomadas tanto de tocones, como de árboles tirados (Figura 3.3c), árboles muertos en pie (Figura 3.3a) y de árboles vivos (Figura 3.3b y d) (Arno y Snack, 1977). Se utilizó una motosierra para extraer secciones transversales totales

de tocones y de árboles tirados (Figura 3.3c), y secciones parciales de árboles muertos en pie y de árboles vivos (Figura 3.3d, e, f, y g). Se enfatizó la toma de secciones en árboles muertos para dañar en lo mínimo árboles vivos (Baisan y Swetnam, 1990). En sitios donde no se encontró material muerto con registros de incendios, el muestreo se enfocó hacia árboles vivos, procurando extraer una sección mínima de madera con el registro de cicatrices de incendios para causar el menor daño posible al árbol.



Figura 3.3. Esquema que muestra un bosque de *P. hartwegii* con árboles vivos y muertos (a), árbol vivo con registro de incendios (cicatrices) (b), extracción de muestras de arbolado muerto en pie (a) y árboles tirados (c). El proceso para la extracción de una muestra con cicatrices de incendios de un árbol vivo, consiste en: selección de la cara con los mejores registros y cortes transversales de la muestra (d), corte de los bordes para despegar la muestra del centro del árbol (e y f), extracción de la muestra (g), etiquetado y conteo de cicatrices (h) y envoltura de la muestra para evitar daños durante su traslado al laboratorio (i) (Fotos Julián Cerano).

El sistema de muestreo que se empleó para la toma de muestras fue selectivo, es decir, se seleccionó en cada uno de los sitios de estudio especímenes con las características

determinadas (número de cicatrices de fuego y en la medida de lo posible árboles longevos) para cumplir con los objetivos planteados en el estudio.

3.2.2. Métodos de laboratorio

En el laboratorio, las muestras seccionadas y con alto grado de pudrición fueron restauradas, procedimiento que consistió en su ensamble, pegado con resistol y grapas. Para las muestras con cierto grado de deterioro por pudrición, se siguió el mismo procedimiento, pero además se adhirieron a una porción de triplay para estabilizarlas y facilitar su preparación y fechado en laboratorio. Todas las muestras fueron pulidas con diferentes grados de lijas, del grano 40 a 1200 para lograr una superficie uniforme y apreciar de manera clara las estructuras de crecimiento bajo microscopio (Figura 3.4).

Las muestras fueron fechadas, se determinó el año exacto de formación de cada uno de los crecimientos anuales mediante la comparación de patrones de crecimiento (Stokes y Smiley, 1996). En muestras de árboles jóvenes, donde se conocía la fecha del primer anillo exterior (corteza), el fechado se realizó directamente en la muestra contando los anillos desde la parte exterior (corteza) a la interior. Para las muestras más longevas de árboles vivos, se generaron gráficos de crecimiento para cada muestra y se desarrolló un gráfico maestro. Así mismo, para cada uno de los árboles muertos, se elaboró un gráfico de crecimiento, comparando los patrones de crecimiento de árboles muertos con el gráfico maestro derivado de árboles vivos (fechado cruzado), se logró determinar el año de la muerte y el fechado exacto de cada uno de los crecimientos de los árboles muertos (Figura 3.4c).

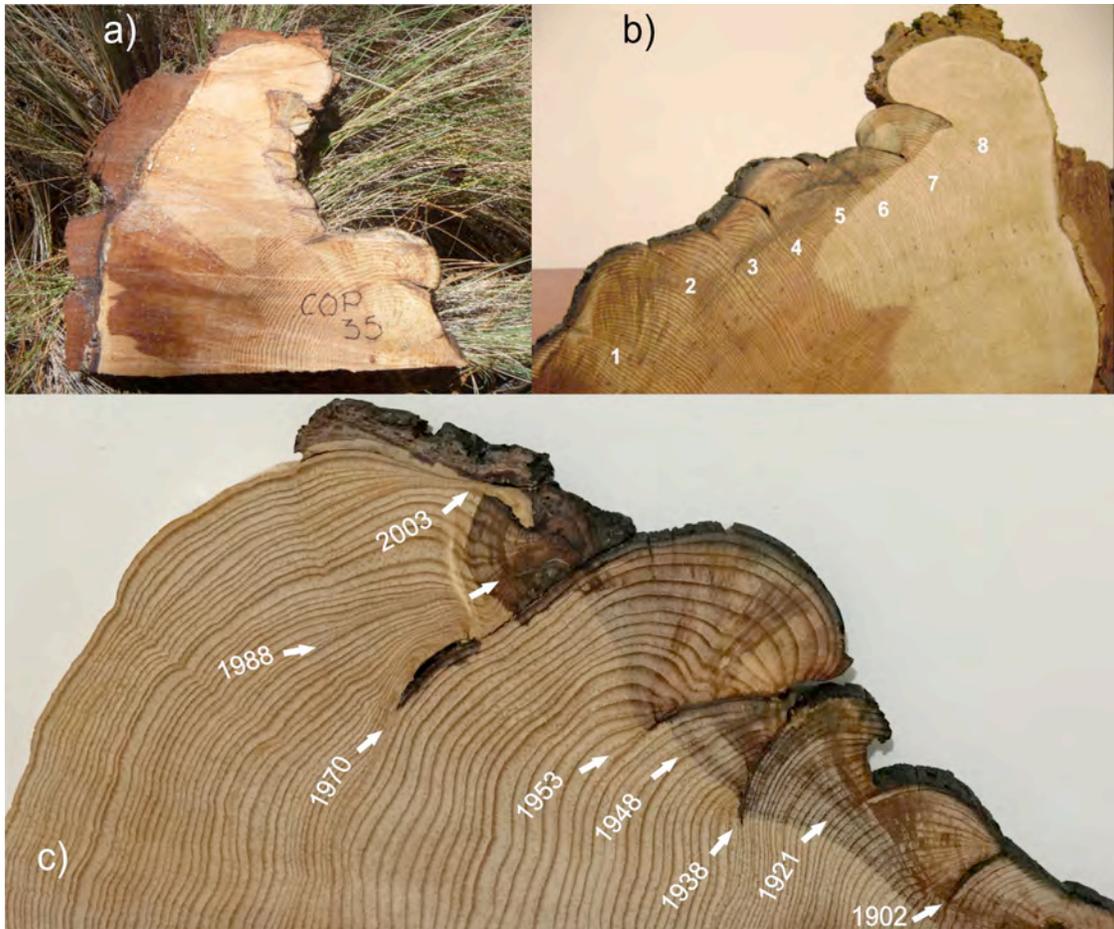


Figura 3.4. Proceso de preparación de muestras en laboratorio para su análisis. (a) Muestra de *P. hartwegii* recién colectada en el Cofre de Perote, (b) muestra de *P. hartwegii* del Cofre de Perote con un pulido preliminar que permite identificar las diferentes cicatrices y (c) un ejemplar *P. hartwegii* de la sierra norte de Puebla, con el proceso de pulido final y un fechado exacto de cada una de las cicatrices (Fotos Julián Cerano).

Una cronología maestra desarrollada con base en los crecimientos anuales de *P. hartwegii* fue empleada como apoyo para el fechado de las muestras con cicatrices de incendios para el sitio Cofre de Perote (Cerano *et al.*, Sin publicar, Anexo 1). De manera similar, se utilizó una cronología con base en los crecimientos de *P. patula* para la sierra norte de Puebla (Quezada, 2013) y para el caso de la parte alta de la cuenca del río Nazas, se empleó una cronología maestra desarrollada con base en los crecimientos anuales de *Pseudotsuga menziesii* (Cerano *et al.*, 2012).

Después de la comparación de los patrones de crecimiento y tener un prefchado de cada una de las muestras, se realizó la medición de anillo total de cada una de las muestras, mediante un sistema de medición Velmex con una precisión de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980). La calidad del fechado se verificó de manera estadística con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las cicatrices de los incendios se emplearon como evidencia de incendios superficiales (Figura 3.5a y b), identificadas como una discontinuidad en las células a lo largo del límite del anillo de crecimiento, donde el cambium murió (Figura 3.5c), seguido por una supresión y deformación de los crecimientos (Dieterich y Swetnam, 1984).



Figura 3.5. (A) Árbol chamuscado con registros de incendios, (B) sección parcial con excelentes registros históricos de incendios (7 cicatrices) posterior a su preparación y fechado, y (C) muestra un acercamiento microscópico de la cicatrización del incendio de 1998, que permite definir la posición de la cicatriz en el anillo de crecimiento (mitad de la madera temprana) que define la época en el año en que se registró el fuego (Cerano *et al.*, 2015).

Una vez determinado el año exacto de formación de cada anillo, la estación de ocurrencia de los incendios se definió observando la posición relativa de cada una de las cicatrices de los incendios en el anillo anual (Figura 3.5c y 3.6) con base en las siguientes categorías: EE (inicio de la madera temprana), ME (mitad de la madera temprana), LM (final de la madera temprana), L (madera tardía) y D (dormancia o límite del anillo) (Dieterich y Swetnam, 1984; Baisan y Swetnam, 1990).

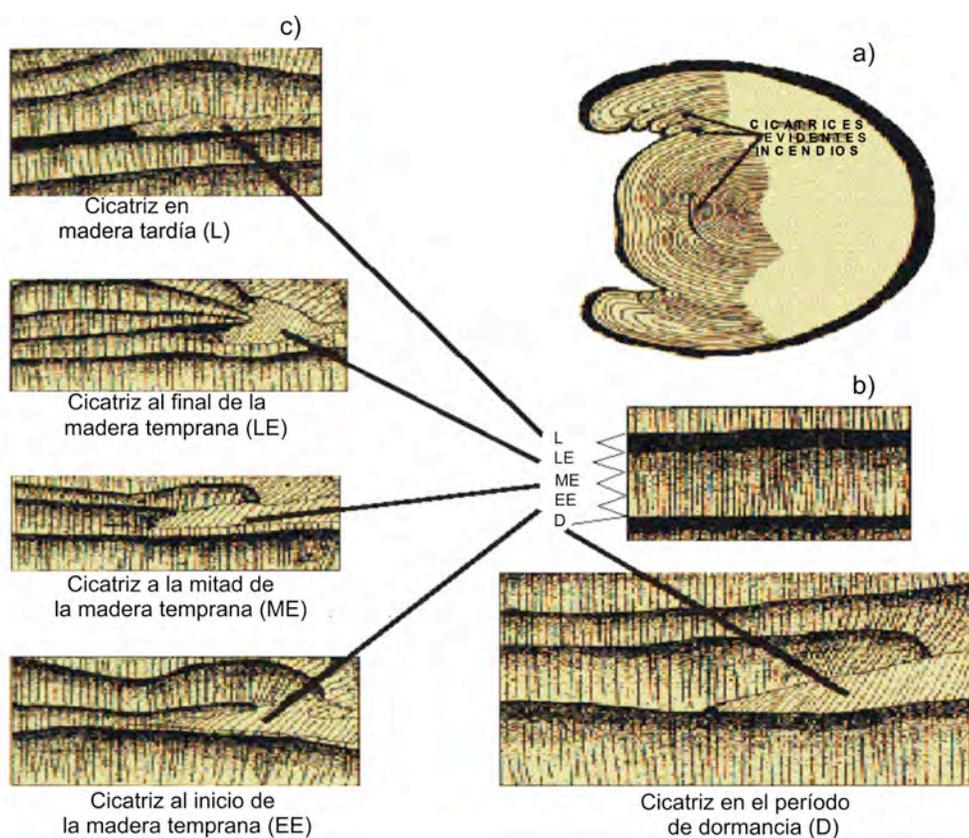


Figura 3.6. Categorización de la época de ocurrencia de incendios (Grissino-Mayer, 2001). La ubicación de la cicatriz que dejó el incendio dentro de un anillo de crecimiento anual específico, permite determinar el año en que se registró dicho evento (a). Así mismo, el anillo desarrolla madera temprana de color claro y tardía de color oscuro, al lograr definir la posición de la cicatriz en el anillo de crecimiento (en dormancia D, al inicio EE, a la mitad ME, al final de la madera temprana LE o en la madera tardía L) se logra determinar la estación del año en que ocurrió el incendio (b y c).

Las cicatrices determinadas en la estación de dormancia se asignaron al inicio de la madera temprana del siguiente año (incendios de primavera) (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Swetnam y Baisan, 2003; Yocom y Fulé, 2012). Las diferentes categorías se agruparon en dos períodos: 1) primavera (D + EE) y 2) verano (ME + LE + L) (Grissino-Mayer, 2001).

Para analizar la condición estacional del clima y su influencia en la ocurrencia de incendios tanto en primavera como en verano, se graficó a nivel mensual la distribución de lluvia, temperatura y tormentas eléctricas, con datos observados promedio (1951-2010) de las estaciones más cercanas a las áreas de estudio (SMN, 2017). Así mismo, se analizó la tasa fotosintética o el nivel de estrés de la vegetación (valores de NDVI) a través del año, una variable más que permitió observar las condiciones de sequía en primavera y el grado de susceptibilidad de la vegetación a quemarse. Los valores de NDVI corresponden a datos promedio del período 1981-2006 para cada área de estudio, los valores de NDVI se extrajeron de las bases de datos del International Research Institute for Climate and Society (IRI) (Tucker *et al.* 2005).

3.2.3. Análisis de datos

La base de datos de historia del fuego se analizó con el programa FHX2, versión 3.2 (Grissino-Mayer, 2001). El análisis inició con el primer año que presentó un adecuado tamaño de muestra, definido por el primer año de incendio registrado en ≥ 10 % o más del número total de muestras (Grissino-Mayer *et al.*, 1994). Los intervalos medios de frecuencia (MFI, por sus siglas en inglés) e intervalo de recurrencia de incendios (WMPI, por sus siglas en inglés) se analizaron estadísticamente en tres diferentes filtros: (1) todos

los eventos de incendio identificados, (2) eventos de incendio cuyas cicatrices están presentes en $\geq 10\%$ de las muestras y (3) eventos de incendio cuyas cicatrices están registradas en $\geq 25\%$ del total de las muestras. El filtro que considera las cicatrices observadas en el 25 % o más de las muestras, es utilizado comúnmente como un estimador de la frecuencia de incendios que fueron relativamente extensos e intensos (Swetnam y Baisan, 1996; Fulé y Covington, 1999; Swetnam y Baisan, 2003).

Para cada uno de los filtros, se determinaron las siguientes estadísticas descriptivas: intervalo medio de frecuencia de incendios (MFI, por sus siglas en inglés), intervalo mínimo y máximo, intervalo medio por muestra y el intervalo de la mediana de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés) o recurrencia de incendios. Esta última es una medición de distribución central, empleada para modelar la distribución asimétrica de los intervalos de incendios y expresar en términos probabilísticos los intervalos de recurrencia (Grissino-Mayer *et al.*, 1994; Swetnam y Baisan, 1996). Así mismo, para las áreas localizadas en Durango y Veracruz, que se dividieron en diferentes sitios de estudio, estos se combinaron, para generar una base de datos compuesta, donde se estimaron los estadísticos promedio para toda el área, que son de utilidad para la comparación con los estadísticos de los sitios individuales.

3.2.4. Relación clima-incendios

Para analizar la influencia del clima en la frecuencia histórica de incendios, se relacionaron variables climáticas con las bases de datos de incendios reconstruidas en los diferentes sitios de estudio. Dentro de las variables climáticas analizadas se encuentran:

1. Precipitación reconstruida y observada.
2. Series dendroclimáticas (cronologías).
3. Índices de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (NIÑO 3 SST) y de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés).
4. Índices de sequía, tales como, el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés).

Para el análisis de la relación clima-incendios, no se utilizaron todas las variables climáticas en cada uno de los sitios, las variables que se emplearon en común en las diferentes áreas de estudio fueron ENSO y PDSI. Para esto se utilizó la rutina Análisis de Sobreposición de Época (SEA, por sus siglas en inglés) del programa FHX2 versión 3.2 (Grissino-Mayer, 2001).

Cada una de las variables climáticas se analizó por separado con la reconstrucción de la historia del fuego, comparando las condiciones durante el año del incendio, cinco años previos, y dos años posteriores al mismo. Para evaluar la significancia estadística del análisis SEA, los intervalos de confianza (95, 99 y 99.9 %) se calcularon utilizando la distribución bootstrapped de los datos climáticos con 1000 repeticiones.

Finalmente, se utilizó el Atlas de Sequía para México (MXDA, por sus siglas en inglés; Stahle *et al.*, 2016), con el que se generaron mapas de sequía para años específicos que permitieron analizar las condiciones climáticas de años en los que se reconstruyeron incendios severos que afectaron áreas extensas.

3.3. Reconstrucción de series dendroclimáticas

Las cronologías o series paleoclimáticas desarrolladas con base en anillos de crecimiento de árboles, son útiles para el apoyo en el fechado de las muestras con cicatrices de incendios y como datos climáticos extensos que permiten analizar la relación clima-incendios varios siglos en el pasado. Una cronología maestra desarrollada con base en los crecimientos anuales de *P. patula* fue empleada como apoyo para el fechado de las muestras con cicatrices de incendios para el sitio de sierra norte de Puebla (Quezada, 2013) y para el caso de la parte alta de la cuenca del río Nazas, se empleó una cronología maestra desarrollada con base en los crecimientos anuales de *Pseudotsuga menziesii* (Cerano *et al.*, 2012). Sin embargo, para el Parque Nacional Cofre de Perote, aunque se contaba con una cronología preliminar de *Pinus hartwegii*, esta no cubría todos los sitios de estudio (Villanueva *et al.*, 2015); por lo que se tuvo que robustecer la cronología existente con nuevas muestras y con una mejor representatividad del área para el adecuado fechado de las secciones con cicatrices de incendio y para establecer la relación histórica de clima-incendios durante varios siglos (Anexo 1).

3.3.1. Métodos de campo

El muestreo dendrocronológico se realizó en un gradiente altitudinal de 3000 a los 4000 m en el Parque Nacional Cofre de Perote. Se tomaron muestras de árboles vivos con taladros de Pressler (Figura 3.7a, b y c) y secciones transversales de árboles muertos (trosas tiradas y tocones) con motosierra (Figura 3.7d). Las muestras se etiquetaron con información específica del árbol y del sitio, esto para un mejor control del muestreo e interpretación de los resultados en laboratorio.



Figura 3.7. Toma de muestras (virutas) de árboles vivos empleando taladro de Pressler de diferentes diámetros (5 y 12 mm) y longitudes (a, b y c) para lograr obtener la muestra desde el centro del árbol y obtención de secciones transversales de arboles muertos con el apoyo de una motosierra (d) (Fotos Julián Cerano).

3.3.2. Métodos de laboratorio

Las muestras se prepararon en el laboratorio para su análisis, para lo cual se montaron en rieles o molduras de madera para dar mayor firmeza y resistencia a los núcleos de crecimiento durante el proceso de preparación y fechado. Las secciones transversales seccionadas se pegaron, las que presentaron cierto grado de pudrición se pegaron y montaron en triplay para mayor firmeza. Ambas muestras se pulieron con diferentes grados de lijas (de 120 a 1200 para virutas y 40 a 1200 para secciones) para resaltar las estructuras de crecimiento anual y facilitar el análisis bajo microscopio (Figura 3.8). Cada uno de los anillos de crecimiento fue fechado al año exacto de formación mediante la técnica dendrocronológica estándar denominada “fechado cruzado” (cross dating, en inglés),

principio de la dendrocronología que permite determinar el año exacto de formación de cada anillo con base en la similitud de los patrones de crecimiento (Figura 3.8); el uso de esta técnica es imprescindible cuando las mediciones del ancho de los anillos son comparadas con variables climáticas (Stokes y Smiley, 1996).

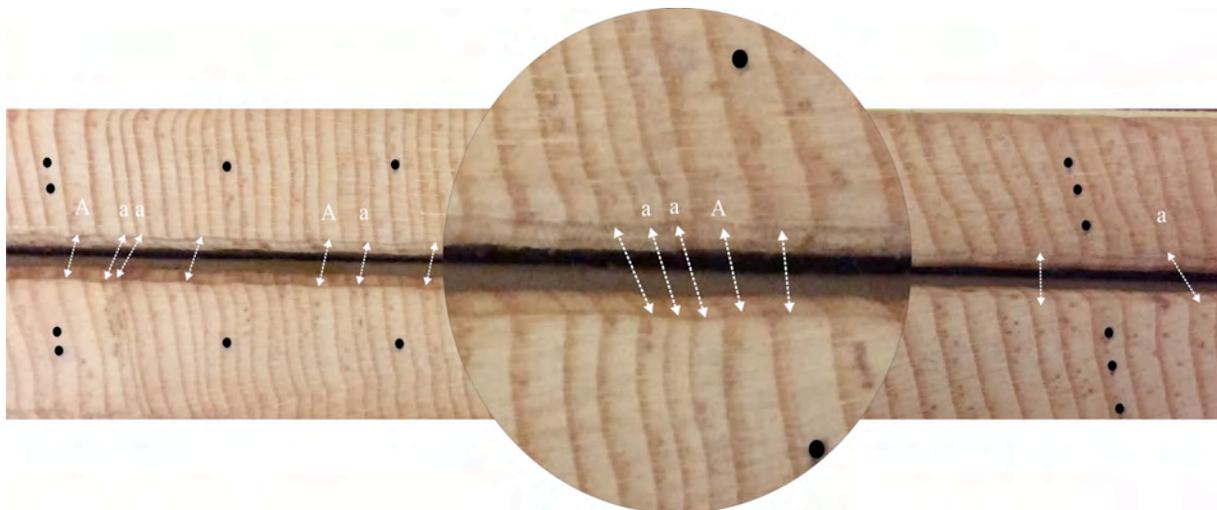


Figura 3.8. Anillos de crecimiento anual de *Pinus hartwegii* claramente visibles posterior al proceso de pulido, la comparación de anillos entre muestras permite definir la similitud en los patrones de crecimiento. Esta técnica logra identificar posibles problemas de anillos perdidos y falsos, logrando un fechado exacto de los anillos de crecimiento. Las flechas indican anillos con crecimientos similares en ambas muestras; un acercamiento de una porción de anillos, señala un claro ejemplo de la similitud en el crecimiento, anillos pequeños en minúsculas y anchos en mayúsculas (Foto Julián Cerano).

Una vez fechadas las muestras, cada anillo anual de crecimiento se midió individualmente empleando un sistema de medición VELMEX con precisión de 0.001 mm (Figura 3.9). Este sistema está conectado a una computadora que utiliza el programa Measure J2X versión 4.2 para registrar las mediciones de ancho de anillo, madera temprana y tardía. En la computadora se almacenó cada una de las bases de datos por separado (Robinson y Evans, 1980).

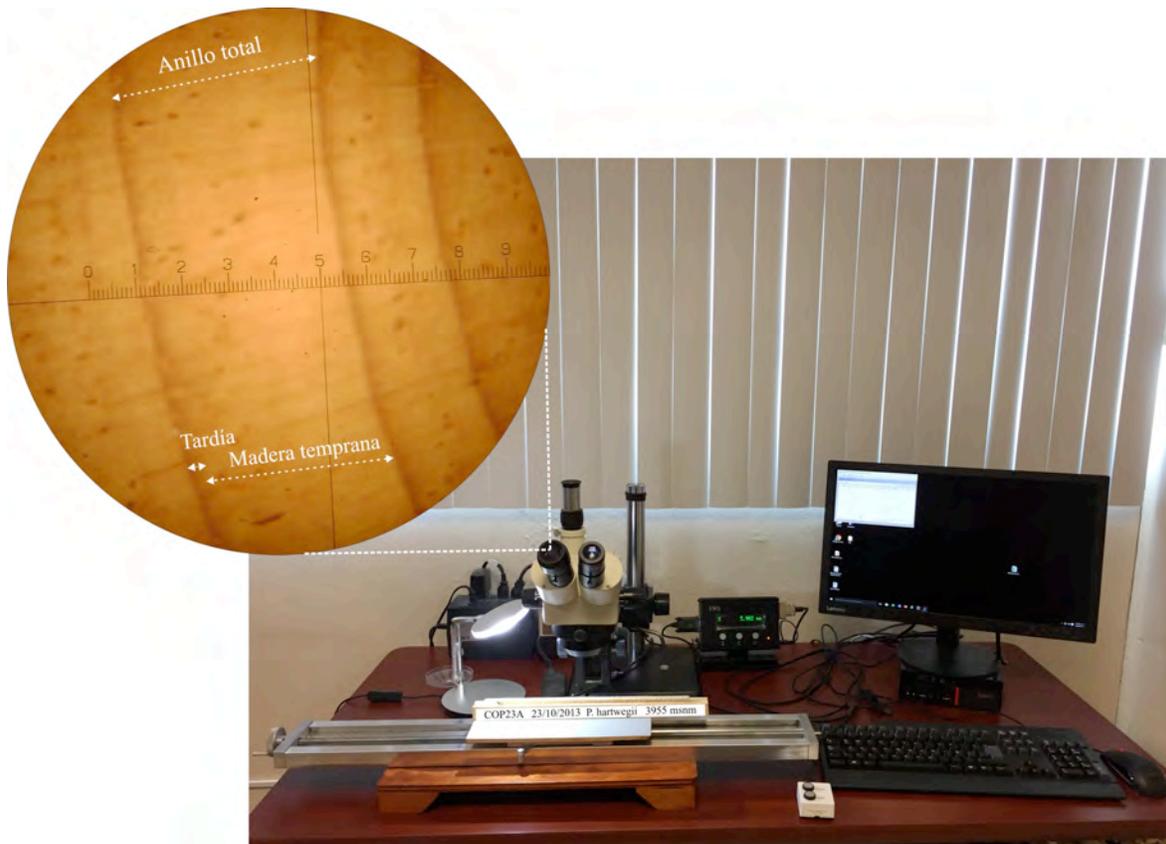


Figura 3.9. Sistema de medición VELMEX con platina de fase deslizable conectado a una computadora donde se ha cargado el programa de medición Measure J2X versión 4.2. Con el apoyo de un microscopio con retícula graduada, se marca el inicio del anillo de crecimiento, así como el límite de la madera temprana y tardía. Este procedimiento se repite para cada anillo, finalmente se generan tres bases de datos (anillo total, madera temprana y tardía) que se almacenan en la computadora (Foto Julián Cerano).

3.3.3. Análisis de datos

El fechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN (Figura 3.10), al insertar la curva de mejor ajuste al crecimiento (una curva exponencial negativa o línea recta) o serie de medición y luego al dividir cada valor anual de medición entre el

valor obtenido de la curva (Cook y Holmes, 1984). La función utilizada por ARSTAN para la estandarización aplicando el modelo de la curva exponencial negativa fue la mencionada por Fritts *et al.* (1969).

$$Q_t = a e^{-bt} + k$$

Donde:

Q_t = Valor promedio proyectado (amplitud de anillo proyectada al tiempo t).

a , b y k = Coeficiente de regresión estimados para cada especie.

t = Tiempo.

e = Base de logaritmos naturales.

y el ajuste lineal donde b_0 es el intercepto y b_1 es la pendiente es el indicado por Holmes (1994).

$$Q_t = b_0 + b_1 t$$

Al dividir el valor real del ancho del anillo entre el valor correspondiente de la curva o el crecimiento esperado por el modelo, se genera el índice de crecimiento.

$$I = W/Y$$

Donde:

I = Índice de ancho de anillo o índice de crecimiento.

W = Ancho de anillo (incremento anual).

Y = Ancho de anillo proyectado.

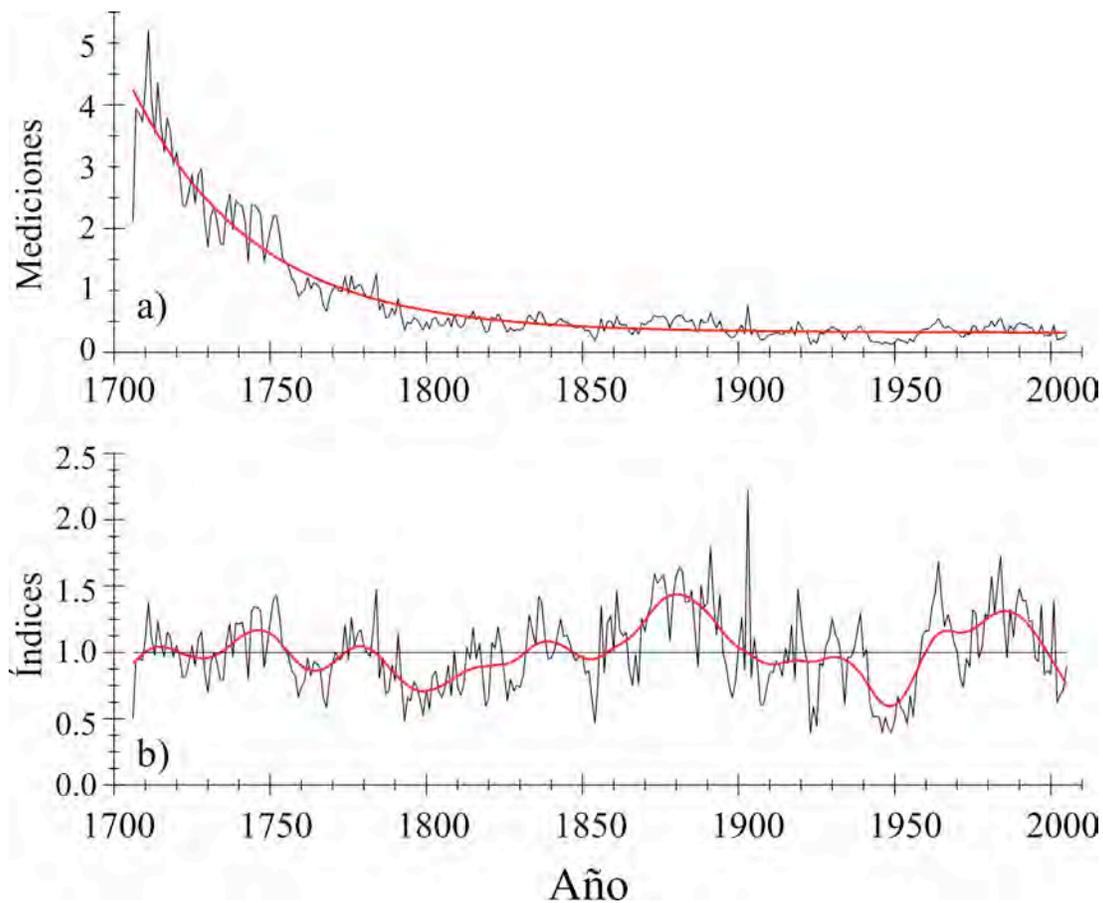


Figura 3.10. Estandarización de una serie de crecimiento con una media de 1.0 y varianza homogénea. Serie de ancho de anillo de una muestra individual, que indica la caída exponencial del crecimiento por efecto de la edad, que al aplicar la curva de mejor ajuste, en este caso, una curva exponencial negativa (color rojo) (a), se generan índices normalizados (b), que resultan de dividir el valor de la curva de ajuste entre el ancho del anillo. Se eliminan las tendencias biológicas y geométricas maximizando la señal climática. La figura b, muestra los índices anuales (color gris) y una curva suavizada de 10 años (color rojo) para observar eventos de baja frecuencia como sequías y períodos húmedos (Gráfico Julián Cerano).

Se generó una serie de índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987; Fritts, 2001). De igual manera, este procedimiento se repitió para cada una de las diferentes muestras y finalmente el promedio de todas las series estandarizadas permitió obtener la cronología final para el área de estudio (Figura 3.11).

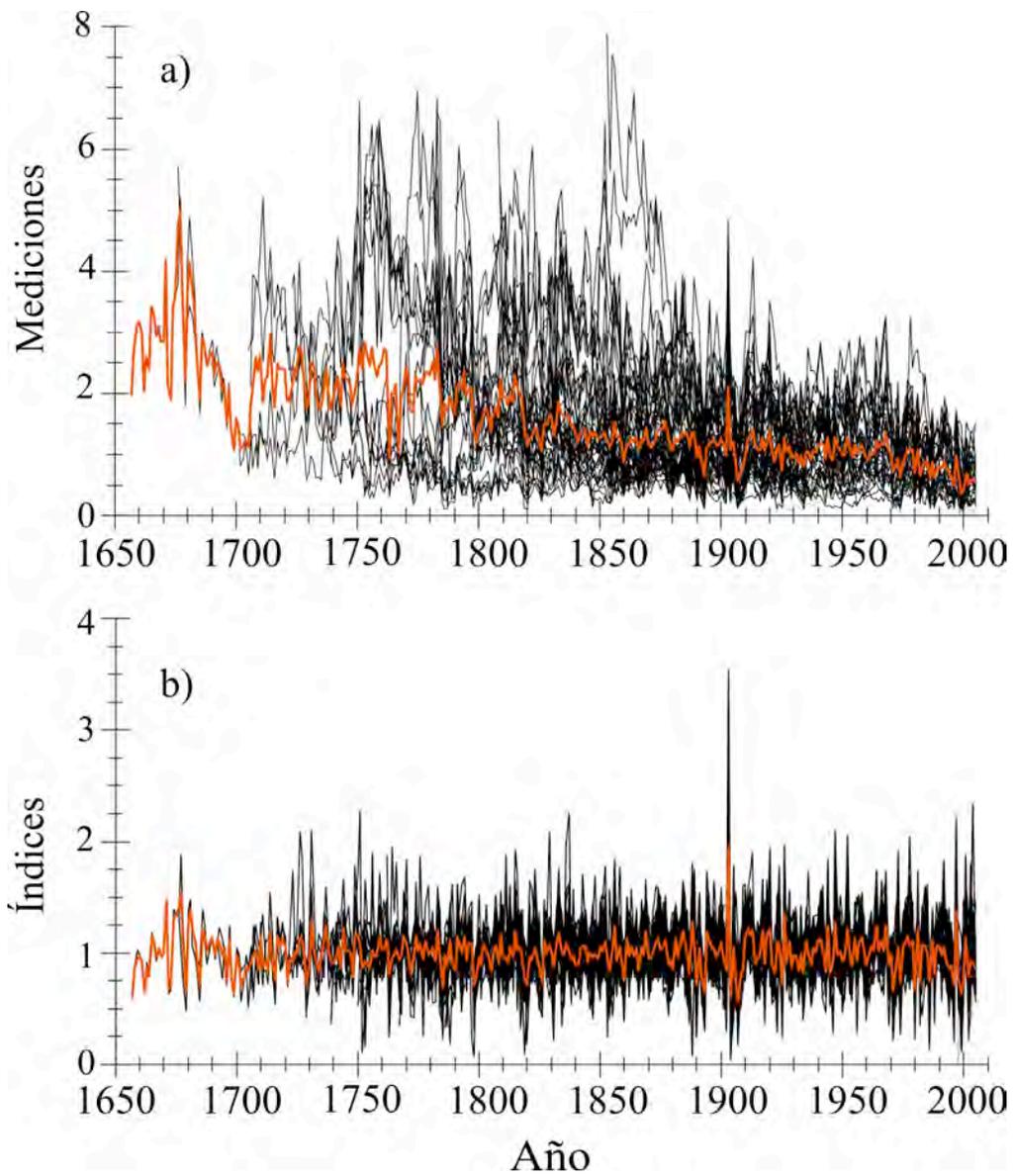


Figura 3.11. Mediciones de ancho de anillo de cada una de las diferentes muestras. En la figura (a) se observa variabilidad común y un crecimiento exponencial negativo por efecto de la edad, mientras que en la figura (b) el proceso de estandarización ha eliminado el efecto de la edad y maximizado la señal climática. El promedio de todas las series estandarizadas, es la cronología final del sitio de estudio que se observa en color rojo (Gráfico Julián Cerano).

3.3.4. Cronología de ancho de anillo

La cronología desarrollada para el Parque Nacional Cofre de Perote (Anexo 1), se utilizó como apoyo en el fechado de las muestras con cicatrices de incendios, para analizar la variabilidad climática regional y determinar la relación entre dicha variabilidad y la ocurrencia de incendios en los últimos 550 años.

3.4. Resultados

En el apartado de resultados, se presentan y discuten las reconstrucciones de la historia del fuego para cada una de las diferentes áreas de estudio, los intervalos medios de frecuencia con que se han registrado históricamente los incendios, los intervalos medios de probabilidad de ocurrencia y cambios en la frecuencia del fuego en décadas recientes. Así mismo, se analiza la relación clima-incendios a nivel local y regional, para lo cual, se comparó la historia del fuego con archivos históricos (sequías e incendios), datos climáticos (cronologías, precipitación, ENSO, PDO, PDSI, SPI), comparación con otros estudios de fuego y análisis de mapas de sequía, estos análisis permitieron corroborar la influencia del clima en años específicos en la propagación de incendios extensos en los últimos siglos tanto en el norte como en el centro de México.

CASOS DE ESTUDIO

Capítulo 4. Influencia del clima en el régimen histórico de incendios en el noroeste del estado de Durango, México: 1700 - 2008

4.1. Introducción

La Sierra Madre Occidental es una fuente de agua fundamental para el norte de México (Descroix *et al.*, 2004). En la parte centro-norte de la vertiente interior del estado de Durango, se origina el río Nazas, que pertenece a la Región Hidrológica 36 (RH 36). La parte alta de la cuenca del río Nazas es una zona de abastecimiento de agua; su pluviometría oscila entre 500 a más de 800 mm, donde los escurrimientos se deben en parte a sus pendientes, a la litología y principalmente a la cubierta forestal que la hace proveedora del 89 por ciento del volumen total que llega a la parte baja de la cuenca, donde se asienta la Comarca Laguna (Loyer *et al.*, 1993).

La vegetación en la parte alta del río Nazas está dominada por bosque de pino-encino y bosque de pino. Los procesos en la parte alta de la cuenca invariablemente tienen repercusiones en la parte baja. En este contexto, el bosque en esta zona desempeña una importante función reguladora, controla la cantidad y temporalidad del flujo del agua, protege los suelos de ser arrastrados, evita sedimentación, degradación de los ríos y la pérdida de fertilidad (Descroix *et al.*, 2004). Existe una clara relación entre la disminución de la cubierta forestal y el incremento de los escurrimientos (Hudson y Gimán, 1993; Stednick, 1996).

En la RH 36 la duración de la estación seca es muy irregular aún en las zonas más favorecidas de la Sierra Madre Occidental, donde el gasto decrece de Octubre a Mayo; sin embargo, en esta zona, los escurrimientos se mantienen debido al efecto positivo de la cubierta forestal (Descroix, 2004). Esto permite conservar mayor tiempo el agua en el suelo, reduciendo el periodo de estiaje y suavizando las crecidas (Bosch y Hewlett, 1982).

La cubierta forestal juega un papel esencial en la conservación de los procesos naturales de la cuenca. Sin embargo, las áreas forestales de esta zona enfrentan como principal problemática la modificación de la cubierta forestal y su composición, acción propiciada por la deforestación, desecación ante sequías intensas y prolongadas e incidencia de incendios forestales, que contribuyen drásticamente a la reducción y deterioro del bosque. Durante los últimos 80 años de datos instrumentales para esta región, se han identificado sequías severas (IMTA, 2009; Nouvelot *et al.*, 2004). Así mismo, la reconstrucción de la variabilidad de la precipitación para los últimos 410 años, pone de manifiesto la incidencia de sequías intensas con efectos severos en la sociedad y en los recursos naturales (Cerano *et al.*, 2012).

Análisis de cronologías centenarias de incendios con base en anillos de árboles para el suroeste de los Estados Unidos (Brown y Wu, 2005; Margolis y Balmat, 2009; Swetnam y Betancourt, 1990, 1998) y norte de México (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010; Yocom *et al.*, 2010) brindan una documentación consistente de la relación entre sequías y el incremento de la ocurrencia de incendios.

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un mecanismo de forzamiento climático que afecta la precipitación y ocurrencia de incendios forestales en muchas partes del mundo (Swetnam y Betancourt, 1990; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2008). En el sur de Estados Unidos y norte de México, los eventos cálidos (El Niño) se asocian con condiciones invernales húmedas y menor cantidad de incendios; a su vez, eventos fríos (La Niña) tienden a favorecer inviernos secos y mayor ocurrencia de incendios (Swetnam y Betancourt, 1990; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Kitzberger *et al.*, 2007). La variabilidad de las condiciones climáticas para la parte alta de la Cuenca del Nazas es modulada en gran medida por el ENSO, propiciando sequías en su fase fría La Niña y condiciones de mayor precipitación en su fase cálida El Niño (Stahle *et al.*, 1998; Cerano *et al.*, 2011, 2012).

La frecuencia histórica de los incendios en general es poco conocida para los bosques de México (Rodríguez y Fulé, 2003). De los pocos trabajos desarrollados, para el centro de México se ha reconstruido una incidencia continua del fuego hasta los primeros años del siglo XXI (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2015, 2016). A diferencia de la zona centro del país, para la región norte, se ha documentado una exclusión del fuego a partir 1950 (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2008), condición que propicia mayor acumulación de combustibles y riesgo de incendios más severos y extensos.

La incidencia de eventos climáticos extremos en la parte alta de la cuenca del río Nazas, pone en riesgo los recursos forestales y por lo tanto los recursos hídricos. Dada la importancia de la cubierta forestal en el buen funcionamiento de los diferentes procesos de

la cuenca y ante la poca información existente sobre la historia del fuego, es apremiante disponer de información que permita desarrollar adecuados programas de prevención y manejo del fuego, que garanticen la conservación de la cubierta forestal.

Por tales circunstancias los objetivos de la presente investigación fueron: 1) Reconstruir los regímenes históricos del fuego para la parte alta de la cuenca del río Nazas y 2) analizar la influencia del clima sobre la frecuencia histórica de los incendios. Se plantearon las siguientes hipótesis: 1) La frecuencia de incendios en la cuenca del río Nazas no ha mostrado cambios y esta frecuencia se ha mantenido hasta la actualidad a pesar de cambios en el uso del suelo. 2) El clima es la variable principal que ha modulado la frecuencia histórica de incendios para esta región del noroeste del estado de Durango.

4.2. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la Sierra Madre Occidental, en la parte alta de la cuenca del río Nazas, subcuenca Sardinias, en el sitio denominado Ciénega de la Vaca, municipio Tepehuanes, Durango (Figura 4.1). El tipo de vegetación dominante corresponde a un bosque de clima templado de coníferas con diversas especies dominantes como: *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schlecht., *Pinus teocote* Schlecht. Et Cham., *Pinus durangensis* Martínez y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (García y González, 2003).

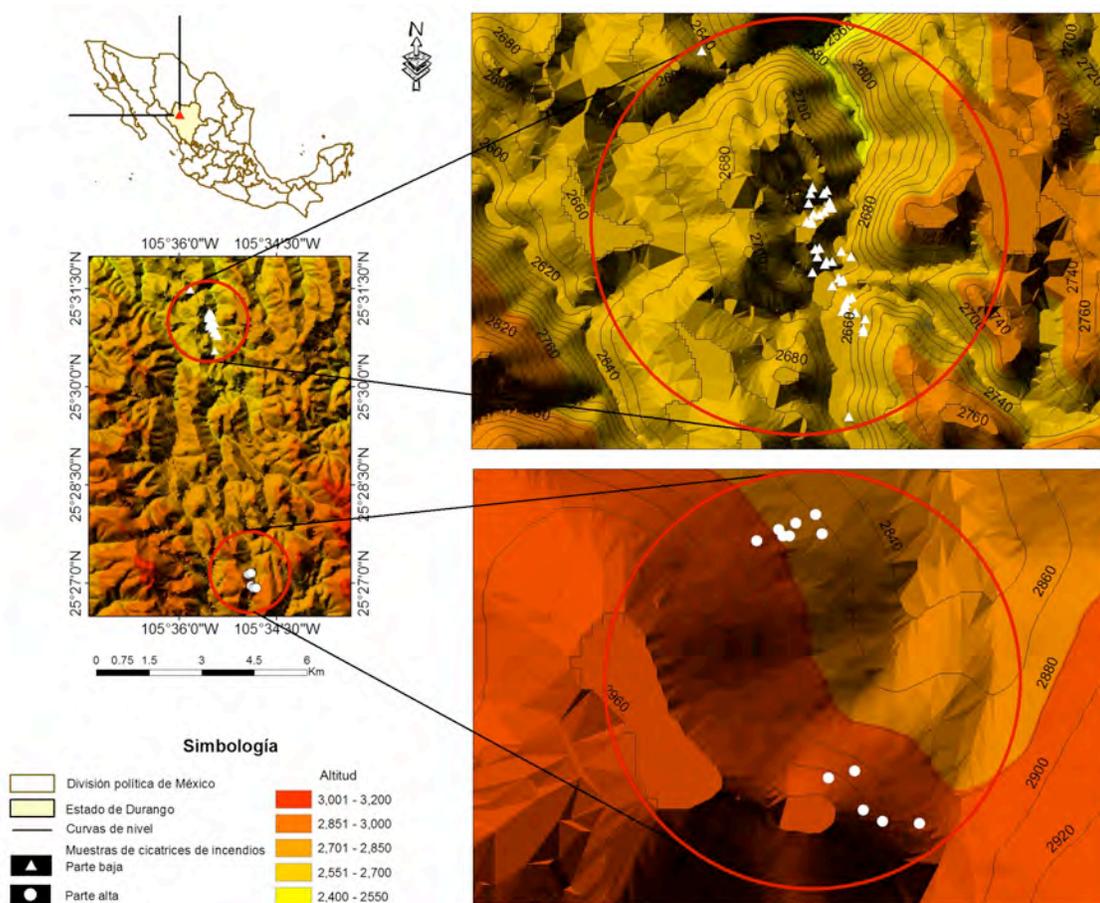


Figura 4.1. Localización del área de estudio en la parte alta de la cuenca del río Nazas al noroeste del estado de Durango, México. El mapa muestra los dos sitios de estudio dispuestos a lo largo de la cima de la cuenca del Nazas, uno de los sitios se localiza en la parte baja (lado superior derecho) y el segundo en la parte más alta de la cuenca (lado inferior derecho).

Presenta un clima del tipo (C_w), templado subhúmedo con lluvias de verano (García, 1987), la precipitación total anual oscila de 470 a 500 mm. El porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual es 12.8% (60 mm), pero la precipitación alcanza su máximo nivel en el verano, con 369 mm (junio a septiembre), que representa 78.5% de la lluvia total anual. La temperatura media anual es de 10° C, la media mensual más elevada de 30° C (mayo y junio) y la más baja (enero) de -0.6° C (IMTA, 2009).

4.3. Muestreo de árboles

El sitio Ciénega de la Vaca se dividió en dos áreas de trabajo, 1) la parte baja (PB, 2620-2680 msnm) y 2) la parte más alta de la cuenca (PA, 2850-2930 msnm), con una superficie aproximada de 50 y 25 ha, respectivamente (Figura 4.1, Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Características de las dos áreas de trabajo en la cuenca del río Nazas, Durango

Sitio de estudio	Código de Sitio	Elevación	Pendiente promedio (%)
Parte Baja	PB	2560-2680	50
Parte Alta	PA	2860-2930	34

Para cada una de las áreas, se seleccionaron árboles con cicatrices de incendios (Figura 4.2) de las especies *Pinus arizonica*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus teocote* y *Pseudotsuga menziesii* para la PB; y *Pinus arizonica* y *Pinus ayacahuite* para la PA. Empleando motosierra se removieron 46 y 22 secciones parciales de árboles vivos, muertos en pie, tirados y tocones para la PB y PA, respectivamente. Se consideraron los individuos con el mayor número de registros de incendios (cicatrices; Figura 4.2a), bien preservados y lo más longevos posible (Arno and Sneck, 1977).

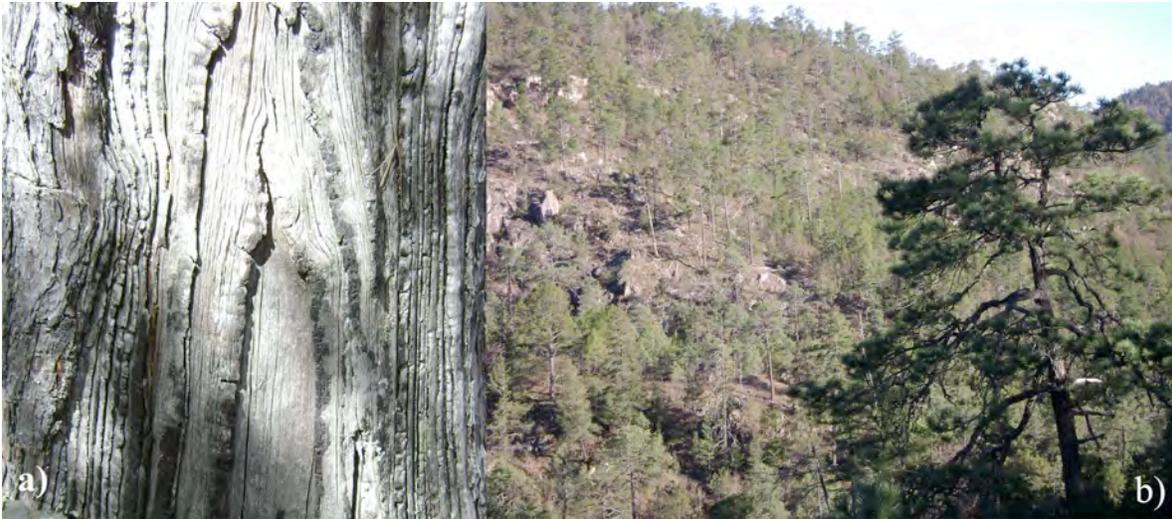


Figura 4.2. Árbol de *Pinus ayacahuite* con excelentes registros de cicatrices de incendios (a) y condición del bosque mixto de pino en la parte alta de la cuenca del río Nazas (b) (Fotos Julián Cerano).

4.4. Variables climáticas

Para analizar las condiciones climáticas y su relación en la frecuencia de incendios, como proxy del clima regional se emplearon tres variables:

- 1) Una reconstrucción de precipitación invierno-primavera desarrollada con base en el ancho de anillo de *Pseudotsuga menziesii*; la precipitación reconstruida cubre de 1599 a 2008 (410 años) período en el que se observan sequías severas (Cerano *et al.*, 2012).
- 2) Índices reconstruidos de El Niño Oscilación de Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (NIÑO 3 SST, Diciembre-Febrero, 1408-1978; Cook, 2000a).
- 3) Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) Junio-Agosto, puntos del grid número 63 (1690-1978), el más cercano al área de estudio (Cook, 2000b).

Así mismo, para analizar la influencia de ENSO en la variabilidad climática de la parte alta de la cuenca del río Nazas, se relacionó la precipitación reconstruida invierno-primavera y el índice NIÑO 3 SST, utilizando gráficos de resolución anual de espectros potenciales de ondeleta y dominio de coherencia, empleando el programa MATLAB 6.5 (MathWorks, 2002).

Finalmente, el Atlas de Sequías para México (MXDA, por sus siglas en inglés) (Stahle *et al.*, 2016) fue utilizado para generar los mapas de sequía y analizar las condiciones climáticas durante seis de los años de incendio (1818, 1854, 1890, 1901, 1951 and 1982) más extensos para esta región del estado de Durango.

4.5. Resultados

Se colectó un total de 68 muestras con cicatrices de incendios de diferentes especies de pino (*P. arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. teocote* y *Pseudotsuga menziesii*), 46 en PB y 22 en PA. La mayor cantidad de muestras (74 %) fue tomada de árboles muertos (árboles caídos, muertos en pie y tocones) y una menor en cantidad (26 %) de árboles vivos (Tabla 4.2). Se logró fechar un total de 50 muestras (74 %), las cuales presentaron 596 cicatrices de incendio en total. No fue posible fechar 18 muestras (26 %) por presentar madera podrida, anillos demasiado delgados (microanillos) o un número insuficiente de anillos para permitir un fechado confiable.

Tabla 4.2. Características de los árboles muestreados

Sitio	Muestras colectadas	Usadas en el estudio	Vivas	Tocón	Muertos en pie	Especies	Diámetro promedio
PB	46	33	10	16	7	Par, Pay, Pte, Psm	45.9
PA	22	17	0	7	10	Par, Pay	46.4
Compuesto	68	50	10	23	17		

Nota: Las especies de árboles son: *Pinus arizonica* (Par), *Pinus ayacahuite* (Pay), *Pinus teocote* (Pte) y *Pseudotsuga menziesii* (Psm).

La cicatriz de fuego más antigua identificada para toda el área estudio se fechó para el año 1582, y la más reciente se dató para el año 1998 (Figura 4.3), este último incendio fue registrado en un solo árbol en la PB, un incendio muy localizado. El régimen de incendios en la parte alta de la cuenca del Nazas muestra alta frecuencia entre sitios y a través del tiempo hasta inicios de la década de 1950 (Figura 4.3). Aunque la PB como la PA presenta árboles fechados antes de 1700 y 1600, respectivamente; el tamaño adecuado de muestra para el análisis estadístico se alcanzó a partir del año 1739 en adelante para ambos sitios y el compuesto.

De 104 fechas de incendio determinadas para el período 1739-1960, 53 incendios (51%) se registraron para ambos sitios. Los tres incendios más antiguos (1582, 1584 y 1660) quemaron sólo la PA. En la PB los incendios más viejos fueron 1696 y 1699. El primer incendio registrado por ambos sitios fue 1729, 12 de los incendios más extensos se registraron en ambos sitios y dos de las fechas de incendios más recientes (1982 y 1998) se registraron sólo en la PB (Figura 4.3).

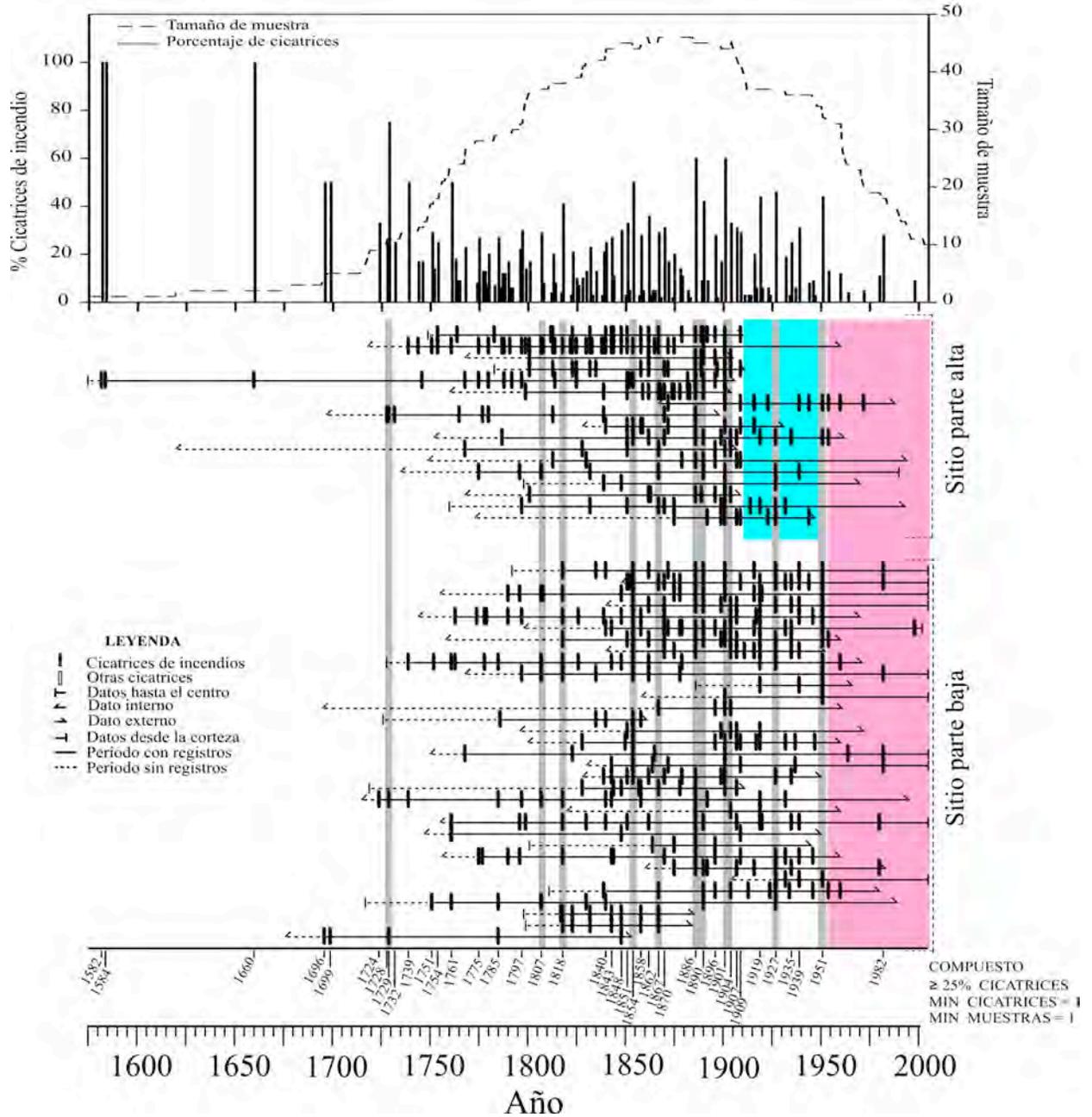


Figura 4.3. Historia de incendios para la parte alta de la cuenca del río Nazas, noroeste del estado de Durango, que comprende el período de 1575-2008. Las líneas horizontales representan cada una de las muestras colectadas en campo, las líneas verticales resaltadas en color negro indican las cicatrices de incendios y las líneas de color gris muestran incendios extensos que afectaron ambos sitios. El recuadro en color rosa señala un período extenso de 50 años con baja ocurrencia de incendios para ambos sitios y en color azul se muestra una baja frecuencia de incendios desde inicios del siglo XX para el sitio de mayor elevación (100 años con baja ocurrencia de incendios).

La sincronía en la frecuencia de incendios tanto en la PB como en la PA, se interrumpió a mediados del siglo XX. Sin embargo, en la PA se registró una baja frecuencia de incendios desde los primeros años del siglo XX (Figura 4.3). El año 1951, representa el último incendio extenso ($\geq 25\%$) con sincronía entre ambos sitios (Figura 4.3). Al considerar los eventos de incendio cuyas cicatrices están presentes en $\geq 10\%$ de las muestras (incendios de mediana intensidad) el último incendio registrado por ambas áreas fue en 1960. Para la PB, posterior a 1951, no se registró sincronía de incendios hasta 1982, lo que representa un intervalo de 32 años (1951-1982) libre de incendios extensos. El último incendio en la PA fue registrado por un solo árbol en el año de 1972, existe un período libre de incendios de 37 años (1972-2008). Para la PB el último incendio se registró en un solo árbol en el año 1998, registrándose un intervalo libre de incendios de 10 años (1998-2008). Aunque al considerar incendios extensos (aquellos cuyas cicatrices se encuentran en $\geq 25\%$ de las muestras), se puede indicar un intervalo libre de incendios de 27 años (1982-2008). En general, ambas áreas en las últimas décadas presentan un cambio en la frecuencia de incendios, el intervalo actual libre de incendios extensos (es decir los registrados en $\geq 10\%$ o $\geq 25\%$ de las muestras) tanto en la PB como para la PA es de 27 y 48 años, respectivamente.

4.5.1. Estacionalidad de los incendios

De un total de 596 cicatrices fechadas, se logró determinar su posición dentro del anillo de la mayoría de las cicatrices (94 %, 560 de las cicatrices, Tabla 4.3). Ninguna cicatriz fue encontrada en la estación de dormancia, las cicatrices en la porción de inicio de la madera temprana fueron la más frecuentes (93.8 % del total). En la mitad de la madera temprana se determinó el 5.9 % de las cicatrices de fuego. Menos del 1 % de las cicatrices ocurrieron al

final de la madera temprana y ninguna se encontró en la madera tardía. La distribución de la posición de las cicatrices en el anillo de crecimiento fue similar entre sitios, más del 90 % de las cicatrices se categorizaron en la estación de primavera y un bajo porcentaje en verano (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Categorización de la estación de ocurrencia de los incendios registrados en los últimos 400 años en la la cuenca del río Nazas, Durango.

Sitio/periodo de análisis	Estación determinada	Estación no determinada	D	EE	ME	LE	L	Incendios de Primavera ^A	Incendios de Verano ^B
PB 1670-2008									
Número	334	21	0	304	29	1	0	304	30
Porcentaje	94.1	5.9	0	91.0	8.7	0.3	0	91.0	9.0
PA 1575-1994									
Número	226	15	0	221	4	1	0	221	5
Porcentaje	93.8	6.2	0	97.8	1.8	0.4	0	97.8	2.2
Compuesto 1575-2008									
Número	560	36	0	525	33	2	0	525	35
Porcentaje	94.0	6.0	0	93.8	5.9	0.4	0	93.8	6.2

Nota: Con base en la metodología de Grissino-Mayer (2001) se definió la estación de ocurrencia de incendios. ^A Primavera = Dormancia + inicio de madera temprana (D+EE). ^B Verano = Mitad de la madera temprana + final de la madera temprana + madera tardía (ME+LE+L).

4.5.2. Intervalos medios de frecuencia de incendios

El MFI para todas las cicatrices registró una diferencia menor a un año entre sitios (PB de 3.1 años; PA 2.6 años; el compuesto de 2.2 años, Tabla 4.4). El MFI para los incendios más extensos (aquellos que quemaron ≥ 25 % de las muestras) fue más amplio, y varió de 8.6 años en la PB, a 6.2 años en la PA y 8.1 años para el compuesto (Tabla 4.4). Los valores de WMPI fueron de 2.6 años para la PB, 2.4 años para la PA y 2.0 años para el compuesto, al considerar todos los incendios (Tabla 4.4). Cuando los datos se filtraron para incluir solamente años de incendios que se registraron en ≥ 25 % de las muestras, se encontró 7.2, 5.4 y 6.9 años para la PB, PA y el compuesto, respectivamente (Tabla 4.4). Los intervalos de fuego promedio por muestra fueron aproximadamente dos veces más que los registrados al considerar el MFI de 25 %, en un rango de 13.0 a 16.9 años. Se reconstruyó una frecuencia histórica de incendios de 3 a 7 años aproximadamente y una probabilidad de ocurrencia de incendios de frecuencia similar (2 a 7 años), esto considerando incendios de baja intensidad e incendios de mayor severidad, respectivamente.

4.5.3. Relación clima-incendios

El Análisis de Sobreposición de Época (SEA) en los últimos 300 años indica una relación significativa ($P < 0.05$) de los incendios con la variabilidad de la precipitación, donde los incendios más extensos y severos, se asocian a una disminución de la lluvia, tal como lo muestra el SEA (Figura 4.4). La variabilidad de ENSO (NIÑO 3) tuvo un efecto significativo ($P < 0.05$) en la frecuencia histórica de los incendios (Figura 4.5). La fase fría del ENSO (La Niña) se asoció significativamente ($P < 0.05$) con severas sequías en la región y ha modulado la frecuencia histórica de los incendios de los últimos tres siglos en esta región del estado de Durango.

Tabla 4.4. Estadísticas de la distribución de los intervalos de incendios, Ciénega de la Vaca, cuenca alta del río Nazas, Durango, México.

Sitio/Período de análisis	Categoría de evento de incendio	No. intervalos	MFI	Min	Max	Intervalo promedio por muestra	WMPI
PB 1739-1982	Todos los eventos	77	3.16	1	16	16.9	2.69
	Eventos presentes en >10% de las muestras	56	4.34	1	20		3.73
	Eventos presentes en >25% de las muestras	28	8.68	1	31		7.22
PB 1739-1954	Todos los eventos	73	2.95	1	12	16.4	2.59
	Eventos presentes en >10% de las muestras	53	4.00	1	12		3.60
	Eventos presentes en >25% de las muestras	27	7.85	1	22		6.80
PA 1739-1954	Todos los eventos	76	2.63	1	7	13.0	2.45
	Eventos presentes en >10% de las muestras	60	3.33	1	9		3.14
	Eventos presentes en >25% de las muestras	32	6.25	1	19		5.44
Compuesto 1739-1982	Todos los eventos	107	2.27	1	8	15.6	2.04
	Eventos presentes en >10% de las muestras	62	3.92	1	20		3.44
	Eventos presentes en >25% de las muestras	30	8.10	2	31		6.97
Compuesto 1739-1954	Todos los eventos	102	2.11	1	7	15.3	1.94
	Eventos presentes en >10% de las muestras	59	3.64	1	12		3.37
	Eventos presentes en >25% de las muestras	29	7.31	2	22		6.61

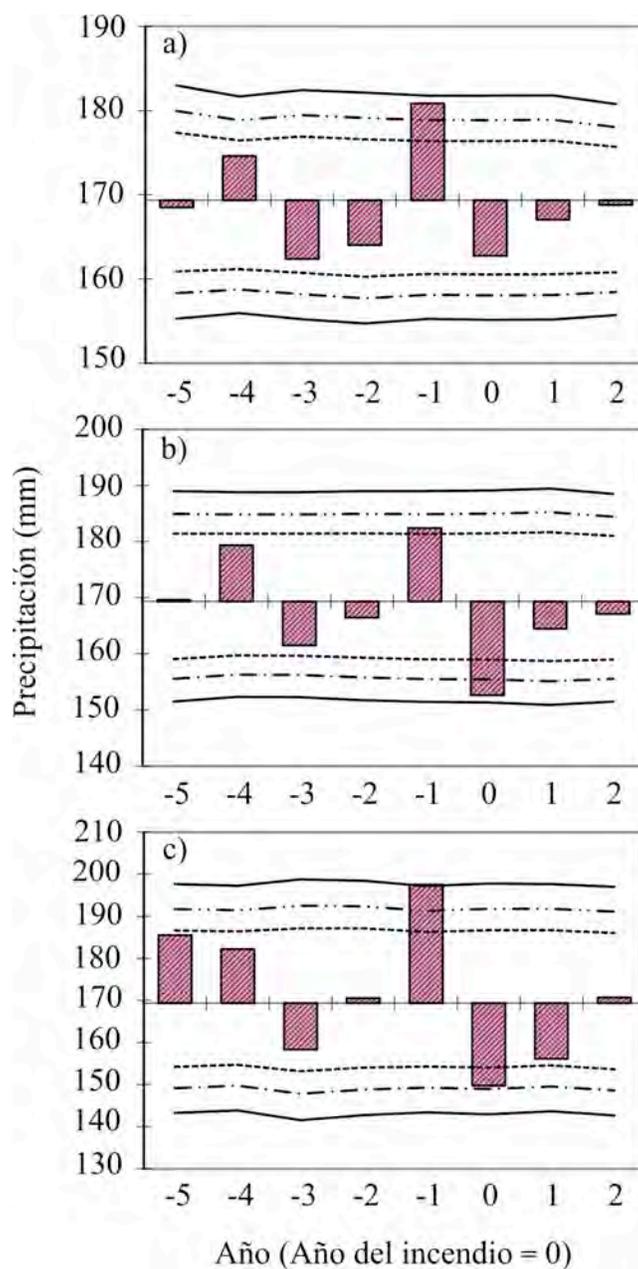


Figura 4.4. Análisis de Sobreposición de Época (SEA) de la relación entre la precipitación reconstruida invierno-primavera para la parte alta de la cuenca del río Nazas (Cerano *et al.*, 2012) y los años de incendios indicados en la Figura 3, tanto para la PB como para la PA. (a) Análisis con todas las cicatrices de incendios. (b) Incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. (c) Incendios registrados en $\geq 25\%$ de las muestras. El año del incendio está indicado por el 0, condiciones climáticas cinco años previos al incendio se muestran con valores negativos, y los dos años posteriores al incendio con valores positivos. Las líneas horizontales superiores e inferiores en cada gráfico indican los intervalos de confianza (punteada, $P < 0.05$; discontinua, $P < 0.01$; sólida, $P < 0.001$).

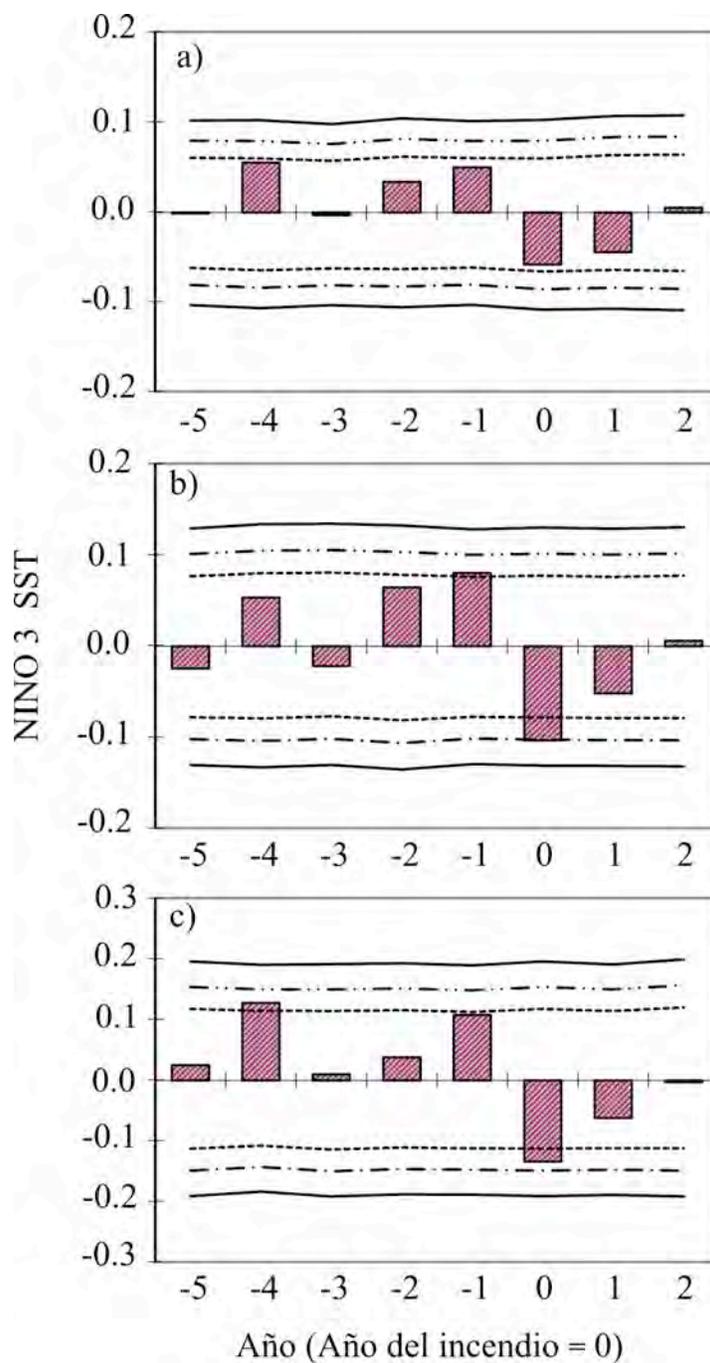


Figura 4.5. Análisis de Sobreposición de Época (SEA) de la relación entre el índice NIÑO 3 (Cook, 2000a) y la ocurrencia de incendios para los sitios PB y PA. (a) Análisis con todas las cicatrices de incendios. (b) Incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. (c) Incendios registrados en $\geq 25\%$ de las muestras. El año del incendio está indicado por el 0, condiciones climáticas cinco años previos al incendio se muestran con valores negativos, y los dos años posteriores al incendio con valores positivos. Las líneas horizontales superiores e inferiores en cada gráfico indican los intervalos de confianza (punteada, $P < 0.05$; discontinua, $P < 0.01$; sólida, $P < 0.001$).

Así mismo, los años de incendio se asociaron con valores de PDSI significativamente secos ($P < 0.05$), caracterizados por valores de PDSI negativos, como muestra el SEA (Figura 4.6). Los años inmediatamente anteriores al incendio fueron significativamente húmedos ($P < 0.05$) tanto para la precipitación como para el NIÑO 3 (Figuras 4.4 y 4.5). Para el PDSI (Figura 4.6), dos años antes del incendio se registraron condiciones de humedad por arriba de la media pero no de forma significativa ($P > 0.05$).

Los gráficos de espectros potenciales de ondeleta y dominio de coherencia muestran que la relación entre el ENSO (NIÑO 3) y la variabilidad de la precipitación presenta una alta potencia común (Figura 4.7). Todas las secciones significativas indican coherencia en fase entre las series, lo que sugiere que la variabilidad de la precipitación en esta región del norte de México es modulada de forma significativa ($P < 0.05$) por el fenómeno ENSO.

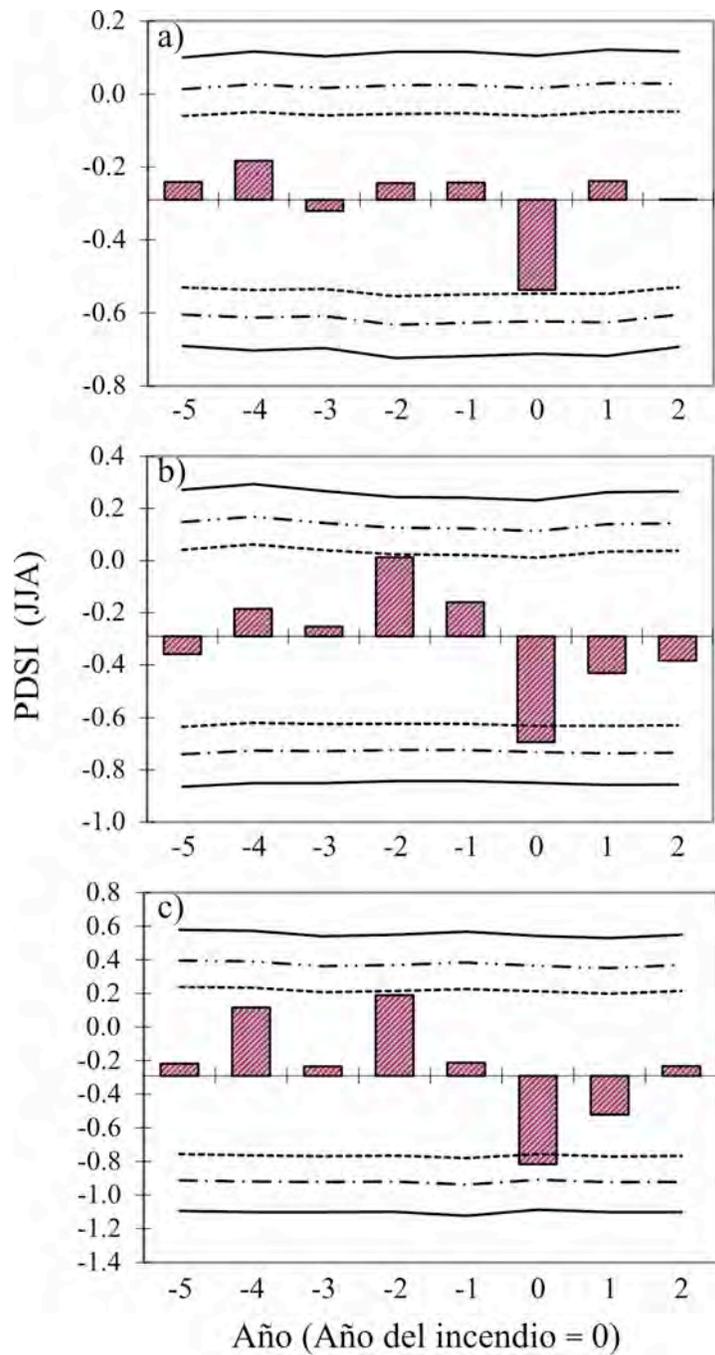


Figura 4.6. Análisis de Sobreposición de Época (SEA) de la relación entre PDSI (Cook, 2000b) y la ocurrencia de incendios para los sitios PB y PA. (a) Análisis con todas las cicatrices de incendios. (b) Incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. (c) Incendios registrados en $\geq 25\%$ de las muestras. El año del incendio está indicado por el 0, condiciones climáticas cinco años previos al incendio se muestran con valores negativos, y los dos años posteriores al incendio con valores positivos. Las líneas horizontales superiores e inferiores en cada gráfico indican los intervalos de confianza (punteada, $P < 0.05$; discontinua, $P < 0.01$; sólida, $P < 0.001$).

4.6. Discusión

4.6.1. Frecuencia de incendios

Los incendios superficiales ocurrieron con frecuencia en la cuenca del río Nazas desde mediados del siglo XVIII hasta mediados del siglo XX. Los valores estimados de MFI y WMPI son iguales entre sí, de 3 y 6 años, considerando todos los incendios y aquellos de mayor severidad ($\geq 25\%$), respectivamente. Resultados similares a los regímenes de incendios reconstruidos, se han reportado para otras áreas de la Sierra Madre Occidental en Durango (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Drury y Veblen, 2008) y Chihuahua (Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010). La frecuencia histórica de incendios y la probabilidad de recurrencia en los bosques de la Sierra Madre Occidental, presentan un comportamiento similar entre sitios, lo cual indica que previo a 1950, los incendios fueron modulados por eventos climáticos que cubrieron un área geográfica muy extensa.

4.6.2. Estacionalidad de los incendios

Para la PB, PA y el compuesto, se determinó que más del 90% de los incendios se registraron en primavera. La mayoría de los incendios reconstruidos se presentaron antes del inicio de las lluvias provocadas por el Monzón de Norteamérica, que humedecen los combustibles existentes y estimulan el nuevo crecimiento de pastos y hierbas (Heyerdahl y Alvarado, 2003). Esto se observa de manera consistente para la mayoría de los incendios en la Sierra Madre Occidental, que se registran durante la estación seca de primavera, cuando las descargas eléctricas son más comunes (Douglas *et al.*, 1993; SEMARNAP, 2000; Heyerdahl y Alvarado, 2003).

Estudios desarrollados sobre la fenología cambial indican que los incendios en las zonas fronterizas entre México y Estados Unidos, se han registrado durante el período seco de primavera (abril-junio), favorecido por la presencia de rayos (Baisan y Swetnam, 1990; Swetnam *et al.*, 2001). Reconstrucciones de regímenes de incendios para diferentes sitios en la Sierra Madre Occidental, tanto en Durango (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Drury y Veblen, 2008) como en Chihuahua (Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010), reportan mayor frecuencia de incendios también durante este período.

4.6.3. Cambios temporales en los regímenes de incendios

La tendencia temporal en la frecuencia de incendios se mantuvo de forma consistente de 1700 a 1900 para ambas áreas de estudio (PB y PA). Sin embargo, en la PA se registró un cambio en la frecuencia de incendios a partir de los primeros años del siglo XX; a diferencia de la PB que presentó un cambio a inicio de la segunda mitad del siglo XX, 50 años más tarde. En general, la cuenca del río Nazas muestra una modificación de la frecuencia natural de incendios a partir de los primeros años de la década de 1950. Estudios sobre regímenes de incendios desarrollados para el norte de México, específicamente para el estado de Durango, han reportado resultados similares, una exclusión del fuego posterior a 1950 (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003). La variabilidad o cambio abrupto en los regímenes del fuego en el siglo XX para diversas áreas a lo largo de la Sierra Madre Occidental, se atribuyen a cambios en los patrones de tenencia de la tierra (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Cortes *et al.*, 2012).

Durante la administración del presidente Lázaro Cárdenas (1934-1940) cerca de 800,000 personas en México recibieron alrededor de 20 millones de hectáreas (Sanderson, 1984; Thompson y Wilson, 1994). La distribución de las tierras ejidales, provocó una ola de migración de personas de las zonas agrícolas de las partes bajas, a establecerse en las áreas más altas en los bosques de montaña, lo que resultó en un cambio del uso tradicional de la tierra (Heyerdahl y Alvarado, 2003). El movimiento de personas a los ejidos forestales en la Sierra Madre Occidental a mediados de los 1900s, pudo haber modificado los regímenes de incendios al propiciar una gran discontinuidad de los combustibles, dado que se introdujo una mayor intensificación de pastoreo de ganado, construcción de caminos y la explotación forestal (Fulé y Covington, 1997; Kaib, 1998; Heyerdahl y Alvarado, 2003). Estos autores atribuyen que todos o algunos de estos cambios en el uso del suelo, pudieron haber propiciado el cese del fuego a partir de 1950.

En la parte alta de la cuenca del Nazas, las principales actividades productivas son: la ganadería extensiva, el aprovechamiento forestal y la agricultura de temporal, actividades que son el origen de cambios significativos en el uso de la tierra. La principal causa del cambio de uso del suelo es la sobre-explotación forestal, seguida de la ganadería extensiva. La explotación de los recursos forestales posiblemente dio inicio desde el reparto de tierras o formación de los ejidos; sin embargo, su explotación de forma regulada bajo un programa de manejo se inició en 1970 (Descroix *et al.*, 2004). El manejo forestal implica un control mayor de la presencia de incendios. La influencia humana ha alterado el régimen de incendios, propiciando mayor amplitud entre eventos, mayor acumulación de combustible y por lo tanto un incremento del riesgo y la susceptibilidad del área a incendios más extensos y severos. Se rechaza nuestra primera hipótesis de investigación que plantea que la

frecuencia de incendios en la cuenca del río Nazas se ha mantenido constante hasta inicios del siglo XXI.

4.6.4. Relación clima-incendios

La variabilidad anual del clima regional ha influido de manera significativa ($P < 0.05$) en la frecuencia histórica de incendios, particularmente en los incendios más extensos registrados en la cuenca alta del Nazas (Figura 4.4). Resultados similares se han reportado para otros sitios de estudio en la Sierra Madre Occidental, donde incendios extensos ocurrieron durante años con disponibilidad de humedad inferior a la media, precedidos por años con condiciones abundantes de humedad (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Cerano *et al.*, 2010).

El ENSO es el fenómeno océano-atmosférico más importante que causa la variabilidad climática a nivel global en escalas de tiempo interanual y estacional (Wolter y Timlin, 2011). El análisis de Wavelet Coherence pone de manifiesto que la variabilidad de la lluvia para la cuenca alta del Nazas es modulada de manera significativa ($P < 0.05$) por este fenómeno circulatorio a diferentes frecuencias y a escalas de tiempo en los últimos 400 años (Figura 4.7). La fuerte influencia de ENSO en modular la variabilidad de la lluvia para esta región del norte de México, ha sido documentada en diferentes estudios (Stahle *et al.*, 1998; Magaña, 1999; Cerano *et al.*, 2011; Villanueva *et al.*, 2017).

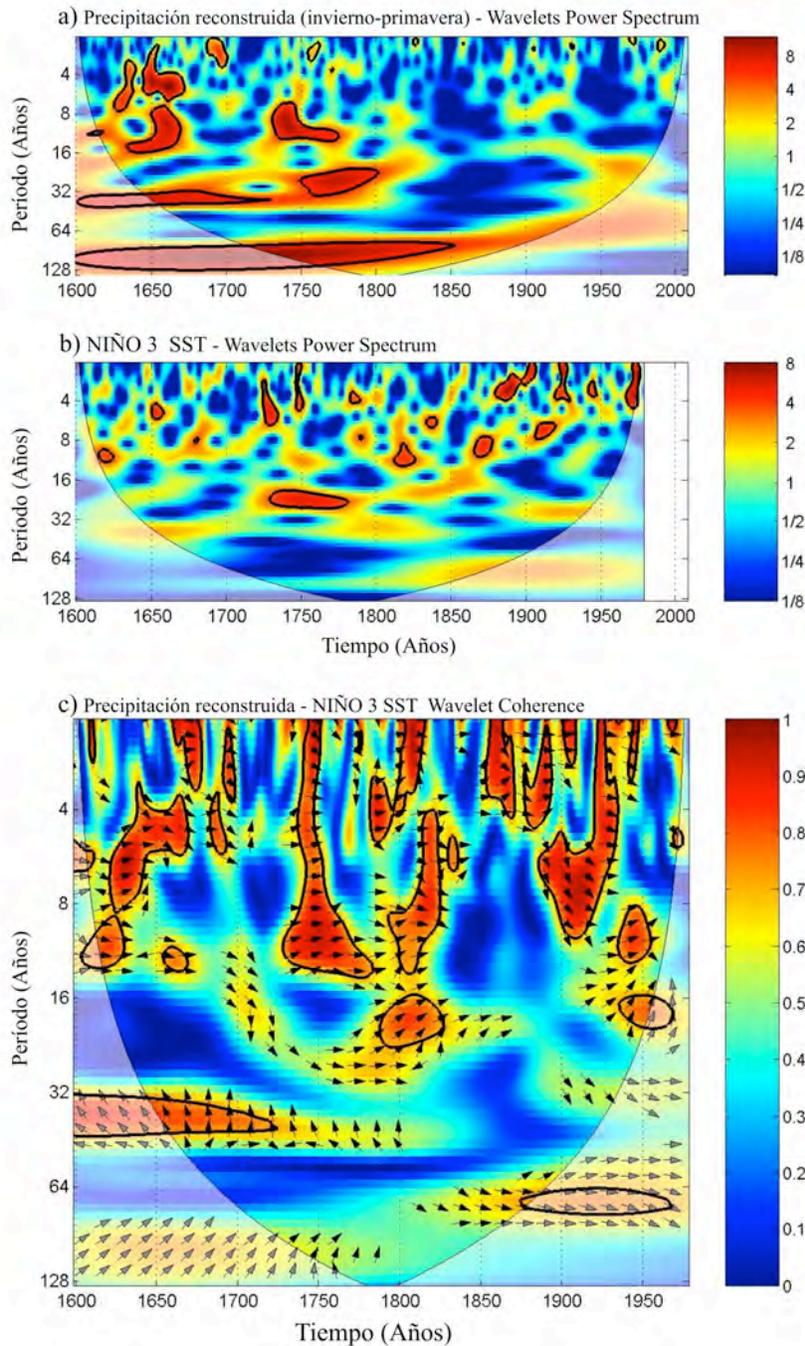


Figura 4.7. Wavelet Power Spectrum (Morlet) para las series de precipitación reconstruida (Invierno-Primavera) (a) y el NIÑO 3 SST (Diciembre-Febrero) (b); y Wavelet Coherence entre las series de tiempo reconstruidas de precipitación (Invierno-Primavera) y el NIÑO 3 SST (Diciembre-Febrero) (c). Las manchas de color rojo con contornos gruesos de color negro indican una relación significativa ($P < 0.05$) entre ambas variables y el cono de influencia se muestra con un tono más claro. Los vectores indican una relación en fase entre el NIÑO 3 SST y la precipitación reconstruida (flechas horizontales hacia la derecha y la izquierda implican una relación en fase y anti fase, respectivamente; flechas en posición vertical indican que los fenómenos están desfasados).

Históricamente la frecuencia de incendios en los últimos 300 años (1700-2000) ha sido modulada por ENSO, pues los años de incendios estuvieron relacionados de manera significativa ($P < 0.05$) con la variabilidad de este fenómeno (Figura 4.5). Los incendios más extensos estuvieron sincronizados durante años La Niña (Figura 4.5), que representa condiciones de sequía (fase negativa de ENSO). Por el contrario, años El Niño representan condiciones más frías y de mayor humedad especialmente en invierno en el norte de México (Cavazos y Hastenrath, 1990). Una mayor humedad disponible asociada a eventos El Niño, incrementa el crecimiento de plantas herbáceas y pastos, por lo tanto, el siguiente año al registrarse condiciones de sequía, estas plantas herbáceas quedan en el suelo como combustible fino. La acumulación en cantidad y continuidad de estos combustibles en el bosque, incrementa la probabilidad de que se registren incendios más intensos y severos que cubrirán una mayor superficie (Drury y Veblen, 2008).

Existe una clara evidencia de que la fase fría del ENSO (La Niña) se sincroniza de manera significativa ($P < 0.05$) con la frecuencia de incendios extensos para la cuenca del río Nazas (Figura 4.5), como ha sido observado para otras áreas del estado de Durango (Heyerdahl y Alvarado, 2003). Sin embargo, otros trabajos desarrollados al sur del mismo estado, han reportado una relación positiva pero no significativa ($P > 0.05$) entre la disminución de lluvia (La Niña) y la frecuencia histórica de incendios (Fulé y Covington, 1999; Drury y Veblen, 2008). Puede ser que el ENSO presente una influencia significativa ($P < 0.05$) modulando la variabilidad climática y la frecuencia de incendios al norte de Durango; sin embargo, su intensidad disminuye hacia el sur del estado, presentando una influencia positiva no significativa ($P > 0.05$) sobre la frecuencia de incendios (Molina *et al.*, 2017).

Probablemente otros fenómenos climáticos pudieran explicar la variabilidad en la frecuencia de incendios que se presentan para esa región (Brown *et al.*, 2008).

Así mismo, los incendios más extensos se relacionan de manera significativa ($P < 0.05$) con valores negativos de PDSI, años con veranos secos (Figura 4.6), lo que sugiere que otros factores climáticos diferentes a La Niña, propician condiciones de sequías, y por lo tanto favorecen la incidencia de incendios (Brown *et al.*, 2008).

Con base en el MXDA (Stahle *et al.*, 2016), se desarrollaron mapas específicos de las condiciones climáticas durante seis años de incendios severos (1818, 1854, 1890, 1901, 1951 y 1982) en la cuenca alta del Nazas. Todos estos años presentan condiciones significativas de sequía para esta región del norte del país, sequía que influyó en la propagación de fuertes incendios (Figura 4.8). Se acepta la segunda hipótesis de investigación que establece que el clima fue el factor más influyente en modular la frecuencia histórica de incendios para esta región del norte de México, al menos hasta la década de 1950.

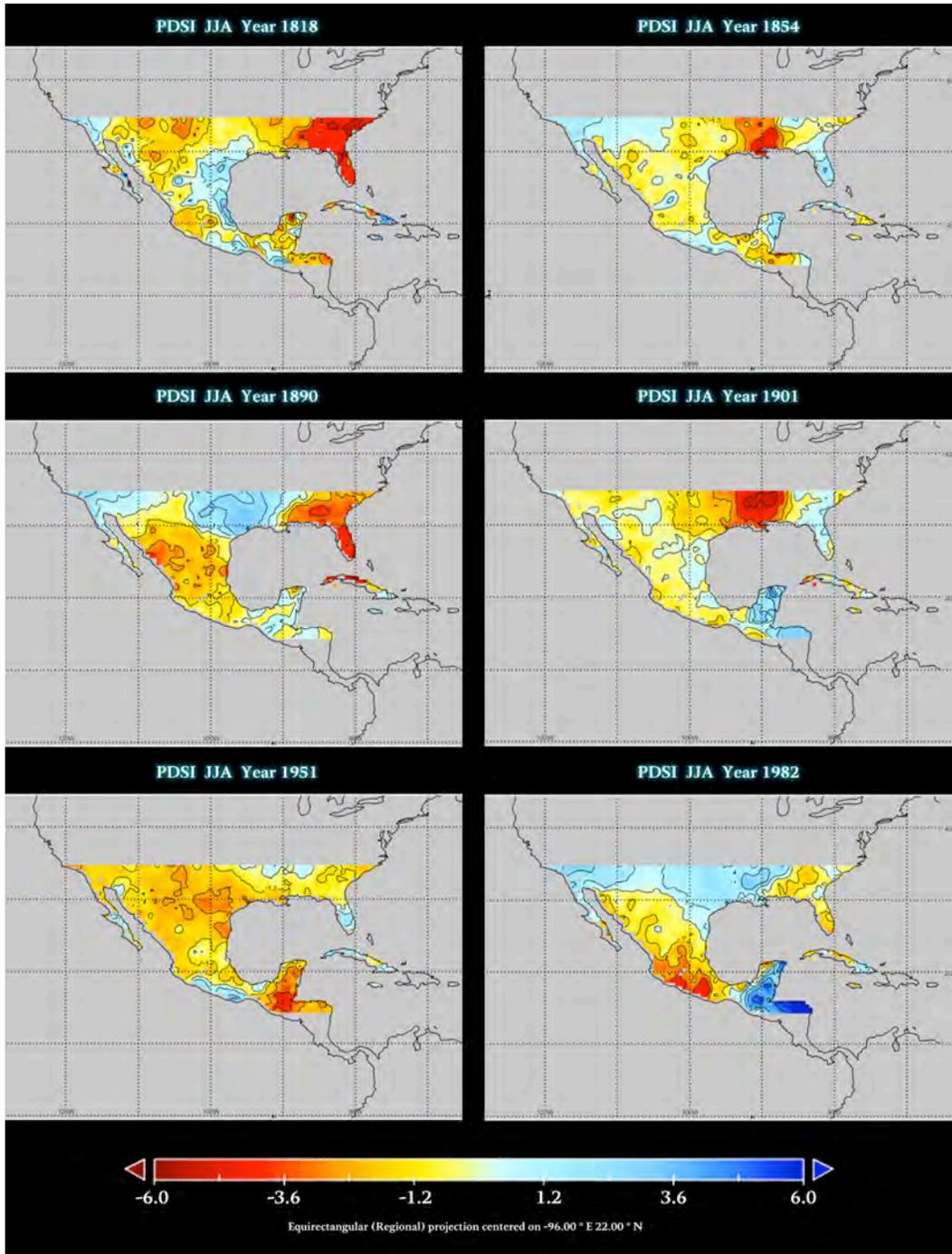


Figura 4.8. Mapas de sequía desarrollados empleando el Atlas de Sequía para México (MXDA, por sus siglas en inglés) (Stahle *et al.*, 2016). Los mapas muestran las condiciones climáticas para seis años (1818, 1854, 1890, 1901, 1951 y 1982) en los cuales la mayoría de las muestras fueron dañadas por incendios en la cuenca alta del río Nazas.

4.6.5. Implicaciones de manejo

Son pocos los estudios sobre historia del fuego, por lo que no se sabe lo suficiente acerca de la ecología de los incendios de los bosques de México (Rodríguez y Fulé, 2003). Las principales aportaciones de este estudio son que el fuego en los últimos tres siglos ha jugado un papel importante en la dinámica de este ecosistema. Los regímenes de incendios presentan una variabilidad similar tanto en la parte baja como en la parte más alta de la cuenca del río Nazas, lo que indica que incendios extensos han afectado a todo el gradiente altitudinal. Un aspecto relevante es que se detectó un cambio importante en la frecuencia de incendios posterior a 1950. Éste cambio en la frecuencia de incendios no es exclusivo para esta área, pues estudios desarrollados a lo largo de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, reportan una exclusión del fuego a partir de los primeros años de 1950 (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003). La mayor amplitud en los intervalos de la frecuencia de incendios propicia un incremento en la acumulación de combustibles (hojas, pastos, arbustos y ramas), tanto en cantidad como en continuidad (White y Vankat, 1993; Skinner *et al.*, 2008), lo que puede favorecer la presencia de incendios más severos que afectarán en mayor escala, en particular cuando esto coincida con un año de sequía.

La importancia del papel de los bosques en la cuenca del Nazas es bien conocida, controla la cantidad y temporalidad del flujo del agua, protege los suelos de ser arrastrados, evita sedimentación, degradación de los ríos y la pérdida de fertilidad (Descroix *et al.*, 2004). El riesgo y susceptibilidad de estos bosques ante la alteración de los regímenes del fuego se ha incrementado. La influencia significativa de ENSO en la modulación de la variabilidad climática y la frecuencia de incendios severos, pone de manifiesto que eventos futuros de ENSO en su fase fría (La Niña) representan un alto riesgo de incidencia de incendios para

esta zona. Los eventos de ENSO en la actualidad muestran cierta predictibilidad, por lo que conocer con antelación su incidencia, permitirá desarrollar planes de manejo y establecer medidas preventivas en tiempo para disminuir sus efectos negativos.

4.7. Conclusiones

La reconstrucción de la historia de los incendios para los últimos 300 años en la parte alta de la cuenca del Nazas, indica un cambio en la frecuencia de incendios en las últimas décadas y una relación significativa con la variabilidad climática. Los incendios más extensos se asocian de manera significativa ($P < 0.05$) con una disminución de lluvia y condiciones negativas (sequía) de ENSO (NIÑO 3) y PDSI. Se rechaza la primera hipótesis de investigación que establece que la frecuencia de incendios se ha mantenido sin interrupción hasta el siglo XXI, y se acepta la segunda hipótesis, dado que se determinó una influencia significativa del clima en la frecuencia histórica de los incendios.

La información generada en este estudio resulta esencial para los encargados de manejo del bosque en esta región, quienes deberán reducir el peligro de incendios severos. El conocimiento de la historia de los regímenes de incendios fundamenta el diseño de estrategias para ejecutar acciones de manejo del fuego. Se debe mantener la frecuencia de incendios dentro de la amplitud de su variación histórica, con el objetivo de obtener beneficios ecológicos, reducir el riesgo de incendios severos, garantizar la permanencia de estos bosques y en consecuencia, el buen funcionamiento de cada uno de los diferentes procesos ecológicos en la cuenca, que indudablemente se reflejará en la provisión de

servicios ecosistémicos para los asentamientos humanos ubicados en la parte baja de la cuenca.

Este estudio no comprende la superficie total del área boscosa de la cuenca, por lo cual es importante desarrollar una red más amplia de estudios de fuego, que permita generar mayor información sobre los regímenes históricos. Esto a su vez; debe ser complementado con estudios que determinen las cargas de combustibles actuales, que soporten la definición de áreas de mayor riesgo de incendios. Restaurar condiciones similares a las características históricas de la frecuencia de incendios, será papel de los encargados del manejo forestal de esta zona, específicamente la introducción de incendios superficiales que permitan reducir los intervalos de fuego de 27 y 48 años para la PB y PA, respectivamente; a los intervalos históricos de 3 a 8 años. En la PB existen rodales de *Pseudotsuga menziesii*, especie que ha sobrevivido por 400 años o más tiempo (Cerano *et al.*, 2012) y resistido la frecuencia de incendios superficiales; esta especie podría sucumbir ante incendios severos, por lo que resulta esencial la planeación de manejo del fuego para esta y otras áreas en el norte de México.

Capítulo 5. Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* Lindley en el norte del estado de Puebla, México

5.1. Introducción

La variabilidad climática es un factor determinante en la variación histórica de la actividad de incendios forestales (Swetnam y Betancourt, 1990; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005). En las últimas décadas el incremento de la actividad de incendios se ha atribuido al cambio climático global (Westerling *et al.*, 2006). La fuerte vinculación entre el fuego y el clima (Swetnam y Betancourt, 1990), pone de manifiesto la relevancia de conocer la relación clima-incendios en distintos tipos de ecosistemas forestales con el fin de diseñar prácticas de manejo del fuego y de adaptación al cambio climático.

Los incendios forestales requieren biomasa, condiciones atmosféricas propicias para la propagación del fuego (es decir ambiente seco, caliente y vientos fuertes) y una fuente de ignición (Krawchuk y Moritz, 2011). El clima puede afectar estos tres factores en conjunto de diferentes maneras y en múltiples escalas de tiempo. Los regímenes del fuego en los ecosistemas han cambiado a través de la historia, especialmente en relación con los cambios en el clima y las actividades humanas (Marlon *et al.*, 2008; Pausas y Fernández, 2011).

Para la parte norte de México, se han desarrollado diversos estudios de reconstrucción de la historia del fuego, los cuales han permitido determinar la influencia de la variabilidad climática en la frecuencia de incendios (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010; Yocom *et al.*, 2010). Así mismo, se han generado diferentes estudios con resultados que ponen de manifiesto el efecto de la actividad humana en el cambio de los regímenes históricos del fuego durante diferentes períodos del siglo XX (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010; Yocom *et al.*, 2010; Poulos *et al.*, 2013).

Para el centro del país, este tipo de estudios son escasos; actualmente solo se ha publicado una cronología de incendios para los pinares de alta montaña del Pico de Orizaba, Veracruz/Puebla (Yocom y Fulé, 2012) y algunos trabajos más en los bosques de *Pinus douglasiana* Martínez en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manatlán, Jalisco (Llamas, 2013; Cerano *et al.*, 2015).

La comunidad de *Pinus hartwegii* presenta un régimen de incendios superficiales, frecuentes y de baja intensidad, se estima que la frecuencia promedio de incendios en estas comunidades no es superior a los 10 años, y probablemente la media está en torno a cinco años (Rodríguez, 2001). A la fecha no se ha generado una red de investigaciones fundamentada en técnicas dendrocronológicas para estudiar el régimen de fuego en este ecosistema, uno de los primeros trabajos para este tipo de bosque en el Pico de Orizaba, reporta frecuencias de 3 a 9 años (Yocom y Fulé, 2012).

Para generar mayor conocimiento sobre los regímenes históricos de fuego en los bosques del centro de México, que permita evaluar el comportamiento de esta perturbación y seleccionar las estrategias más apropiadas para su manejo, se consideró el bosque de *Pinus hartwegii* Lindley enclavado en la Sierra Norte de Puebla, en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, región de mayor incidencia de incendios forestales en el estado de Puebla (Carrillo *et al.*, 2012). Ante esto, se plantearon los siguientes objetivos: 1) reconstruir la historia del fuego, 2) determinar si en las últimas décadas existe un cambio en la frecuencia de incendios y 3) analizar la relación entre las condiciones de clima (sequías) y la frecuencia histórica de incendios.

Se plantearon las siguientes hipótesis: 1) los regímenes del fuego han cambiado en las últimas décadas del siglo XX y este cambio está asociado principalmente a la influencia humana; y 2) las condiciones extremas del clima, tales como sequías, han influido históricamente en la frecuencia de incendios.

5.2. Área de estudio

Se localiza en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, en el norte del estado de Puebla, en los límites con el estado de Tlaxcala, entre los 19° 42' 06'' - 19° 42' 30'' N y 98° 13' 42'' - 98° 14' 06'' O (Figura 5.1). El bosque de *P. hartwegii* en esta zona se distribuye de 2800 a 3000 msnm.

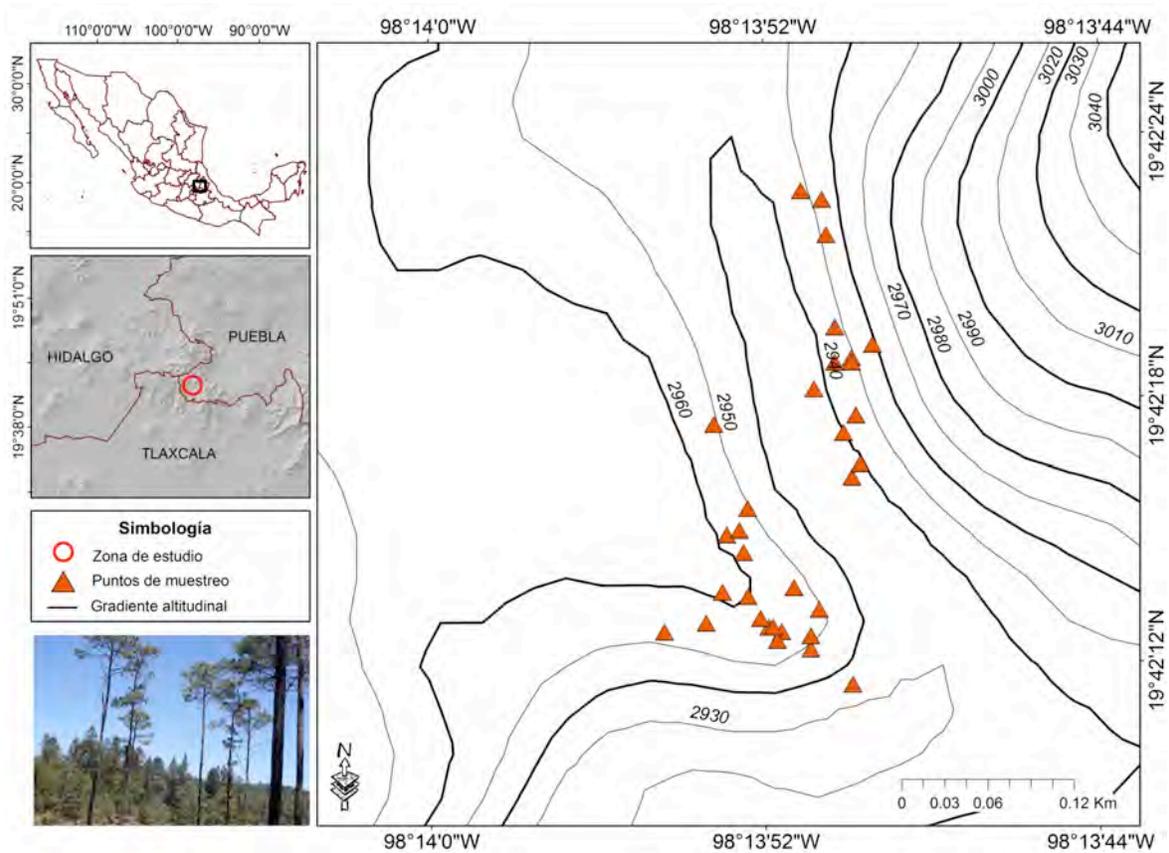


Figura 5.1. Localización geográfica del área de estudio, bosque de *Pinus hartwegii* en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, Puebla. Los triángulos representan los diferentes puntos muestreados.

El clima es del tipo *Cbw*, templado con verano fresco y régimen de lluvias de verano (García, 1987), temperaturas promedio mensuales que varían de 10°C la mínima en los meses más fríos (invierno) a 16°C en los meses más cálidos (verano), con máximas entre 20°C y 24°C. La precipitación promedio anual es de 710 mm, con el mayor porcentaje presentándose en el verano y una mínima cantidad en las estaciones de invierno-primavera (Figura 5.2), registros promedio (1961-2000) de la estación El Rosario, localizada a tres kilómetros del área de estudio y a 2700 msnm (IMTA, 2009). La estación meteorológica de referencia (El Rosario) representa el límite inferior de la distribución del bosque de *P.*

hartwegii, la temperatura media en el límite superior (3000 msnm) debe ser inferior en alrededor dos grados.

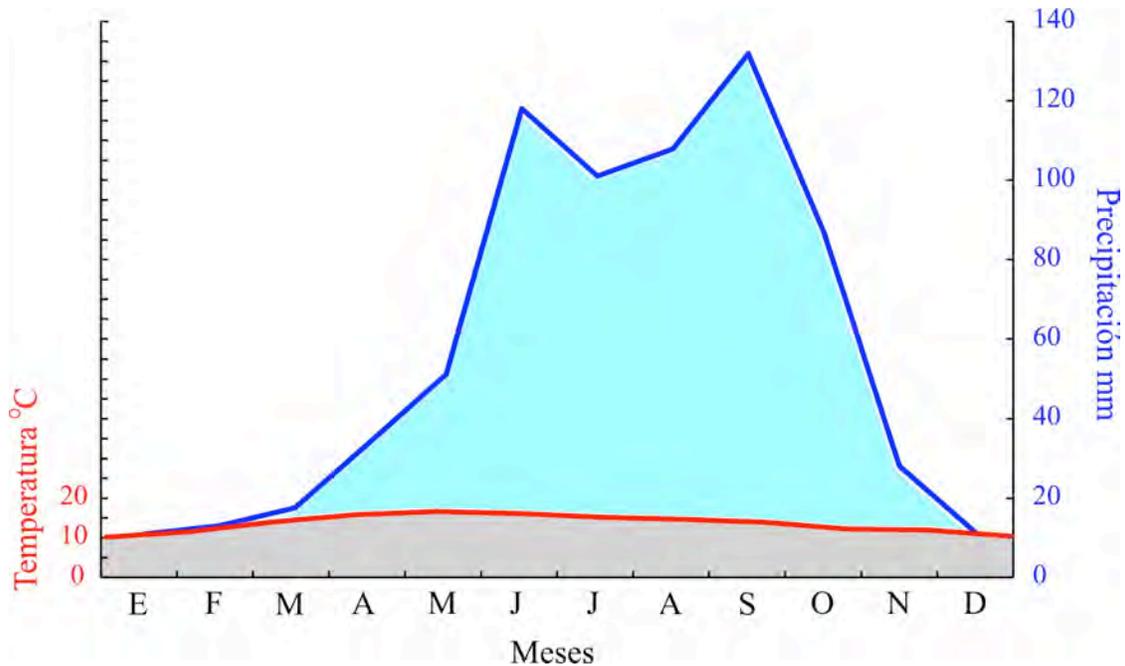


Figura 5.2. Climograma de la precipitación y temperatura media mensual del periodo 1961-2000 para la estación meteorológica El Rosario. El área muestra un régimen de lluvias de verano y una escasa precipitación durante el periodo invierno-primavera (IMTA, 2009).

La zona presenta una cubierta vegetal propia del clima templado frío. Las especies arbóreas más importantes, tanto por su abundancia como por su valor económico son los géneros de pino (*Pinus patula* Schlecht et Cham, *P. teocote* Schiede ex Schltdl, *P. hartwegii* Lindley), oyamel (*Abies religiosa* (H.B.K) Schlecht et Cham), encino (*Quercus* spp.), aile (*Alnus* sp.) y madroño (*Arbutus xalapensis* Kunth). En la parte baja de la zona boscosa, domina un bosque de coníferas con una mezcla de especies de *P. patula*, *P. teocote*, *Quercus* spp. y *Arbutus xalapensis*; mientras que en la parte alta (2900-3000 msnm) se presenta un bosque

con dominancia de *P. hartwegii* y *A. religiosa* asociados con *P. patula*, *Arbutus xalapensis*, *Quercus* spp. y *Alnus* sp.

5.3. Muestreo de árboles

En la parte alta de la zona boscosa, en una superficie aproximada de 70 ha y un gradiente de 2900-3000 msnm, se seleccionaron de forma dirigida 43 árboles de *P. hartwegii* con cicatrices de incendios. Se removieron 25 secciones parciales de árboles vivos y 18 de árboles muertos (en pie, caídos y tocones) con el apoyo de una motosierra (Figura 5.3). Se consideraron los individuos con el mayor número de cicatrices (registros de incendios), lo mejor preservados en el caso de arbolado muerto y lo más longevos posible.



Figura 5.3. (A) Bosque de *Pinus hartwegii* en el municipio de Chignahuapan, al norte del estado de Puebla, a una altitud de 2950 m. (B) Ejemplar tomado de un tocón que muestra evidencia de registros de incendios (seis cicatrices); este tipo de muestras permite extender en el tiempo la historia de incendios. (C) Sección parcial de un árbol vivo de *Pinus hartwegii* posterior a su preparación y fechado. La muestra presenta registros históricos de ocho cicatrices de incendios (Fotos Julián Cerano).

5.4. Variables climáticas

El análisis de sobreposición de época (SEA) se empleó para analizar las condiciones climáticas y su relación con la frecuencia de incendios. Como proxy del clima, se emplearon tres variables:

- 1) Una reconstrucción de precipitación local (invierno-primavera) generada con base en anillos de crecimiento de *Pinus patula* para el período 1905-2011 (Quezada, 2013).
- 2) El índice invernal (diciembre-febrero) NIÑO 3 de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Cook, 2000a) y
- 3) El índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) Junio-Agosto, grid número 86 (1684-1981) el más cercano al área de estudio (Cook, 2000b).

Estas tres variables se analizaron por separado con la reconstrucción de la historia del fuego, comparando las condiciones durante el año del incendio, cinco años previos, y dos años posteriores al mismo. Finalmente, se utilizó el Atlas de Sequía para México (MXDA, por sus siglas en inglés) (Stahle *et al.*, 2016) para analizar las condiciones climáticas de los años en que los incendios afectaron la mayoría de los árboles del sitio.

5.5. Resultados

De un total de 43 muestras con cicatrices de incendios (25 de árboles vivos y 18 de muertos) se logró fechar 40 muestras (93 %), 235 cicatrices se fecharon al año exacto de su formación; se descartaron 3 muestras (7 %), cuyo grado de deterioro impidió su fechado. El mayor número de cicatrices se observó en el año 1970 (39), el 98 % de los árboles registraron este evento que representó el incendio más extenso de la zona durante el siglo XX (Figura 5.4).

5.5.1. Frecuencia de incendios

Se logró reconstruir la historia del fuego para los últimos 136 años, que comprende el período de 1876 a 2011. Se reconstruyeron un total de 20 incendios. El incendio más antiguo se dató en el año 1890 y la cicatriz más reciente ocurrió en el año 2003 (Figura 5.4). Para el total de las 235 cicatrices de incendios, se determinó un MFI de 5.6 años y un WMPI de 5.0 años. Al considerar los eventos de incendio cuyas cicatrices aparecen registradas en el 10 % de las muestras o más, se determinó un MFI y un WMPI de 7.2 y 6.1 años, respectivamente (Tabla 5.1). Para los incendios más grandes o extensos definidos por cicatrices datadas en el 25 % de las muestras o más, los valores de MFI y WMPI fueron de 9.2 y 8.5 años, respectivamente (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Intervalos de frecuencia de los incendios para el bosque de *P. hartwegii* del ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla.

Período de análisis	Categoría de evento de incendio	Número de intervalos	Intervalo medio de frecuencia	Mínimo	Máximo	Intervalo de la mediana de la probabilidad de Weibull
1902-2011	Todos los eventos	18	5.6	2	19	5.0
	Eventos presentes en ≥ 10 % de muestras	14	7.2	2	19	6.1
	Eventos presentes en ≥ 25 % de muestras	11	9.2	2	19	8.5

5.5.2. Estacionalidad de los incendios

La posición de la cicatriz del incendio dentro del anillo de crecimiento que define la estación del año en que se registró el incendio fue determinada para el 92.3 % de las muestras; la posición de la cicatriz más común fue al inicio de la madera temprana (91.7 %), y la menos común en la madera tardía (0 %). El 91.7 % de los incendios se registraron en primavera (estación seca) y el 8.3 % en verano (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Determinación de la estacionalidad de las cicatrices de incendios en el ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla.

Sitio CHIG	Total	Estación determinada	Estación no determinada	D	EE	ME	LE	L	Incendios primavera ^A	Incendios verano ^B
Número cicatrices	234	216	18	0	198	17	1	0	198	18
Porcentaje	100	92.3	7.7	0	91.7	7.9	0.5	0	91.7	8.3

Nota: La definición de la estacionalidad de los incendios para esta región del centro de México, fue con base en la metodología de Grissino-Mayer (2001). ^A Dormancia + inicio de madera temprana (D+EE). ^B Mitad de la madera temprana + final de la madera temprana + madera tardía (ME+LE+L).

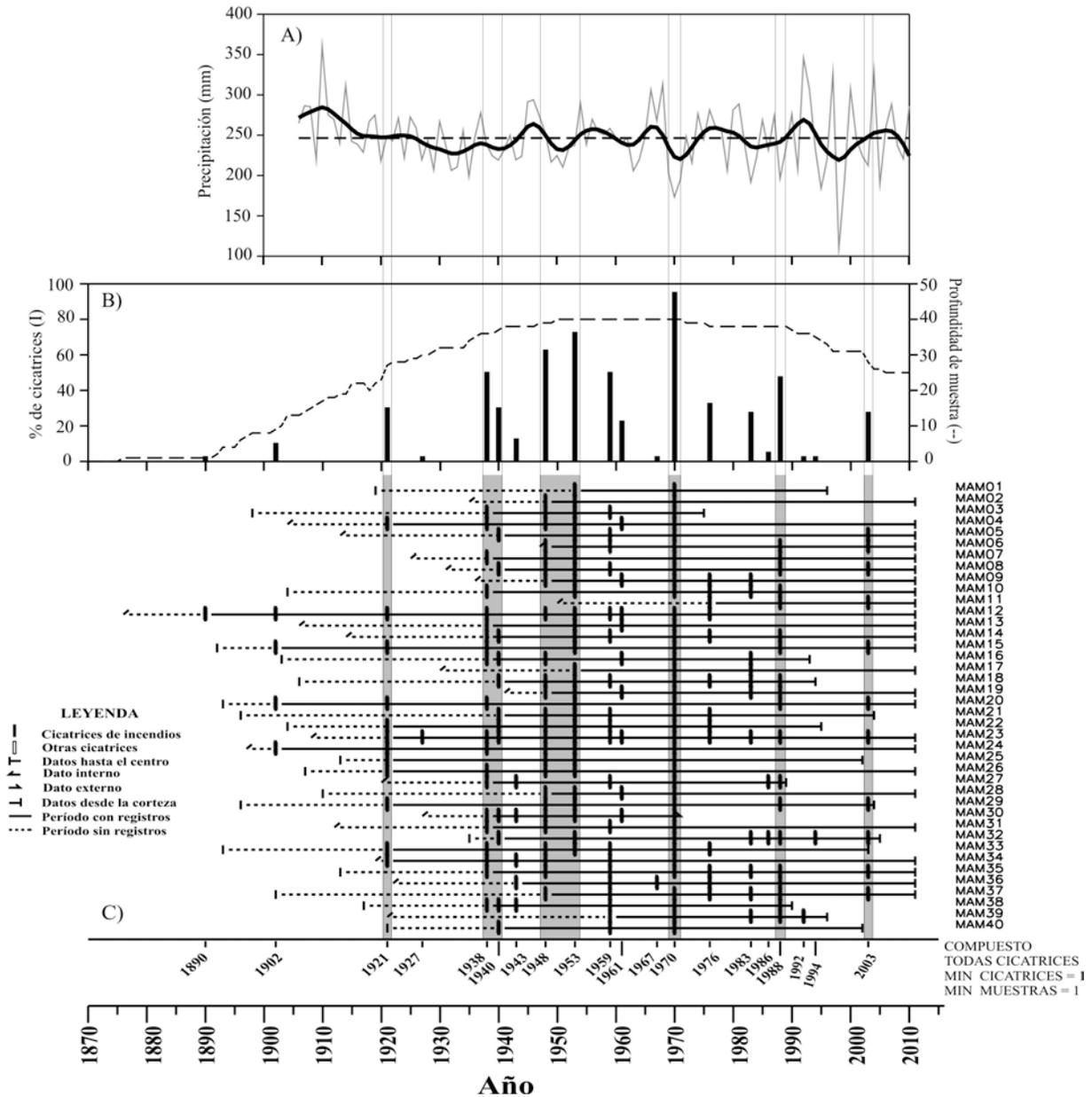


Figura 5.4. Historia del fuego en un bosque de *Pinus hartwegii* del ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla. (A) Variabilidad de la precipitación para esta región en el último siglo, con base en anillos de crecimiento de *Pinus patula* (Quezada, 2013). (B) Número de eventos de incendio reconstruidos (20), porcentaje del total de árboles muestreados que presenta cicatrices de incendio en un año específico (barras verticales), y número de muestras que comprende la serie en cada uno de sus segmentos a lo largo de todo el período (línea discontinua). (C) Las líneas horizontales representan la longevidad de cada uno de los árboles, punteadas antes del primer registro de incendio y sólidas para el período con registros (a la derecha se indica el nombre de la muestra). Las barras verticales en color negro representan los años con cicatrices de incendios; una mayor continuidad de la línea significa una mayor cantidad de árboles afectados por un mismo evento y una mayor superficie incendiada. Los años en los que se registraron incendios se muestran en el eje secundario de las X. Las barras verticales en color gris muestran períodos de baja precipitación, los cuales están asociados a los incendios más extensos.

5.5.3. Relación clima-incendios

El análisis de relación clima-incendios SEA, indica que los incendios reconstruidos en el bosque de *P. hartwegii* se registraron durante años con valores de precipitación por debajo de la media y valores negativos de NIÑO 3 y PDSI (Figura 5.5). En contraste, no se observaron incendios durante años con valores de precipitación por arriba de la media, ni valores positivos de PDSI y NIÑO 3, que representan condiciones de mayor precipitación (Figura 5.5). Las condiciones climáticas de NIÑO 3 y PDSI, 1 y 2 años previos al incendio, respectivamente, presentaron valores positivos (condiciones húmedas) de manera significativa ($P < 0.01$) (Figura 5.6B y C).

La mayoría de los incendios reconstruidos para el período 1890-2011, se registraron ante condiciones de lluvia por debajo de la media (15 de 20 incendios; 75 %) (Figura 5.6). Así mismo, más de la mitad de los incendios ocurrieron en años con valores negativos NIÑO 3 (10 de 14 incendios, 71.4 %) y PDSI (8 de 14 incendios, 57.1 %), valores que se relacionan con condiciones de sequía para el centro de México (Figura 5.6).

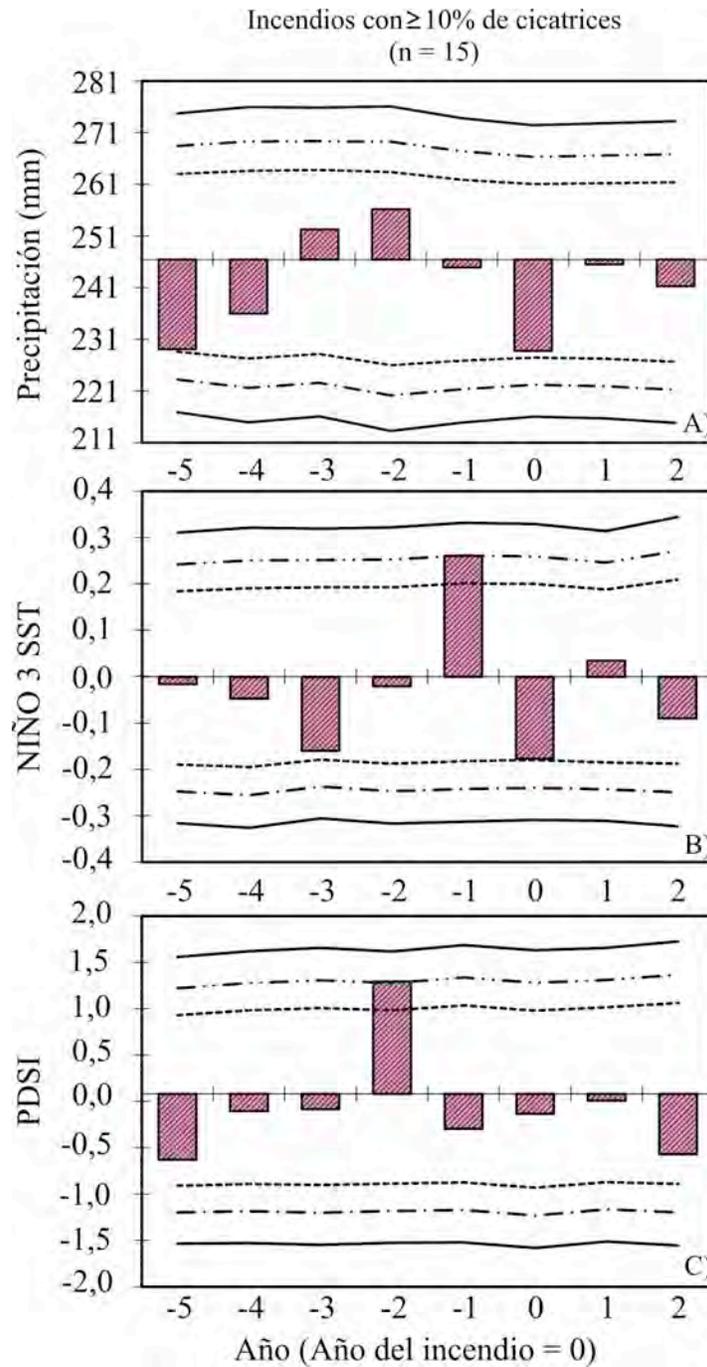


Figura 5.5. Análisis de sobreposición de época (SEA) para todos los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. Se indica la relación entre la ocurrencia del incendio y las siguientes variables: (A) Clima regional (reconstrucción dendroclimática de precipitación local primavera-invierno, según Quezada, 2013). (B) Índice invernal (diciembre-febrero) de NIÑO 3 (Cook, 2000a). (C) Índice de severidad de sequías de Palmer PDSI (Cook, 2000b). El año del incendio está indicado por el 0, los cinco años previos al incendio se muestran con valores negativos, y los dos años posteriores al incendio con valores positivos. Las tres líneas superiores e inferiores representan los intervalos de confianza al 95 %, 99 % y 99.9 %.

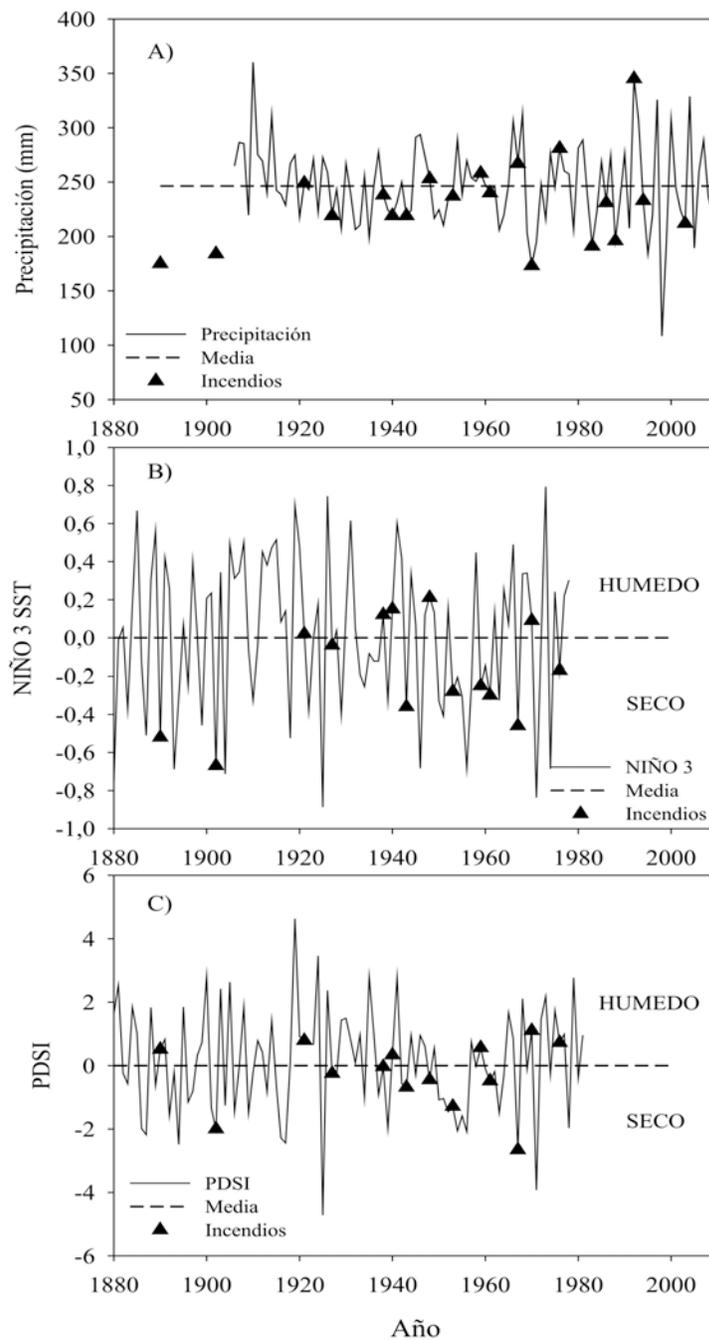


Figura 5.6. Condición anual del clima durante años de incendio (triángulos). Los tres diferentes gráficos de precipitación reconstruida (A), NIÑO 3 SST (B) y PDSI (C) representan la variabilidad climática. En (A) se observa que la mayoría de los incendios identificados para el período 1890-2011, se registraron ante condiciones de lluvia por debajo de la media. En (B y C) se observa que más de la mitad de los incendios ocurrieron ante eventos de NIÑO 3 y PDSI con valores negativos (condiciones de sequía).

5.6. Discusión

La reconstrucción de la variabilidad de la precipitación para esta región, muestra el año de 1970 como el segundo evento de sequía más intenso del siglo XX, solo superado por el año 1998 (Quezada, 2013) (Figura 5.6). Así mismo, registros climáticos observados del período 1961-2000 muestran este mismo comportamiento (IMTA, 2009). La extensión y severidad de este evento, se puede atribuir a dos aspectos: uno, al intervalo de tiempo previo libre de incendios (9 años), condición que favoreció la acumulación de combustible tanto en cantidad como en continuidad, y dos, al efecto climático.

Trenberth (1997) reporta un período de influencia del ENSO en su fase cálida El Niño de 19 meses, que se extiende de finales de 1968 a marzo de 1970, condición que representa sequía para el centro y sur de México (Magaña *et al.*, 2003). Las condiciones de sequía un año previo al incendio (1970) como ocurrió en 1969 (Figura 5.7), aunadas al período libre de incendios que favoreció la acumulación de combustible, crearon el ambiente propicio para el desarrollo del incendio más extenso de los últimos 136 años. Una situación similar se ha registrado para el norte de México, donde se han reconstruido incendios de alta intensidad, los cuales se han asociado a una elevada acumulación de combustible tras varios años libres de fuego y una posterior condición de sequía (Skinner *et al.*, 2008).

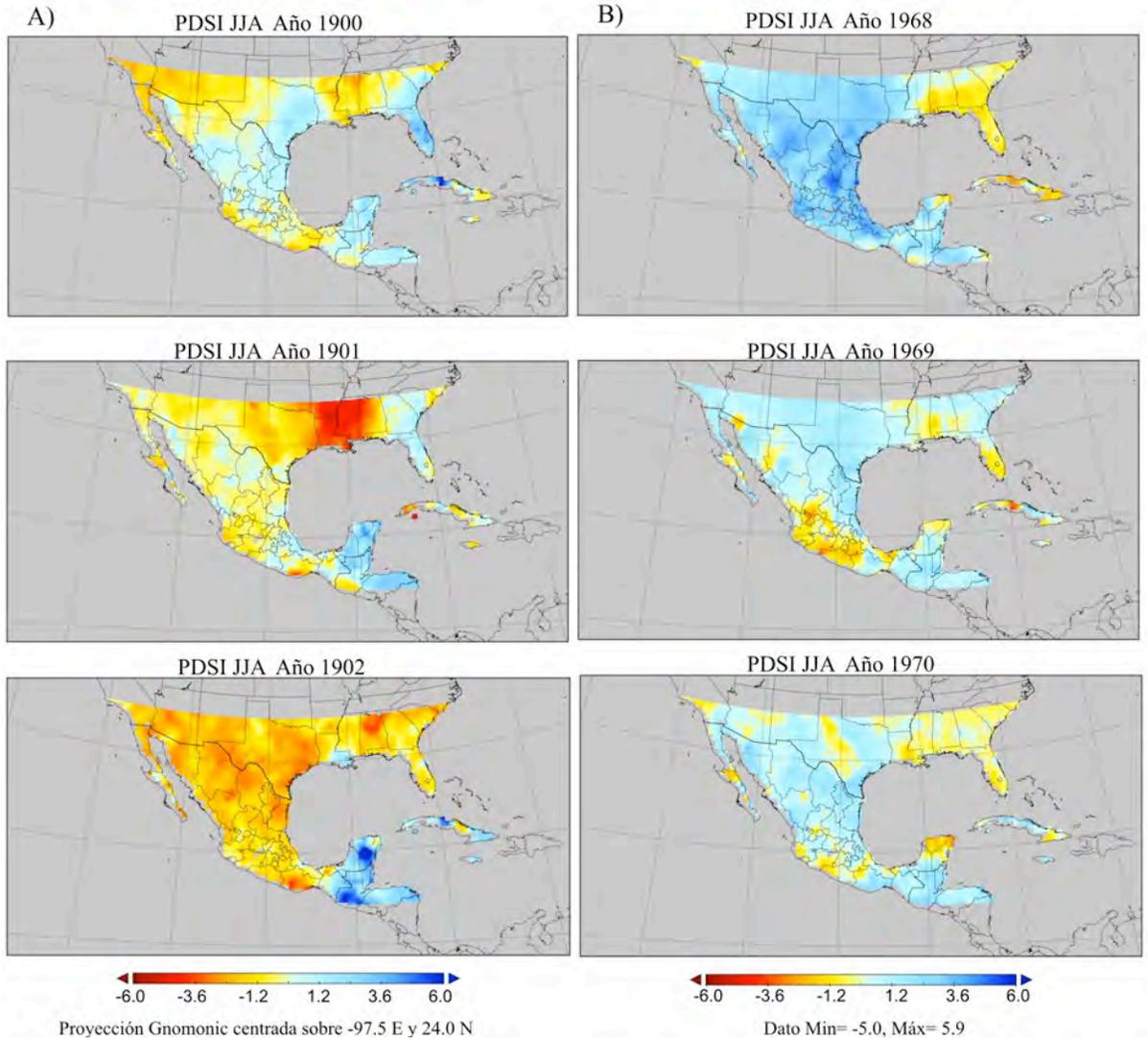


Figura 5.7. Mapas de sequía desarrollados utilizando el Atlas de Sequía para México (MXDA, Stahle *et al.*, 2016). Los mapas muestran las condiciones climáticas dominantes para dos años previos a los incendios de (A) 1902, y (B) 1970. Ambos incendios son considerados extensos y afectaron el 50 % y 95 % del arbolado del sitio, respectivamente.

5.6.1. Estacionalidad de los incendios

En el área de estudio las máximas temperaturas y la precipitación mínima se registran durante la estación de primavera (IMTA, 2009) (Figura 5.2), situación a la que se atribuye

el elevado porcentaje de incendios en primavera (91.7 %). Los incendios en los bosques de *P. hartwegii* se registran en enero y continúan hasta mayo o junio (Rodríguez, 2001), lo cual se relaciona con el período seco de primavera.

Estudios desarrollados para el norte de México (Fulé y Covington, 1999; Stephens *et al.*, 2003; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010) y para la región centro del país (Cerano *et al.*, 2015), reportan resultados similares sobre la estacionalidad de los incendios, coincidiendo un mayor número de cicatrices de incendios al inicio de la estación de crecimiento (madera temprana).

5.6.2. Frecuencia de incendios

Los regímenes reconstruidos corroboran lo reportado por Rodríguez (2001), quien indica que la frecuencia de incendios en los bosques de *P. hartwegii* no superan los 10 años, y presentan un promedio de cinco años, aproximadamente. Así mismo, se reafirman los regímenes reconstruidos con base en técnicas dendrocronológicas para los bosques de *P. hartwegii* del Pico de Orizaba en el centro de México (Yocom y Fulé, 2012).

De un total de 20 incendios reconstruidos durante los últimos 136 años, 14 (70 %) presentan alta sincronía (Figura 5.4), lo que indica la ocurrencia de eventos extensos (Fulé y Covington, 1999; Swetnam y Baisan, 2003). De finales del siglo XIX a principios del siglo XXI, los incendios han sido frecuentes; trabajos desarrollados para el centro de México, han reconstruido una incidencia continua del fuego hasta los primeros años del siglo actual (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2015). A diferencia de la zona centro del país, para la región norte se ha documentado una exclusión del fuego a partir de 1930

(Yocom *et al.*, 2010) o 1950 (Fulé *et al.*, 1999 y 2005; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Skinner *et al.*, 2008).

Aunque existe una incidencia ininterrumpida del fuego para la región de Chignahuapan, se ha detectado una disminución en su frecuencia posterior al año 1988. Durante el período de 1988 a 2003 (15 años), sólo se registraron dos incendios, en 1992 y 1994, registrados por un solo individuo, lo cual sugiere eventos muy localizados (Figura 5.4). El año 1998 representa una de las temporadas de incendios más severas para el país; sin embargo, no existe evidencia de daños en el área. Esta disminución de la frecuencia de incendios en este periodo puede estar relacionada con una marcada influencia humana en el régimen local de incendios, lo cual soportaría nuestra primera hipótesis.

El ejido presenta registros de aprovechamiento maderable regulado a partir de 1985, el cual también implica un control mayor en la ocurrencia de incendios (Morales, 2005). Posterior al año 2003 (intervalo de 8 años), no se registró evidencia de incendios. Al considerar todas las cicatrices de incendios ocurridas durante el período 1988-2003, se estimó un MFI de 4.6 años, similar a los últimos 100 años; sin embargo, los incendios de mediana (10 %) y alta (25 %) intensidad indican un MFI de 15 años, superiores al MFI histórico (9.2 años). Es importante considerar que una mayor amplitud en los intervalos de la frecuencia de incendios, propicia un incremento en la acumulación de combustibles (hojas, pastos, arbustos y ramas), tanto en cantidad como en continuidad (Skinner *et al.*, 2008), lo que puede favorecer la presencia de incendios más severos, en particular, cuando esto coincida con un año de sequía. Se recomienda desarrollar estudios que determinen las cargas de combustibles actuales que soporten la definición de áreas de mayor riesgo de incendios.

La información generada en este estudio resulta esencial para los encargados de manejo del bosque en esta región, quienes deberán reducir el peligro de incendios severos. El conocimiento de la historia del fuego fundamenta el diseño de estrategias para ejecutar acciones de manejo del fuego. El cambio en la frecuencia de incendios en las últimas décadas, obedece posiblemente a una tendencia debido a una mayor efectividad en el control de incendios, por lo tanto, se debe mantener la frecuencia de incendios dentro de la amplitud de su variación histórica, con el objetivo de obtener beneficios ecológicos, reducir el riesgo de incendios severos y garantizar la permanencia de estos bosques.

5.6.3. Relación clima-incendios

El fenómeno ENSO es un mecanismo de forzamiento climático que afecta a la precipitación y ocurrencia de incendios forestales en muchas partes del mundo (Swetnam y Betancourt, 1990; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2008). En el sur de Estados Unidos y norte de México los eventos de ENSO cálidos (El Niño) se asocian con condiciones invernales húmedas y menor cantidad de incendios; a su vez, eventos de ENSO fríos (La Niña) tienden a favorecer inviernos secos y mayor ocurrencia de incendios (Swetnam y Betancourt, 1990; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005). Un estudio reciente en la Sierra Madre Oriental, reporta un cambio temporal en la influencia de ENSO sobre los incendios; antes de 1830 La Niña fue asociada significativamente con años de incendio y posterior a 1830 esta asociación no fue significativa (Yocom *et al.*, 2010).

Para el sur de México, los efectos de este fenómeno muestran también un comportamiento dipolar aunque opuesto a lo observado en el norte, es decir, eventos El Niño propician inviernos secos que favorecen el desarrollo de incendios, mientras que eventos La Niña, se asocian a condiciones de mayor humedad (Magaña *et al.*, 2003; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011).

Para el área de estudio, se reconstruyó un total de 20 incendios (Figura 5.4), de los cuales 18 se registraron durante el siglo XX, 16 (89 %) bajo la presencia de ENSO en su fase cálida (El Niño) y dos en condiciones de ENSO en su fase fría (La Niña) (Trenberth, 1997; Gergis y Fowler, 2009). Estos resultados corroboran la asociación entre ENSO y eventos de incendios para esta región, ya que eventos El Niño estuvieron asociados significativamente ($P < 0.05$) con años de incendios. Lo anterior representa condiciones de sequía para el centro de México (Magaña *et al.*, 2003; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011) y sustenta la segunda hipótesis de investigación, que establece que condiciones de sequía han influido en la frecuencia histórica del fuego en esta región del centro del país. A diferencia del presente estudio, en los bosques de alta montaña de *P. hartwegii* en el Pico de Orizaba, Veracruz, Yocom y Fulé (2012) no encontraron una asociación significativa entre El Niño y eventos de incendios, lo cual es atribuible a la influencia antropogénica en el régimen de incendios. Sin embargo, es importante destacar que eventos extremos de ENSO, tanto en su fase cálida El Niño (Figura 5.7A) como fría La Niña (Figura 5.7B), impactaron ambas regiones, como ocurrió en los años de 1902 y 1968, respectivamente.

Los eventos La Niña de 1921 y 1943 (Gergis y Fowler, 2009), que en teoría deberían haber impactado el norte de México, ocasionaron incendios importantes en este ecosistema de *P.*

hartwegii del centro del país (Figura 5.4). Por el contrario, los años El Niño de 1983 y 1998 (Trenberth, 1997), que propiciaron condiciones secas para el sur del país, impactaron incluso la parte norte de México, donde se han reconstruido incendios de alta intensidad durante estos dos años (Yocom *et al.*, 2010).

Las condiciones significativas ($P < 0.01$) de humedad para NIÑO 3 y PDSI uno y dos años previos a la ocurrencia del incendio, respectivamente, se asocian a una elevada producción de biomasa de plantas herbáceas y pastos, lo que aunado a una disminución posterior de la lluvia, origina condiciones propicias para el desarrollo de fuertes incendios (Figura 5.7). Swetnam y Baisan (2003) indican que la propagación del fuego se ve favorecida cuando un año seco sigue a un año húmedo, probablemente por la alta producción de combustible fino. Las condiciones significativas de humedad para el centro del país uno (Figura 5.5B) y dos años antes del incendio (Figuras 5.7, 5.5A y 5.5C) han influido de manera significativa en la propagación del fuego.

Resultados similares sobre condiciones significativas ($P < 0.05$) de humedad antes de incendios intensos, se han reportado para diferentes bosques de coníferas en el norte de México (Stephens *et al.*, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010; Yocom *et al.*, 2010) y suroeste de los Estados Unidos (Swetnam y Baisan, 2003).

5.7. Conclusiones

La reconstrucción de la historia de incendios para los últimos 136 años (1876-2011) en el bosque de *P. hartwegii*, muestra que de finales del siglo XIX a la primera década del siglo XXI ha permanecido una frecuencia ininterrumpida del fuego. Sin embargo, posterior a 1988 se detecta un cambio en la frecuencia de incendios, intervalos de 15 y 11 años en las últimas décadas, tendencia que obedece posiblemente a una mayor efectividad en el control de incendios a partir de 1985. Se acepta la primera hipótesis, que plantea que los regímenes del fuego han cambiado en las últimas décadas, cambio asociado a la influencia humana. El cambio de la frecuencia de incendios es una tendencia que aún se puede corregir con buenas prácticas de manejo del fuego; por ello, se recomienda mantener la frecuencia de incendios dentro de la amplitud de su variación histórica.

Se presenta una relación importante entre condiciones de sequía modulada por ENSO y la presencia de incendios. Eventos El Niño que representan condiciones de sequía para el centro de México, están asociados significativamente con años de incendios. Estos resultados sustentan la segunda hipótesis de investigación, que establece que condiciones de sequía han influido en la frecuencia histórica del fuego en esta región del centro del país.

Capítulo 6. Efectos del clima en los regímenes históricos de incendios (1451-2013) en el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. del Parque Nacional Cofre de Perote

6.1. Introducción

Las zonas de alta montaña donde se desarrolla *Pinus hartwegii* Lindl. son muy importantes ya que albergan diversas especies endémicas, y ocupan solamente el 1% del territorio nacional. En un escenario de calentamiento global, dichas especies son las más susceptibles de ser afectadas por estar adaptadas a condiciones frías (Hernández *et al.*, 2005). En las últimas décadas el incremento de la actividad de incendios se ha atribuido al cambio climático global (Westerling *et al.*, 2006). La fuerte vinculación entre el fuego y el clima ponen en manifiesto la relevancia de conocer la relación clima-incendios en este tipo de ecosistemas (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005).

Los incendios forestales son una de las perturbaciones más comunes en la tierra y su presencia es vital en muchos ecosistemas. En algunas áreas, el exceso del fuego ha contribuido a la degradación y deforestación, en otras, incendios frecuentes de baja intensidad facilitan la regeneración y mantienen una estructura abierta del bosque (Rodríguez y Fulé, 2003). El entendimiento del papel ecológico de los incendios en los bosques es esencial para los programas de manejo y de conservación.

Aunque el fuego se ha reconocido como una parte importante de la ecología de los bosques tropicales de alta elevación, en términos de investigación ha recibido poca atención (Smith y Young, 1987; Rodríguez, 2001). La historia del fuego en los bosques de *P. hartwegii* del centro de México es relativamente desconocida; no se cuenta con una red de reconstrucciones de regímenes de incendios fundamentadas en técnicas dendrocronológicas, que permita conocer la frecuencia histórica del fuego en estas regiones (Rodríguez, 2001).

Los estudios desarrollados en México sobre historia del fuego con base en técnicas dendrocronológicas, se han concentrado en el norte del país. A la fecha, se ha determinado que en algunas zonas los incendios regulares y frecuentes continúan hasta el presente (Cerano *et al.*, 2010; Fulé *et al.*, 2011), mientras que en otras se registra un cese abrupto de incendios atribuido al aumento del cambio de uso del suelo, a la construcción de caminos o brechas forestales y al aprovechamiento de madera, a menudo asociados con la formación de ejidos (Fulé y Covington, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Yocom *et al.*, 2010).

Los estudios de historia del fuego en los bosques tropicales de alta elevación y en los bosques tropicales en general, son escasos (Martin y Fahey, 2006). Sin embargo, en los últimos años se generaron dos estudios en bosques de *P. hartwegii* para el centro de México, uno en el Pico de Orizaba, Veracruz (Yocom y Fulé, 2012) y otro más en la sierra norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016), que representan los únicos trabajos sobre reconstrucción de regímenes de fuego fundamentados en técnicas dendrocronológicas, y que han permitido conocer la historia del fuego y su relación con el clima.

Es bien sabido que El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es capaz de modificar los patrones normales del clima alrededor del mundo. El Niño, y su contraparte La Niña, modifican también los patrones de precipitación en México. En general, durante inviernos El Niño (La Niña), la precipitación aumenta (disminuye) en el noroeste de México, mientras que disminuye (aumenta) en el centro y sur del país (Magaña *et al.*, 2003). La influencia de ENSO (La Niña) en la frecuencia de incendios ha sido documentada ampliamente en el norte de México (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Yocom *et al.*, 2010; Cerano *et al.*, 2010; Cerano *et al.* En prensa). Para el centro del país, en algunas regiones se ha observado una relación positiva, pero no significativa de El Niño y La Niña en la frecuencia de incendios (Yocom y Fulé, 2012), en otras, se ha determinado una influencia significativa de El Niño en la frecuencia de incendios (Cerano *et al.*, 2016).

Así mismo, recientemente se ha documentado la influencia significativa de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) en la variabilidad de la lluvia y temperatura estacional para el norte y centro de México. Se ha determinado que las fases del PDO pueden afectar la intensidad con que se registra El Niño o La Niña; los efectos de La Niña se magnifican y las sequías se intensifican cuando este fenómeno se sincroniza con la fase negativa (fría) de PDO (McCabe y Dettinger, 1999). Sin embargo, a la fecha no hay ningún trabajo que analice la influencia de este fenómeno en la frecuencia de incendios en el centro de México.

El Parque Nacional Cofre de Perote constituye un lugar de gran importancia ecológica, económica y social para la región central de Veracruz. Fue decretado como una medida para conservar sus bosques, los cuales determinan el equilibrio entre los diversos factores naturales que intervienen en la climatología e hidrología de la región. En el Cofre de Perote nacen cuatro cuencas hidrográficas que dan origen a un gran número ríos y arroyos que abastecen de agua potable a las ciudades de Xalapa, Coatepec, Perote, Xico, entre otras, y al mismo tiempo, permiten la irrigación de campos de cultivo en las partes medias y bajas de las cuencas. En el Parque Nacional se originan los escurrimientos superficiales que permiten el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y marítimos de toda la región, entre los que destacan el bosque mesófilo de montaña, la selva baja y media y el sistema arrecifal en las costas (DOF, 1937). Dada la importancia de los bosques del Cofre de Perote, es vital asegurar las funciones benéficas que desempeñan. Uno de los principales riesgos ante el calentamiento climático son los incendios forestales. Sin embargo, se desconoce la historia del fuego y la influencia que el clima ha ejercido en su comportamiento histórico.

Con base en los resultados de los estudios de Yocom y Fulé (2012) en el Pico de Orizaba y de Cerano *et al.* (2016) en la sierra norte de Puebla, donde se determinó que los bosques de *P. hartwegii* no han presentado una interrupción en la frecuencia de incendios durante el siglo XX y presentan una relación variable entre la ocurrencia de incendios y el clima, nosotros planteamos dos hipótesis. La primera se relaciona con la ecología del bosque: 1) los regímenes de incendios en las últimas décadas se han mantenido sin un cambio importante en su frecuencia. La segunda se centra en la relación clima-incendios: 2) la frecuencia

histórica de los incendios en el Parque Nacional Cofre de Perote está relacionada de manera importante con la variabilidad climática.

Referirnos a la variabilidad del clima es analizar la relación sequía-incendio, corroborar la influencia de ENSO (El Niño y La Niña) en la ocurrencia de incendios y explorar si el PDO ha influido en la frecuencia histórica de incendios, principalmente cuando ambos fenómenos circulatorios coinciden en su fase negativa, situación que magnifica las sequías, como se ha indicado previamente.

6.2. Área de estudio

El Parque Nacional Cofre de Perote se encuentra localizado en las coordenadas geográficas 19°25'33" a 19°33'52" de latitud norte y 97°06'55" a 97°12'52" de longitud oeste. Está delimitado por la cota de los 3000 msnm hasta su máxima elevación que alcanza los 4250 msnm, ubicándola como la séptima montaña más alta de México. En la época prehispánica esta montaña recibió el nombre de "*Nauhcampatépetl*" que significa "cerro de los cuatro costados". Forma parte del sistema volcánico Citlaltépetl-Cofre de Perote, en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 6.1).

Este sistema lo componen estratovolcanes, conos de escoria y domos alineados de NE-SW, lo que divide el Altiplano mexicano (cuenca Serdán-Oriental) y la planicie costera del Golfo de México. Estos grandes edificios volcánicos fueron desestabilizados durante el Pleistoceno, generando múltiples colapsos de edificios. Las causas aparentes han sido sismos de alta

intensidad, fracturamiento, alteración hidrotermal, lluvias torrenciales y en menor porcentaje actividad magmática (Carrasco *et al.*, 2006).

Esta área constituye un lugar de gran importancia ecológica, económica y social para la región central de Veracruz. Por tal razón fue decretado como “Parque Nacional” una medida para conservar los bosques que la cubren, ya que esta vegetación es la que determina el equilibrio entre los diversos factores naturales que intervienen en la climatología e hidrología de la región” (DOF, 1937).

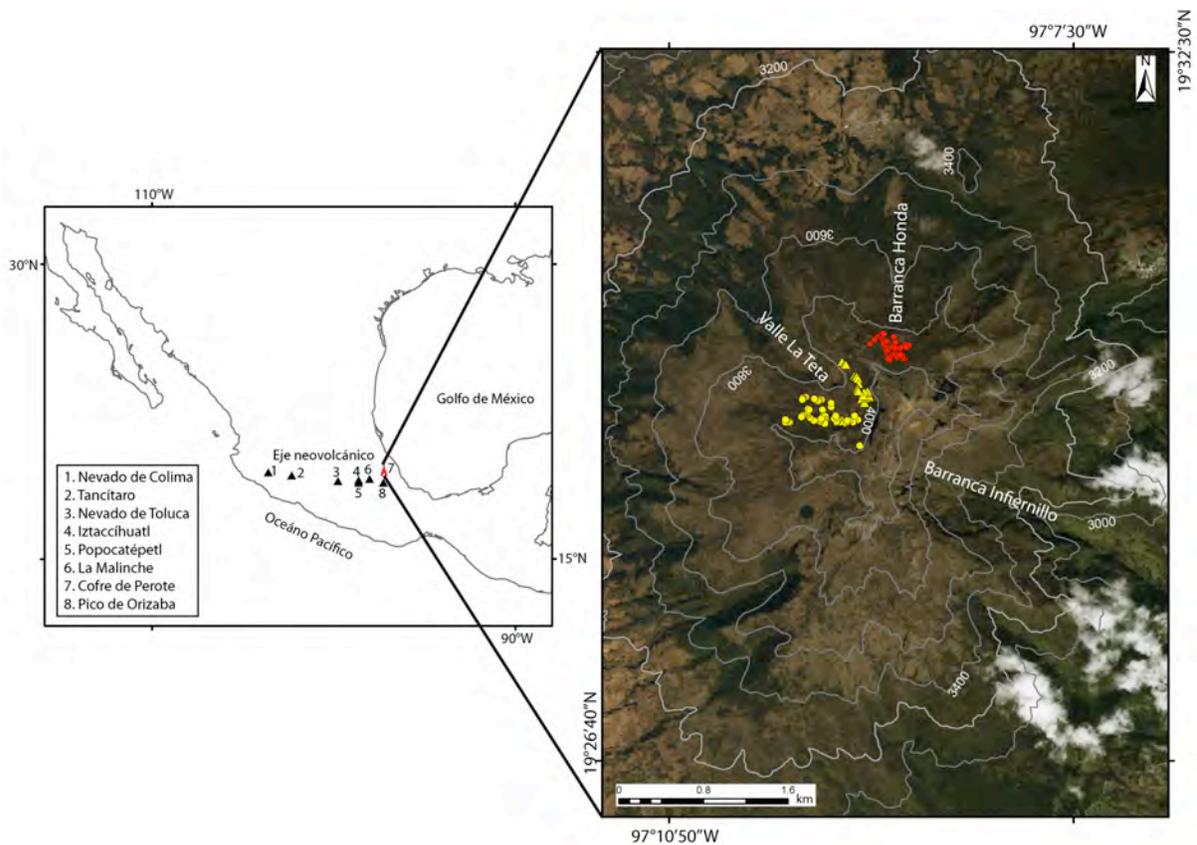


Figura 6.1. Localización geográfica del Parque Nacional Cofre de Perote en el Cinturón Volcánico Transmexicano y distribución de las áreas de estudio, que se encuentran ubicadas a lo largo de la cima, en diferentes exposiciones y condiciones de humedad en la cara oeste del Cofre de Perote. Los puntos en color rojo corresponden a Barranca Honda y en amarillo a Valle la Teta, para este último, con triángulos, se indica la condición húmeda y con círculos, la condición seca.

El incremento en la elevación de la montaña de 1200 a 4250 msnm en una distancia de 40 km, aproximadamente, constituye un factor que propicia distintos tipos de climas. La montaña es una barrera para los vientos cálidos y húmedos provenientes del Golfo de México, que al encontrarse con ella, ascienden rápidamente, se enfrían y se precipitan en forma de neblina o lluvia en la ladera oriental, mientras que en la ladera occidental hacia el valle de Perote, se crea un efecto de sombra orográfica, con precipitación escasa, por lo que el paisaje es muy distinto (Ramirez, 1983; Narave, 1985). En general, el clima dentro del Parque Nacional Cofre de Perote se clasifica en dos tipos dominantes de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1981): el Cb'(m) (f), el cual abarca un área de 5338 ha, que va desde la parte central del parque hasta el noreste y sureste, presenta un rango de precipitación total de 1500 a 1800 mm; y el Cb'(w2), que ocupa un área de 6113 ha, que se extiende desde la parte central del parque hasta el noroeste y suroeste; su rango de precipitación total es de 1000 a 1200 mm.

En el Parque Nacional se presentan 165 especies de flora. Los tipos de vegetación que son: páramo de altura (*Juniperus monticola*), pinares (*Pinus hartwegii*) y bosque de oyamel (*Abies religiosa*). Referente a la fauna, se encuentran 178 especies de las cuales 67 están citadas en la NOM 059 con alguna categoría de riesgo. Existen 62 familias, distribuidas en las 178 especies, 32 son endémicas y 55 se encuentran protegidas. El grupo menos numeroso es el de los anfibios con 14 especies, de las cuales 8 son endémicas, como la rana arbórea *Plectrohyla arborescandens* y la salamandra *Pseudoeurycea leprosa* (Morales y Aguilar, 2000; Morales *et al.*, 2007).

6.3. Muestreo de árboles

La exposición noroeste del Parque Nacional Cofre de Perote, se dividió en dos áreas de estudio, Valle la Teta (VT, 3839-3960 msnm) y Barranca Honda (BH, 3842-3938 msnm). Así mismo, por sus diferentes condiciones de exposición y humedad, el área de VT se dividió en tres sitios: 1) la condición más húmeda (VTH, 3841-3949 msnm), definida por presentar una pared de rocas que hace un efecto de sombra y permite conservar mayor humedad, registra corrientes de agua que propician el desarrollo de yerbas, pequeños helechos y pastos y 2) la condición más seca, presenta una exposición con vegetación abierta, mayor incidencia del sol durante el día, no presenta corrientes de agua y crecen en su mayoría pastos, esta área, a su vez, se subdividió en dos partes, Valle la Teta seca baja (VTSB, 3839-3925 msnm) y Valle la Teta seca alta (VTSA, 3930-3960 msnm). Se trabajó en una superficie aproximada de 30, 30, 35 y 50 ha, para BTH, VTSB, VTSA y BH, respectivamente (Tabla 6.1).

Para cada una de las diferentes áreas, se seleccionaron árboles con cicatrices de incendios (Figura 6.2) y se tomaron muestras únicamente de *P. hartwegii*. Se colectó un total de 162 muestras de incendios empleando motosierra, 103 y 59 secciones parciales para VT y BH, respectivamente. El total de las muestras en VT se dividió en VTH = 31, VTSB = 33 y VTSA = 39. Las muestras fueron tomadas de árboles vivos ($n = 80$ para VT y $n = 46$ para BH; 78% para ambos sitios) y de árboles muertos ($n = 23$ y $n = 13$, respectivamente, 22% para ambos sitios). Se consideraron los individuos con el mayor número de registros de incendios (Figura 6.2b, d y h), bien preservados y lo más longevos posible (Arno y Sneek, 1977).



Figura 6.2. Esquema que muestra un bosque de *P. hartwegii* con árboles vivos (a) y un acercamiento a la base del árbol vivo que presenta registro de incendios (cicatrices) (b). El proceso para la extracción de una muestra con cicatrices de incendios de un árbol vivo, consiste en: selección de la cara con los mejores registros y cortes transversales de la muestra (c y d), corte de los bordes para despegar la muestra del centro del árbol (e y f), extracción de la muestra (g), conteo de cicatrices y etiquetado (h) y envoltura de la muestra para evitar daños durante su traslado al laboratorio (i) (Fotos Julián Cerano).

6.4. Variables climáticas

Para analizar la influencia que ejerce el clima en la frecuencia de incendios, se empleó el Análisis de Sobreposición de Época (SEA). Como proxy del clima, se emplearon cuatro variables:

- 1) Una cronología desarrollada para esta tesis con base en el ancho de anillo de *P. hartwegii* (Anexo 1). La cronología cubre el período de 1436 - 2013 (578 años) y explica el 56% de la variabilidad de la precipitación invernal de esta zona ($r = 0.75$; $P < 0.001$) (Cerano *et al.*, sin publicar).

- 2) El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) Enero-Junio, punto tomado de la parte alta del Cofre de Perote (1901-2002; IRI Analyses SPI SPI-TS2p1_6-month 97.25 W-19.25 N; Guttman, 1999).
- 3) Índices reconstruidos de El Niño Oscilación de Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (NIÑO 3 SST, Diciembre-Febrero, 1408-1978; Cook, 2000a).
- 4) Índice reconstruido de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) (1661-1991; Biondi *et al.*, 2001).

Cada una de estas cuatro variables climáticas, se analizó por separado con la reconstrucción de la historia del fuego empleando la rutina SEA. Para conocer de manera gráfica la condición climática en que se desarrolló históricamente cada uno de los incendios reconstruidos (identificados en ≥ 10 % de las muestras), se emplearon los índices de la cronología, NIÑO 3 y PDO. En este análisis gráfico no se utilizó el índice de SPI, se empleó el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) Junio-Agosto (1400-2012), índice generado para la parte alta del Cofre de Perote con base en el Atlas de Sequía para México (MXDA, por sus siglas en inglés; Stahle *et al.*, 2016).

Así mismo, se utilizó el MXDA (Stahle *et al.*, 2016) para analizar con base en mapas de sequía, las condiciones climáticas de años en que se reconstruyeron incendios severos que afectaron un área extensa. Finalmente, con datos observados de la estación meteorológica Las Vigas, estación con los registros más extensos (1923-2011; IMTA, 2009) y empleando un análisis SEA, se analizó la relación entre variables climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación estacional invierno y primavera) y la ocurrencia de incendios.

6.5. Resultados

6.5.1. Régimen de incendios

Se colectó un total de 162 muestras con cicatrices de incendios de *P. hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, 103 corresponden a VT (VTH = 31, VTSB = 33 y VTSA = 39) y 59 al sitio BH (Tabla 6.1). Las muestras fueron tomadas de árboles vivos ($n = 80$ para VT y $n = 46$ para BH; 78% para ambos sitios) y de árboles muertos ($n = 23$ y $n = 13$, respectivamente, 22% para ambos sitios).

Se logró fechar de manera exitosa 100% (103) de las muestras para VT y 51 muestras (86%) del sitio BH. Se identificó un total de 1240 cicatrices de incendios, 869 para VT (VTH = 235, VTSB = 301 y VTSA = 333) y 371 para BH (Tabla 6.1). No se logró fechar un total de 8 muestras (14%), debido a que presentaron alto grado de pudrición y crecimientos demasiado suprimidos (anillos perdidos), lo que no permitió un fechado confiable.

Tabla 6.1. Características e información sobre las cicatrices de incendios de cuatro sitios en los bosques de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz.

Sitio	Clave	Elevación (m)	Pendiente promedio (%)	Exposición promedio	Muestras fechadas	No. de incendios	Primer cicatriz (año)	Intervalo de análisis (año)
Húmedo	VTH	3841-3949	49	S	31	235	1461	1607-2013
Seco Bajo	VTSB	3839-3925	32	SE	33	301	1521	1544-2012
Seco Alto	VTSA	3930-3960	27	N	39	333	1607	1689-2012
Barranca Honda	BH	3842-3938	45	NE	51	371	1536	1607-2013
Total					154	1240		

La primera cicatriz de incendio identificada para cada una de las dos áreas de estudio (VT y BH), ocurrió en 1461 y 1536, respectivamente; la cicatriz más reciente, se fechó en el año 2010. Hasta los primeros años de la década de 1970, el régimen de incendios en el Parque Nacional Cofre de Perote mostró alta frecuencia entre sitios y a través del tiempo (Figura 6.3). Los incendios fueron frecuentes en el Cofre de Perote en los últimos 550 años (Figura 6.3, Tabla 6.2). Al considerar todas las cicatrices de incendios, todos los intervalos medios de frecuencia (MFI) y todos los intervalos de probabilidad de ocurrencia de incendios (WMPI) fueron <10 años, con un promedio aproximado de 5 años.

Para los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras, todos los valores de MFI y WMPI para VT fueron <10 años, con un promedio de 6 años; sin embargo, el sitio BH registró valores de MFI y WMPI >10 años, 13 y 11 años, respectivamente. Para los incendios más extensos representados por los eventos registrados en $\geq 25\%$ de las muestras, todos los valores de MFI y WMPI fueron <25 años (21.5 y 19 años para VT y 22.8 y 21.3 años para BH, respectivamente). El intervalo promedio de incendios por muestra fue <25 años para VT y <32 años para BH. Los intervalos mínimos libres de incendios oscilaron entre 1 y 5 años, tanto para VT como para BH (Tabla 6.2).

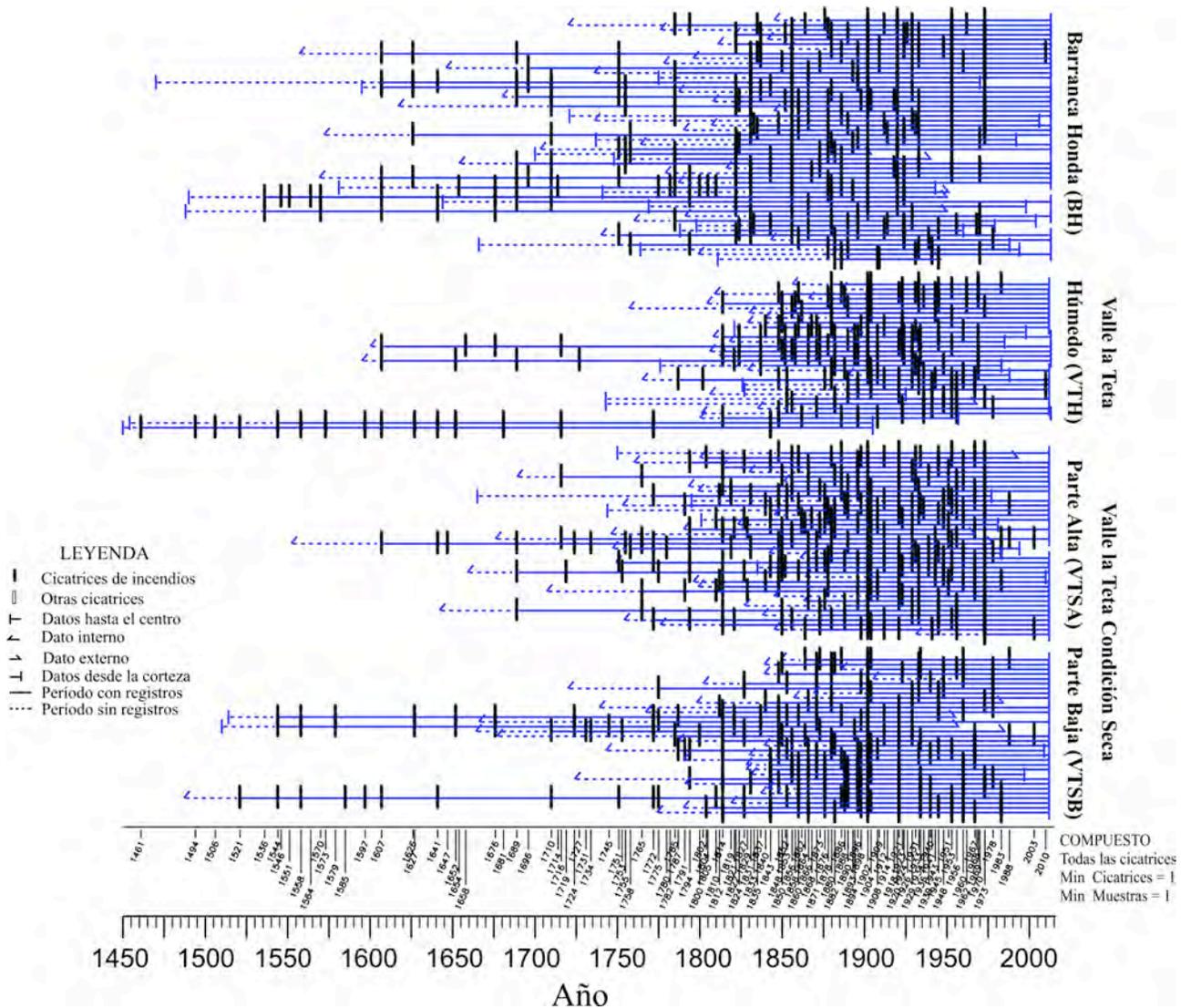


Figura 6.3. Historia de incendios en un bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. Las líneas horizontales representan la longitud de cada uno de los árboles, la parte punteada es para indicar antes del primer registro de incendio y la parte continúa indica el período con registros. Las barras verticales en color negro representan las cicatrices de incendios, a medida que las barras forman una línea continua, indican un incendio más extenso que afectó mayor cantidad de árboles y superficie. Se observa una variabilidad común para todos los sitios VTB (Valle la Teta condición seca parte Baja), VTA (Valle la Teta condición seca parte Alta), VTH (Valle la Teta parte Húmmeda) y BH (Barranca Honda). Los años en los cuales los incendios fueron registrados se muestran en el eje secundario de las “X”.

Tres de los cuatro sitios (BH, VTH y BT SB), presentan un registro continuo que inicia en los primeros años de 1500 y mayor número de muestras a partir de 1600. El sitio VTSA presenta registros continuos que inician en los primeros años de 1600 y mayor número de muestras a partir de 1700 (Figura 6.3). El incendio más reciente se dató en el año 2010 y fue registrado en una sola muestra en los sitios BH y VTSH, mientras que para los sitios VT SB y VTSA, el incendio más reciente ocurrió en el año 2003; existe un intervalo libre de incendios de 6 y 13 años, respectivamente. Sin embargo, al considerar registros de incendios como mínimo en dos muestras, los intervalos libres de incendios en años recientes cambian de manera abrupta, 43 años para BH y VTSH, y 28 años para VT SB y VTSA. Si partimos del filtro que considera los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras, actualmente el intervalo común libre de incendios extensos en el Parque Nacional Cofre de Perote es de 43 años (Figura 6.3).

6.5.2. Cambio en la frecuencia de incendios

Los incendios han sido frecuentes desde inicios de la década de 1460 y hasta los primeros años de la década de 1970 (Figura 6.3). Posterior a 1973, se determinó un cambio abrupto en la frecuencia de incendios. Para el sitio BH y la condición húmeda del Valle la Teta (VTH) se presentó prácticamente una exclusión del fuego desde los primeros años de la década de 1970, es decir 43 años libre de incendios extensos. Los sitios de condición seca en Valle la Teta (VT SB y VTSA) han continuado quemándose hasta los primeros años del siglo XXI, pero con una frecuencia menor a la histórica, se reconstruyeron cuatro incendios (1978, 1983, 1988 y 2003) durante los últimos 43 años. Se determinó un intervalo reciente libre de incendios de 13 años. Sin embargo, al considerar incendios de mayor sincronía ($\geq 10\%$), el intervalo común libre de incendios extensos para toda el área es de 43 años.

Tabla 6.2. Características de los intervalos de incendios en cuatro sitios en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México.

Estadísticas	Sitios				
	VTSB (1544-2012)	VTSA (1689-2012)	VTH (1607-2013)	BH (1607-2013)	VT-Compuesto (B, A, H) (1607-2013)
Numero de intervalos					
Todas las cicatrices *	72	72	66	69	97
≥10% de las cicatrices **	58	49	49	29	59
≥25% de las cicatrices ***	33	13	19	16	17
Intervalo medio de incendios, MFI (años)					
Todas las cicatrices	6.38	4.36	6.11	5.84	4.15
≥10% de las cicatrices	7.57	5.80	7.39	12.62	6.29
≥25% de las cicatrices	13.15	21.85	19.05	22.87	21.53
Intervalo de la mediana de Weibull, WMPI (años)					
Todas las cicatrices	5.22	3.64	4.39	4.47	3.51
≥10% de las cicatrices	6.42	4.97	5.66	11.0	5.50
≥25% de las cicatrices	12.05	18.75	17.14	21.36	18.74
Intervalo mínimo (años)					
Todas las cicatrices	1	1	1	1	1
≥10% de las cicatrices	1	2	1	2	1
≥25% de las cicatrices	2	2	2	4	5
Intervalo máximo (años)					
Todas las cicatrices	34	27	45	37	21
≥10% de las cicatrices	34	27	45	41	21
≥25% de las cicatrices	34	49	45	46	52
Intervalo medio de incendios (MFI) promedio por muestra (años)					
	20.5	21.3	22.9	30.9	21.6

Nota: VTSB (Valle la Teta condición seca parte Baja), VTSA (Valle la Teta condición seca parte Alta), VTH (Valle la Teta parte Húmeda) y BH (Barranca Honda). El compuesto contempla los tres sitios de Valle la Teta B (Bajo), A (Alto) y H (Húmedo).

* Eventos de incendio considerando todas las muestras

** Eventos de incendio presentes en ≥10 % de las muestras

*** Eventos de incendio presentes en ≥25 % de las muestras

6.5.3. Sincronía entre incendios

Aunque los sitios de estudio en el Parque Nacional Cofre de Perote presentan diferentes condiciones de humedad, exposición, barreras naturales (paredes de rocas) y artificiales (caminos), los incendios indicaron alta sincronía entre sitios (de 1521-1973 para VT y de 1607-1973 entre VT y BH) para muchos años (Figuras 6.4 y 6.5).

Para el sitio VT, al considerar los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras, se identificaron 60 incendios, 23 (38%) se registraron en los tres sitios (VTSB, VTSA y VTH). Para los sitios de la condición seca (VTSB y VTSA) sincronizaron 33 incendios (55%). Porcentaje similar de incendios (55%, 33 incendios) presentaron sincronía entre la parte seca (VTSB y VTSA) y la exposición más húmeda (VTH) (Figura 6.4).

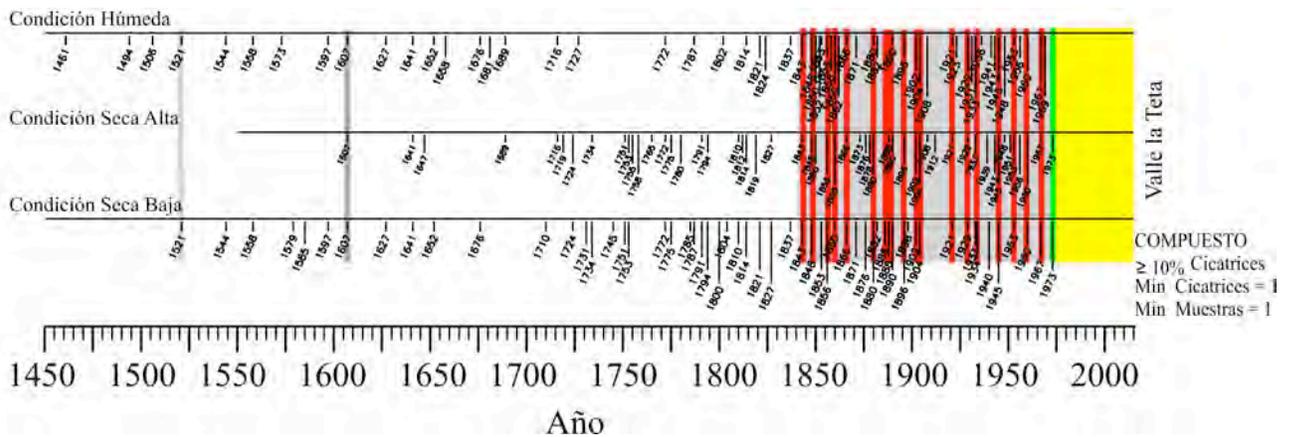


Figura 6.4. Resumen de los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras en los tres diferentes sitios del Valle la Teta. La línea en color gris claro, indica el primer incendio con sincronía entre dos sitios, la línea en color gris oscuro, señala la fecha a partir de la cual se observó sincronía de incendios entre las tres áreas. Las líneas de color rojo y el fondo gris muestran el período con mayor sincronía de incendios para el sitio Valle la Teta. En color verde se indica la última fecha para la cual se observó sincronía entre incendios en diferentes áreas. En color amarillo se muestra el período reciente, sin presencia de incendios, atribuido a la exclusión del fuego.

Así mismo, el sitio BH registró 35 incendios en total al considerar los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. Al comparar los sitios VT y BH, se identificó una sincronía del 51%, 18 de los 35 incendios tuvieron incidencia en ambas áreas, considerados incendios extensos (Figura 6.5).

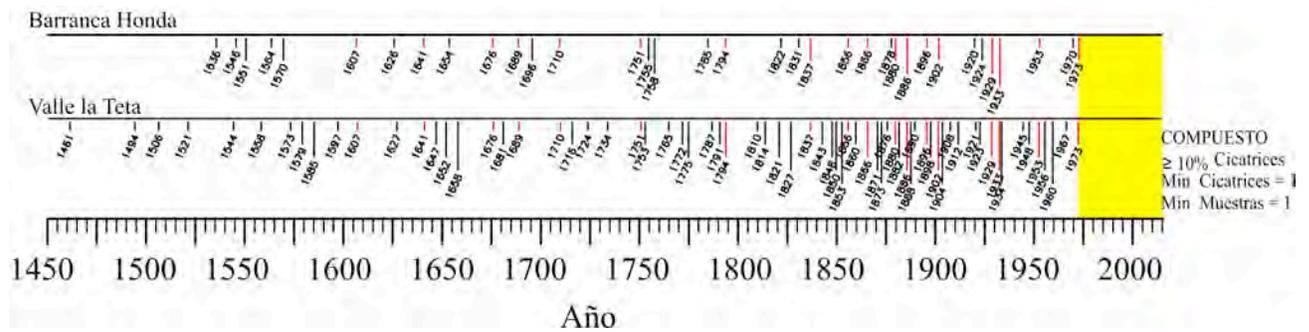


Figura 6.5. Resumen de los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras en las dos grandes áreas de estudio del Parque Nacional Cofre de Perote. Las líneas en color rojo, indican la sincronía de incendios entre las dos áreas. El sitio Barranca Honda registró 35 incendios en total en el periodo 1607-1973, al comparar este sitio con Valle la Teta, se identificó una sincronía del 51%, es decir, 18 de los 35 incendios tuvieron incidencia en ambas áreas, incendios extensos. En color amarillo se muestra el período reciente, sin presencia de incendios, atribuido a la exclusión del fuego.

6.5.4. Estacionalidad de los incendios

La estación de ocurrencia de los incendios se determinó para el 70.56% de las cicatrices y en 29.44% de las cicatrices no fue posible determinar su estacionalidad (Tabla 6.3). El 95% de los incendios para los cuales se determinó su estacionalidad, ocurrieron al inicio de la madera temprana; mientras que para el 5% de las cicatrices, se localizó en la mitad de la madera temprana. No se identificó ninguna cicatriz al final de la madera temprana, madera tardía y dormancia. El 95% de los incendios se registró en la estación de primavera y 5% en la estación de verano (Tabla 6.3).

Tabla 6.3. Identificación de la posición de las cicatrices de incendios en los anillos anuales de crecimiento y determinación de estación del año en que se registraron.

Sitio/periodo de análisis	Estación determinada	Estación no determinada						Incendios Primavera ^A	Incendios Verano ^B
			D	EE	ME	LE	L		
VTSB 1480-2012									
Número	225	76	0	214	11	0	0	214	11.0
Porcentaje	74.8	25.2	0	95.1	4.9	0	0	95.1	4.9
VTSA 1550-2012									
Número	231	102	0	217	14	0	0	217	14
Porcentaje	69.4	30.6	0	93.9	6.1	0	0	93.9	6.1
VTH 1450-2013									
Número	165	70	0	157	8	0	0	157	8
Porcentaje	70.2	29.8	0	95.2	4.8	0	0	95.2	4.8
BH 1470-2013									
Número	254	117	0	244	10	0	0	244	10
Porcentaje	68.5	31.5	0	96.1	3.9	0	0	96.1	3.9

Nota: La definición de la estacionalidad de los incendios para esta región del centro de México, fue con base en la metodología de Grissino-Mayer (2001). ^A Dormancia + inicio de madera temprana (D+EE). ^B Mitad de la madera temprana + final de la madera temprana + madera tardía (ME+LE+L).

6.5.5. Efectos del clima en la ocurrencia de incendios

La condición climática para los años de incendios en los últimos 400 años fue significativamente seca ($P < 0.05$) para el clima regional, fundamentado en los índices de la cronología, SPI, NIÑO 3 y PDO, como lo muestra el análisis SEA (Figura 6.6). Así mismo, no se observó una relación significativa ($P > 0.05$) entre años inmediatamente anteriores a los incendios y condiciones húmedas (Figura 6.6). Valores de clima (cronología) y SPI se registraron por debajo de la media (secos) de manera significativa ($P < 0.05$ y $P < 0.01$; respectivamente) durante años de incendios. Los eventos de ENSO estuvieron asociados significativamente con la ocurrencia de incendios extensos en el Parque Nacional Cofre de Perote (Figura 6.6).

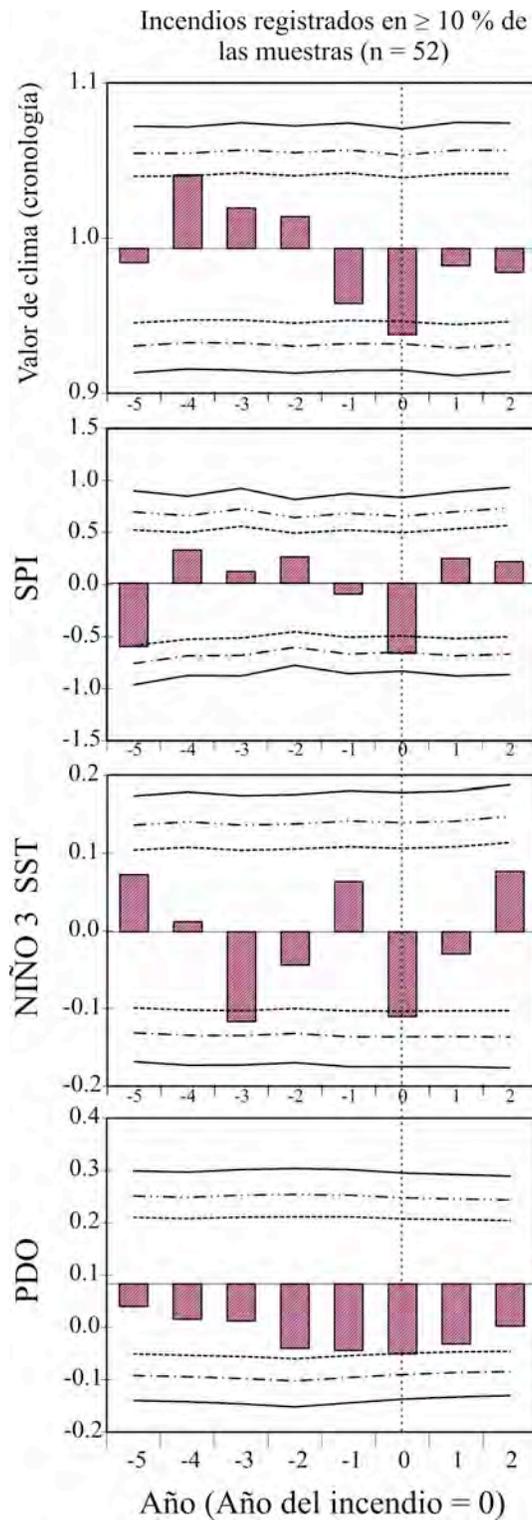


Figura 6.6. Análisis de sobreposición de época que muestra la relación entre el clima local (índice de ancho de anillo de árboles, Anexo 1), SPI, NIÑO 3 y PDO con la ocurrencia de incendios (52 fechas de fuego, 1607-2013). Se utilizó el procedimiento bootstrapping para evaluar la significación estadística de las condiciones climáticas por arriba de la media ("años húmedos") y por debajo de la media ("años secos"). Las tres líneas por arriba y debajo del eje de las "X" representan intervalos de confianza al 95%, 99% y 99.9%, respectivamente.

El análisis SEA indica que los incendios para el período 1607-2013 probablemente ocurrieron en años El Niño con condiciones de lluvia no significativa ($P > 0.05$) (años cuando los valores del NIÑO 3 estuvieron cercanos a la media) y años La Niña en que la lluvia promedio anual estuvo por debajo de la media, de manera significativa ($P < 0.05$) (años cuando los valores del NIÑO 3 estuvieron por debajo de la media; Figura 6.6 y 6.7). Esta relación fue significativa ($P < 0.05$) para los incendios registrados en el $\geq 10\%$ de las muestras.

Así mismo, los incendios se asociaron históricamente con años cuyos valores de PDO estuvieron significativamente por debajo de la media, relación significativa ($P < 0.05$) para los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras (Figura 6.6). La mayoría de los incendios ocurrieron ante condiciones climáticas regionales por debajo de la media y valores negativos de PDSI, NIÑO 3 y PDO, lo cual indica condición de sequía (Figura 6.7).

Durante años de incendios, la temperatura mínima se registró por arriba de la media durante el invierno y primavera, mientras que la temperatura máxima estuvo cercana a la media durante el invierno y por arriba de la media durante la primavera, no obstante, ningún análisis fue significativo ($P > 0.05$; Figura 6.14). Las lluvias se registraron por debajo de la media durante años de incendios tanto en invierno ($P < 0.05$) como en primavera ($P > 0.05$; Figura 6.14).

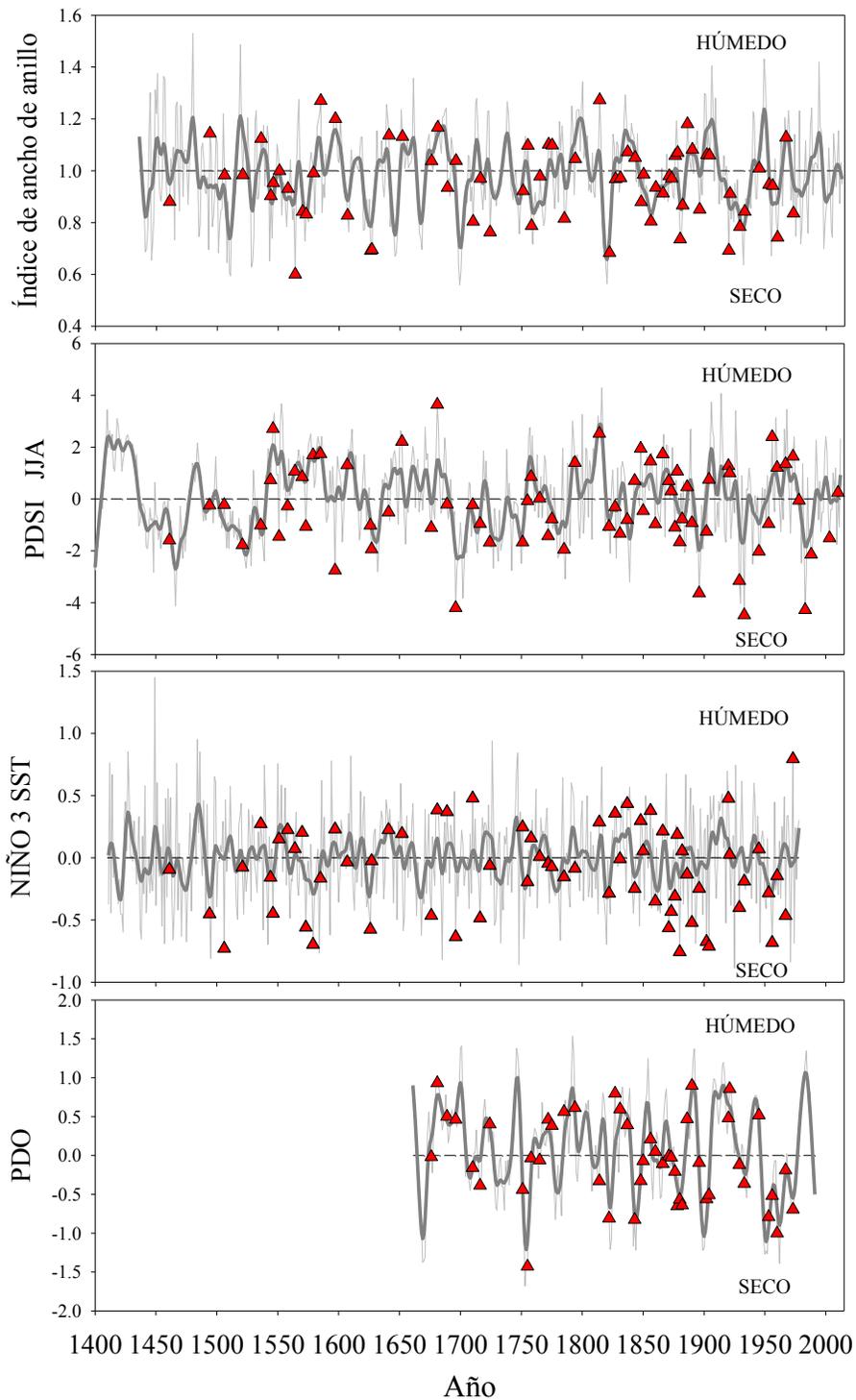


Figura 6.7. Índices climáticos anuales que muestran la condición ambiental durante los años de incendios (triángulos). Las líneas de fondo de color más claro son índices anuales reconstruidos y las líneas flexibles de color más oscuro son líneas de la variabilidad del clima suavizadas con un spline cubico que retiene el 50% de la varianza en periodos de 10 años.

6.6. Discusión

6.6.1. Régimen de incendios

Los incendios superficiales en los últimos 550 años fueron frecuentes en el Parque Nacional Cofre de Perote, tanto en VT como en BH. Los valores de MFI y WMPI en Cofre de Perote fueron similares a los regímenes de incendios reportados para otros bosques de *P. hartwegii* en montañas del centro de México (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2016) y otras regiones como la Sierra Madre Oriental (Yocom *et al.*, 2010). Sin embargo, los valores de MFI y WMPI para los incendios más extensos ($\geq 25\%$ de las muestras), comparados con los encontrados para el Pico de Orizaba (8.2 y 7.6 años, respectivamente) y la Sierra Norte de Puebla (9.2 y 8.5 años, respectivamente), presentan valores dos veces más amplios, 22.2 y 20.0 años, respectivamente. Los estadísticos de MFI y WMPI ($\geq 25\%$ de las muestras) reconstruidos para la Sierra Madre Oriental son más amplios (14.5 y 13.6 años, respectivamente) a los reportados para el centro del país; sin embargo, los intervalos reconstruidos para los incendios más extensos en el Cofre de Perote fueron aún mayores y se consideran los más extensos reportados para bosque de *P. hartwegii* (Tabla 6.2).

Rodríguez (2001) reporta que la ocurrencia de incendios en los bosques de *P. hartwegii* presentan una frecuencia promedio aproximada de cinco años y que no superan los 10 años. La reconstrucción de los regímenes históricos de incendios para los bosques de *P. hartwegii* del Cofre de Perote de los últimos 550 años, reafirma lo indicado por Rodríguez (2001), se observa un intervalo de frecuencia aproximado de 5 años y para ninguno de los cuatro sitios, al considerar todos los incendios, se superó el intervalo de 10 años (Tabla 6.2).

Los incendios parecen haberse propagado fácilmente en los cuatro sitios de estudio en la mayoría de los años, como lo demuestra el hecho de que hubo poca diferencia (generalmente <2 año) de los valores de IMF al comparar entre sitios de forma individual. Los incendios presentan sincronía entre las dos grandes áreas (VT y BH), 51% de las fechas de incendio de BH, se registraron en los sitios de VT (Figura 6.5). Esto se puede interpretar como que la mitad de los incendios de BH fueron fuegos que afectaron todas las exposiciones estudiadas de Cofre de Perote, es decir incendios extensos. Así mismo, se observa una sincronía entre incendios en diferentes montañas de *P. hartwegii* en el centro de México; de esta manera, para la sierra norte de Puebla, de 20 incendios reconstruidos durante el período de 1876-2011 (Cerano *et al.*, 2016), 12 (60%) coinciden con eventos de fuego reconstruidos en Cofre de Perote. Para el caso del Pico de Orizaba, se encontró sincronía con el Cofre de Perote de cuatro incendios ocurridos en el siglo XX (1902, 1907, 1943 y 1960) (Yocom y Fulé, 2012), tres de los cuales coinciden con incendios extensos, sincronía atribuible a la variabilidad climática común a nivel regional.

6.6.2. Cambio en el régimen del fuego

Los estudios sobre reconstrucción de los regímenes de incendios en bosques de alta montaña de *P. hartwegii* en el Pico de Orizaba (Yocom y Fulé, 2012) y Sierra Norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016) en el centro de México, reportan una frecuencia continua de incendios durante el siglo XX. Basados en estos resultados, se planteó la primera hipótesis de investigación que establece, que los regímenes de incendios en las últimas décadas se han mantenido sin un cambio importante en su frecuencia. Los resultados obtenidos no sustentan esta hipótesis, ya que la frecuencia histórica de incendios en el Parque Nacional

Cofre de Perote indica una sincronía entre sitios, pero un cambio drástico en su frecuencia a partir de los primeros años de la década de 1970 (después de 1973; Figura 6.8).

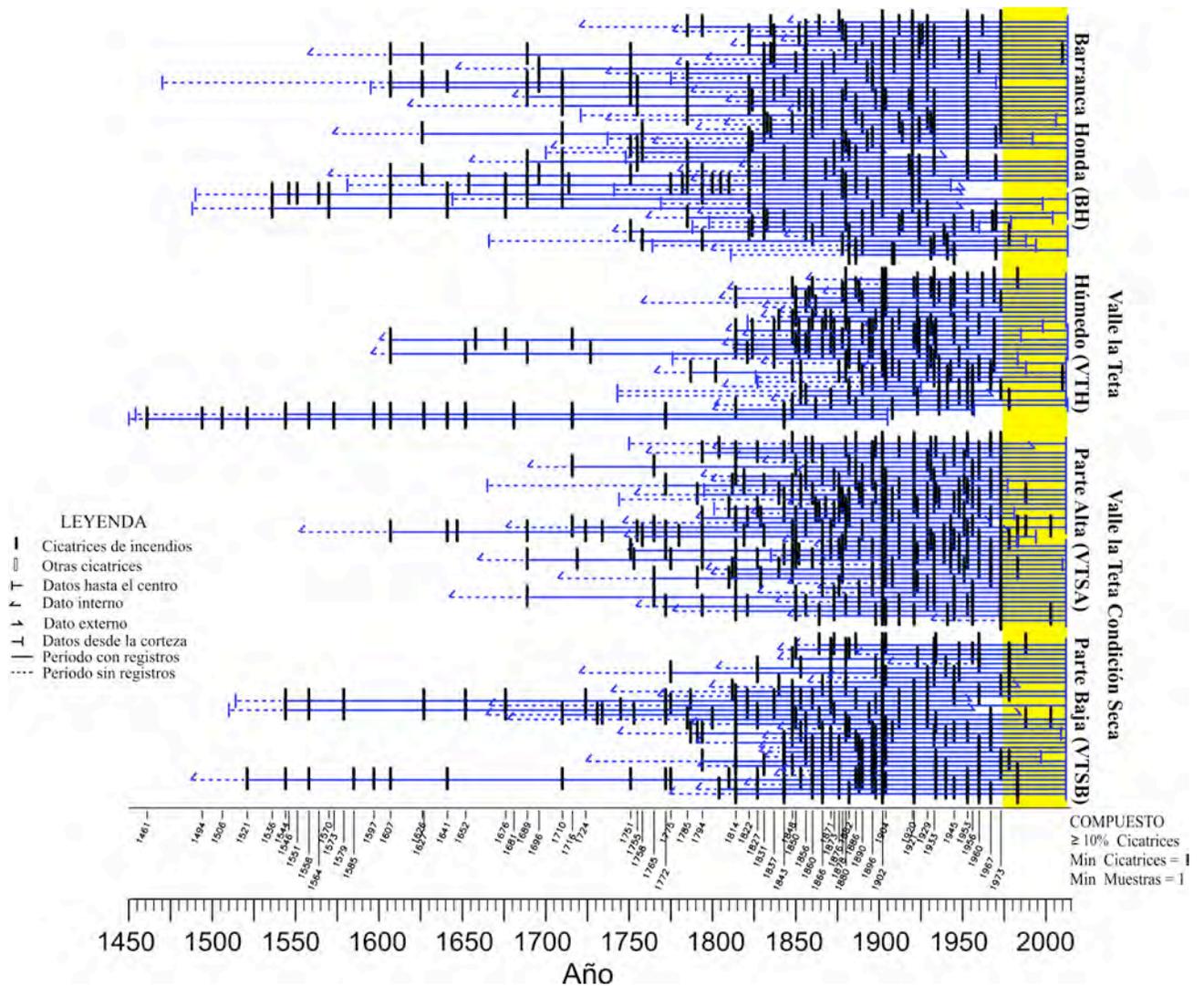


Figura 6.8. Historia de incendios en un bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. En el eje secundario de las X se observan las fechas de los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. La barra en color amarillo indica el período (1973-2015) para el cual se reconstruyó con un cambio en la frecuencia de incendios.

Los cuatro sitios en Cofre de Perote mostraron un cambio en la frecuencia de incendios después de 1973, presentando un cese del fuego casi en su totalidad dos de ellos (BH y

VTH; Figura 6.8). Incluso, para el caso de BH, se observa un cambio en la frecuencia de incendios después de 1933, presenta intervalos de frecuencia más amplios con incendios extensos recurrentes a intervalos de 20 años (1933, 1953 y 1973). Posterior a 1973, para los sitios BH y VTH solo se registraron dos (1978 y 2010) y tres (1978, 1983 y 2010) incendios, respectivamente. Para ambos sitios, los incendios se registraron en una sola muestra, lo que indica que fueron incendios muy localizados o con un área de afectación muy pequeña. Estos resultados contrastan con lo reportado para los bosques de *P. hartwegii* en otras zonas del centro de México, donde se indica una frecuencia de incendios ininterrumpida durante el siglo XX (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2016). Para el caso de los bosques de *P. hartwegii* en la Sierra Madre Oriental, se determinó un cambio en la frecuencia de incendios posterior a 1920 (Yocom *et al.*, 2010).

De acuerdo a datos históricos, desde el período de 1870 y hasta finales del siglo XIX los hacendados explotaron poco los bosques de altura en el Cofre de Perote (Gerez, 1985). A partir de 1894 se inicia con la explotación mecanizada de la agricultura y de la madera. El paisaje cambió, había manchas de deforestación alrededor de los aserraderos. Sin embargo, la tala aún era moderada (Zavala, 1977).

Para 1938, había sido tan importante la tala del bosque, que el gobierno declara Parque Ecológico a toda la zona alta del Cofre de Perote (la zona de mayor elevación, arriba de los 3000 m), incluyendo tierras de los ejidos recién dotados. Estas medidas no tuvieron el efecto esperado y el desmonte continuó. En 1952, la Secretaría de Agricultura y Fomento decreta la veda forestal indefinida en todo el país. En el Cofre de Perote, los vigilantes son

sobornados por los grandes empresarios de la madera quienes lejos de abandonar la explotación la amplían (Hoffman, 1989).

Ni la creación del Parque Nacional en 1938, ni la veda en 1952 detuvieron la deforestación. Frente a este fracaso, en la década de 1970 se inician acciones forestales oficiales, una política de regularización de la explotación maderera, aumento de la producción con rendimiento sostenido, integración de los dueños de los bosques en la conservación del bosque, para lo cual, recibieron asistencia técnica y apoyo gubernamental (Jardel, 1986). Estas acciones oficiales para lograr un mejor manejo y protección del bosque, aunado al impulso de programas formales de prevención y combate de incendios entre 1964 y los 1970s en el valle de México (Rodríguez, comunicación personal), pudieron haber contribuido a una menor incidencia de incendios, y por lo tanto, esto se refleja en el cambio en la frecuencia de incendios observada posterior a 1973 en el Parque Nacional Cofre de Perote, un cambio en el régimen del fuego atribuible a la influencia antropogénica.

Los regímenes de incendios en los diferentes ecosistemas de pino presentan una amplia gama de fechas de exclusión. La frecuencia de incendios en los bosques de pino ha sido interrumpida por una exclusión prolongada para el suroeste de Estados Unidos desde inicios del siglo XIX (Swetnam y Baisan, 2003). Para el noroeste de México a mediados del siglo XX (Heyerdahl y Alvarado, 2003). Para el estado de Chihuahua se ha reportado un MFI promedio <4 años y un cambio en la frecuencia de incendios alrededor de 1950 (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005). Así mismo, se ha reconstruido un cambio en la frecuencia posterior a 1970 y una frecuencia ininterrumpida durante el siglo XX en otro sitio (Cerano *et al.*, 2010).

Para el estado de Durango, siete sitios estudiados por Heyerdahl y Alvarado (2003) y nueve sitios estudiados por Fulé y Covington (1997, 1999) mostraron valores similares de MFI (3-6 años), pero diferentes fechas de exclusión del fuego. La exclusión de incendios se dio a partir de 1930 para cuatro sitios, en 1940 para tres sitios, en 1950 para dos sitios, en 1970 para dos sitios y una frecuencia continua del fuego durante el siglo XX para cinco sitios. Se cree que la principal razón para la exclusión de incendios en el norte de México, es el cambio de uso de la tierra, especialmente el aumento de la ganadería extensiva, asociado con la redistribución de tierras después de la Revolución Mexicana (Fulé y Covington, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003). En los Estados Unidos, la exclusión de incendios comenzó en 1820 en Arizona y es asociada al pastoreo intensivo (Savage y Swetnam, 1990).

6.6.3. Estación de ocurrencia de incendios

La mayoría de los años de incendios se detectaron al inicio de la madera temprana (Tabla 6.3), el fuego se registró a principio de año, cuando los árboles han comenzado su crecimiento. Lo cual corrobora, que los incendios reconstruidos ocurrieron en su mayoría (95%) durante la estación de primavera, antes del inicio de las lluvias de verano que humedecen el combustible, inhiben el encendido y la propagación del fuego.

Esto es consistente con la estacionalidad determinada en los bosques de *P. hartwegii* en la sierra norte de Puebla, donde se reporta que cerca del 92% de los incendios se registran al inicio de la estación de crecimiento (Cerano *et al.*, 2016). Para el caso del Pico de Orizaba, Yocom y Fulé (2012) reportan que el 95% de las cicatrices se observaron en el período de

dormancia, antes de iniciar el crecimiento del árbol y solo cerca del 3% se registró al inicio del crecimiento. Sin embargo, la categorización en dormancia o al inicio del crecimiento, coinciden con un período seco de invierno-primavera, antes del inicio de las lluvias de verano (Figura 6.9), y ambas categorizaciones corresponden a incendios de primavera (Grissino-Mayer, 2001).

Las diferencias en la posición de las cicatrices, podrían atribuirse a diferencias en la fenología de *P. hartwegii* en los dos sitios, posiblemente el crecimiento se inicie más temprano en el Cofre de Perote y más retardado en el Pico de Orizaba, en lugar de una diferencia en la estación de ocurrencia de incendios, similar a lo observado en los bosques de *P. douglasiana* de la Sierra de Manantlán en Jalisco (Cerano *et al.*, 2015).

Por el contrario, un bajo porcentaje de cicatrices de incendios (5%) se registró en la mitad de la madera temprana, que de acuerdo a la categorización de Grissino-Mayer (2001) sobre la posición de las cicatrices en el anillo anual de crecimiento, corresponde a la estación de verano (Swetnam *et al.*, 2001). Resultados similares se han reportado en el Pico de Orizaba con un 1.5% (Yocom y Fulé, 2012) y en la Sierra Norte de Puebla con un 8% (Cerano *et al.*, 2016). Lo anterior, se atribuye a que para este período han iniciado las lluvias de verano (junio), los combustibles han adquirido mayor humedad, existe menor susceptibilidad a la ignición y se disminuye el riesgo de incendios (Figura 6.9).

Históricamente, los incendios superficiales en el Cofre de Perote han ocurrido durante la etapa de inicio de crecimiento, similar a lo reportado por Swetnam *et al.* (2001) en la zona fronteriza entre México y los Estados Unidos. Los incendios fueron registrados durante el

período cálido de primavera (marzo e inicios de junio). La estacionalidad de primavera que inferimos con base a la posición de las cicatrices de fuego, coincide con el período de precipitación más baja, la temperatura más alta y la menor tasa fotosintética (valor de NDVI) o mayor estrés de la vegetación para esta región (Figura 6.9).

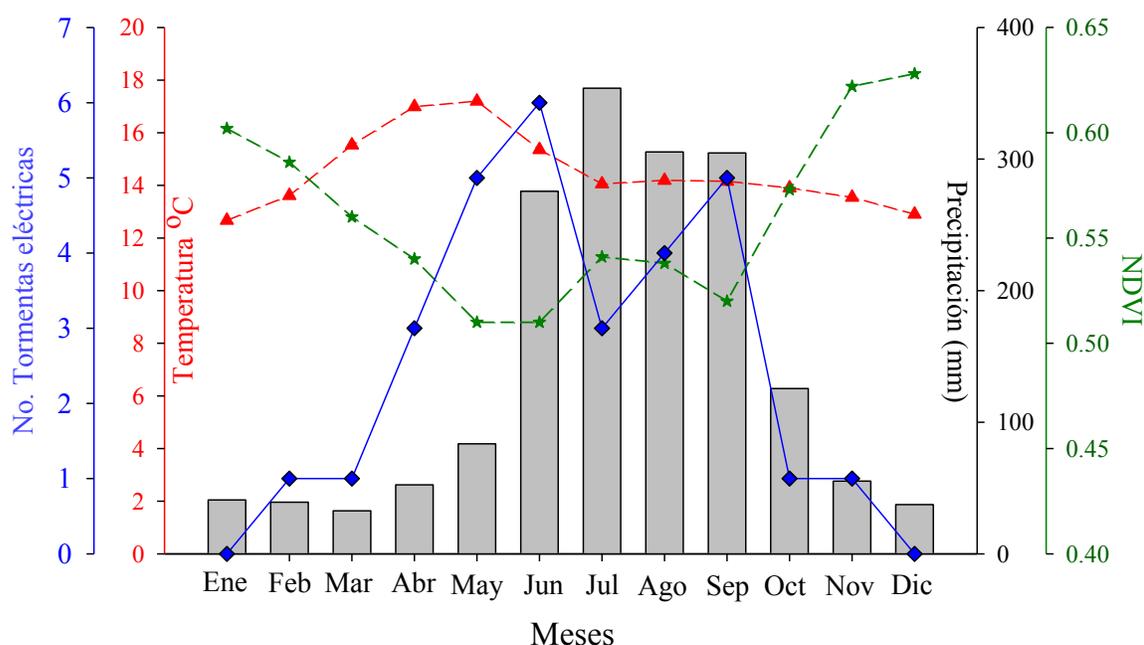


Figura 6.9. Distribución mensual de la variabilidad de la lluvia (barras) y temperatura (rojo) en el Cofre de Perote, ejes internos. La distribución en el año de las tormentas eléctricas se indica en color azul y en color verde los valores de NDVI que indican la tasa fotosintética de la vegetación o el nivel de estrés, ejes externos. Los datos de precipitación, temperatura y tormentas eléctricas corresponden a datos observados promedio (1951-2010) de las estaciones Tembladeras (3110 msnm) y Los Pescados (3000 msnm) (SMN, 2017). Los valores de NDVI corresponden a datos promedio del período 1981-2006 para la vegetación del Cofre de Perote (Tucker *et al.*, 2005).

Así mismo, históricamente este período seco del año sincroniza con el comienzo e incremento en la incidencia de rayos o descargas eléctricas (SMN, 2017; Figura 6.9), fenómeno que posiblemente ha dado inicio a los incendios de origen natural en esta zona. Los incendios en los bosques de *P. hartwegii* se registran desde inicio de año y continúa

hasta mayo o junio (Rodríguez, 2001), lo cual se relaciona con el período seco de primavera. Para el norte de México y suroeste de los Estados Unidos se han observado resultados similares sobre la incidencia de rayos en el período seco de primavera y su posible relación con el comienzo de incendios (Swetnam *et al.*, 2001).

6.6.4. Relación clima-incendios

Los años de incendios fueron significativamente secos ($P < 0.05$; Figura 6.6), la variabilidad climática interanual ha modulado la ocurrencia histórica de incendios de manera significativa ($P < 0.05$) en el Parque Nacional Cofre de Perote. Así mismo, se observó una correspondencia con la fase seca de ENSO y PDO (Figura 6.6). La asociación del año actual que se encontró entre el fuego superficial y ENSO es generalmente consistente con lo encontrado entre el fuego y la variabilidad del clima regional, lo que se atribuye a que estas dos variables del clima están fuertemente asociadas en el área de estudio.

No se observó una relación significativa ($P > 0.05$) entre años inmediatamente anteriores a los incendios y condiciones humedad. Contrario a lo observado en la Sierra Madre Occidental, donde la condición húmeda del clima del año anterior sincroniza significativamente con la ocurrencia de incendios superficiales, situación que probablemente favorezca la producción de biomasa herbácea y el aumento en la cantidad de combustible fino disponible para los fuegos superficiales en años secos posteriores (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010). Resultados similares a los encontrados en los sitios de estudio, se han reportado para los bosques de *P. ponderosa* en los Estados Unidos (Brown, 2006), lo que sugiere que la acumulación de combustibles

de pastos y hierbas durante años húmedos previos no fue necesaria para la ocurrencia de incendios. Esto quizás se deba a la alta cantidad de pastos en el área, que aún en años con registros de escasa humedad rebrotan.

Los incendios más extensos en el Cofre de Perote en los últimos 550 años han ocurrido tanto en años con dominancia de la fase El Niño como La Niña (Figura 6.10 y 6.11). Se determinó una relación significativa ($P < 0.05$) entre la fase fría (La Niña, años con disminución de lluvia significativa por debajo de la media) como la fase cálida (El Niño, años con lluvia promedio no significativa) de ENSO, que fue corroborado por el análisis SEA (Figura 6.10).

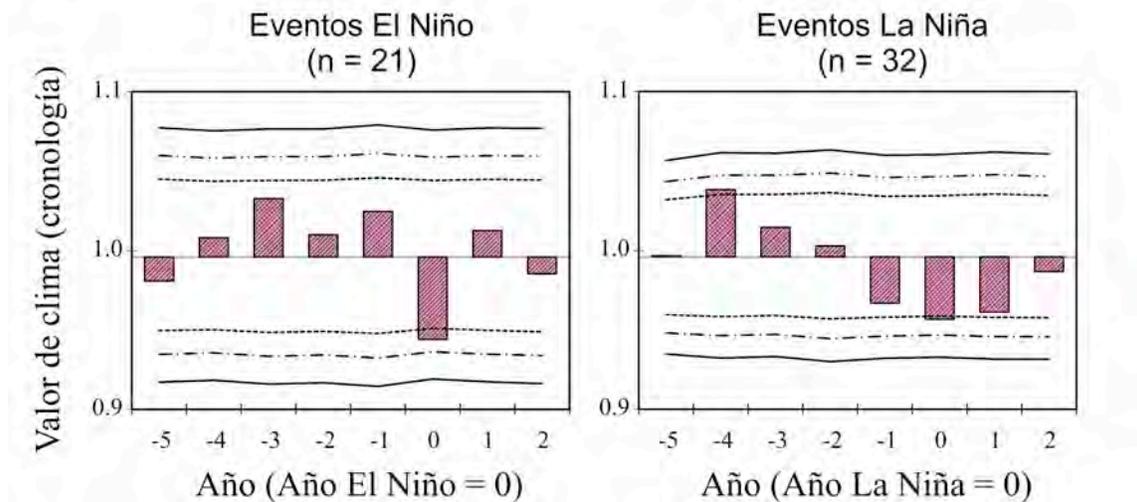


Figura 6.10. Análisis de sobreposición de época que muestra el valor medio de la variabilidad climática para años El Niño y La Niña con incendios extensos. Los años El Niño y La Niña están indicados por el 0. Las tres líneas por encima y por debajo del eje de la “X” representan intervalos de confianza del 95%, 99% y 99.9%, respectivamente.

Estos resultados sustentan nuestra segunda hipótesis de investigación, que establece que la frecuencia histórica de los incendios en el Parque Nacional Cofre de Perote está relacionada de manera importante con la variabilidad climática. Con base en la clasificación histórica de eventos ENSO en su fase El Niño y La Niña (Gergis y Fowler, 2009), se determinó la condición climática en que se desarrollaron los incendios reconstruidos (incendios identificados en $\geq 10\%$ de las muestras), de 41 incendios registrados bajo condiciones de sequía, 32 (78%) coincidieron con eventos La Niña (Figura 6.10, 6.11 y 6.12); mientras que, de 26 incendios desarrollados en condiciones de lluvia por arriba de la media pero no significativa, 21 (81%) sincronizaron con eventos El Niño (Figura 6.10, 6.11 y 6.12).

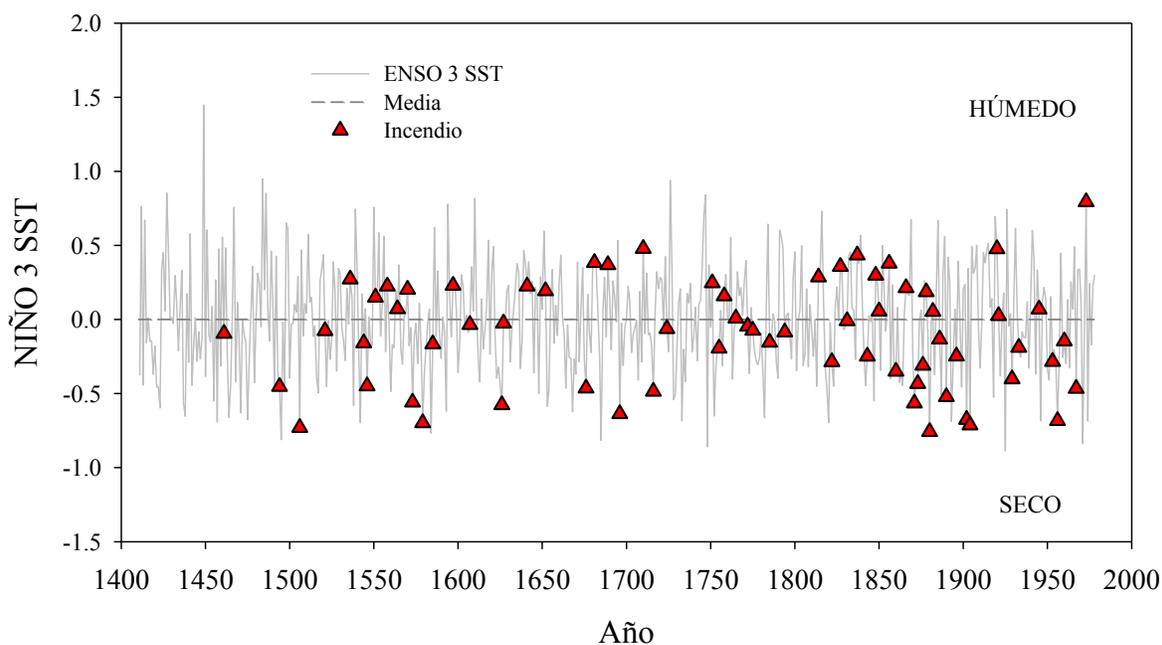


Figura 6.11. Condición climática del índice anual NIÑO 3 SST durante el desarrollo de incendios extensos (identificados en $\geq 10\%$ de las muestras, triángulos) en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. La condición húmeda (superior a la media) corresponde a la fase cálida de ENSO (El Niño) y la condición seca (debajo de la media) representa la fase fría (La Niña).

Los años El Niño son asociados a condiciones de sequía para el centro de México y años La Niña a condiciones de sequía para la región norte del país y viceversa (Magaña *et al.*, 2003; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011). Esta condición se corrobora en el Cofre de Perote, donde 21 incendios extensos sincronizaron con años El Niño (Figura 6.10 y 6.11).

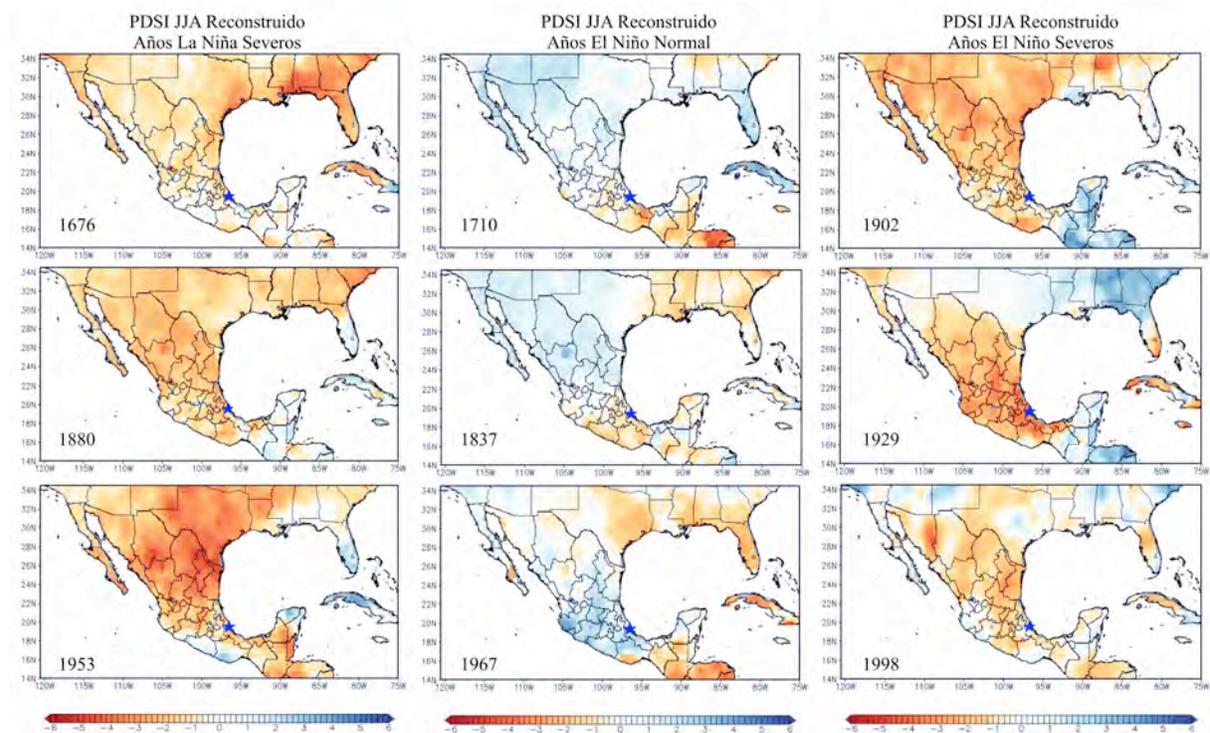


Figura 6.12. Mapas para años específicos que detallan las condiciones climáticas dominantes de sequía, durante las cuales se reconstruyeron incendios extensos. En esta figura se ejemplifica cómo años de condición severa de ENSO en su fase fría (La Niña) y cálida (El Niño) afectan a gran escala y eventos ENSO moderados en su fase cálida (El Niño) afectan a escala regional (centro y sur de México). De izquierda a derecha se muestra la magnitud de la sequía ante eventos severos de La Niña; eventos El Niño normales y eventos El Niño severos. Esta variabilidad en la magnitud de los eventos explica la asociación con la frecuencia de incendios en ambas fases de ENSO en el Parque Nacional Cofre de Perote. El símbolo en forma de estrella indica la ubicación geográfica de la zona de estudio. Los mapas se generaron con base en el MXDA (Stahle *et al.* 2016).

Sin embargo, eventos severos de La Niña representan condiciones de sequía extrema, que se extiende a todo el país (Figura 6.12), a lo cual se atribuye que 32 de los incendios más extensos sincronizaran con eventos La Niña. La figura 6.12 muestra un ejemplo de las

condiciones de sequía a nivel nacional durante eventos extremos La Niña y a nivel regional en años normales de El Niño, para ambas condiciones se reconstruyó incendios extensos en el área de estudio.

De igual manera, eventos de El Niño extremos propician condiciones de sequía severa en una escala geográfica extensa, es decir que su efecto no se limita a una escala regional (Figura 6.12). Un ejemplo son los eventos El Niño de 1902, 1929 y 1998, años que registraron condición de sequía a nivel nacional (Figura 6.12), propiciando incendios tanto en el centro (Cerano *et al.*, 2016) como en el norte del país (Fulé y Covington, 1999; Cerano *et al.*, 2010). Los años El Niño de 1983 y 1998 (Trenberth, 1997), no solo afectaron a la región centro y sur del país, como se esperaría, si no que su impacto cubrió hasta la parte norte de México, donde se han reconstruido incendios de alta intensidad (Cerano *et al.*, 2010; Yocom *et al.*, 2010). El Niño de 1998 es considerado uno de los eventos más severos que impactó el centro y sur de México (Figura 6.12), considerado un año record en la presencia de incendios (Rodríguez y Pyne, 1999). Aunque este incendio no se registró en la exposición noroeste del Cofre de Perote a la que corresponde nuestra área de estudio, la parte este de la montaña sí fue afectada severamente por este incendio (Lorenzo Vázquez Selem, comunicación personal).

Los eventos El Niño, en algunos casos, ocurren posteriormente a eventos intensos de La Niña, registrando una precipitación no significativa o sequía, propiciando condiciones favorables para el desarrollo de incendios. Por ejemplo, La Niña de julio de 1970, se extendió hasta enero de 1972, dejó 19 meses de sequía para el norte y centro del país, esto aunado a que en abril de 1972 dio inicio un evento El Niño, que se extendió hasta marzo de

1973 con registros de lluvia no significativa (12 meses de sequía acentuada en el centro y sur de México) (Trenberth, 1997), condición que dio paso al incendio de la primavera de 1973, último fuego extenso registrado en el Cofre de Perote (Figura 6.8). De manera similar, La Niña de marzo de 1950 se extendió hasta febrero de 1951, dejó 12 meses de sequía a nivel nacional, y fue seguida por El Niño que inició en agosto de 1951 y que se extendió hasta noviembre de 1953, 16 meses más de sequía en el centro del país (Trenberth, 1997), condición a la cual se atribuye el incendio extenso reconstruido en primavera de 1953 (Figura 6.8 y 6.12).

Estos resultados corroboran lo reportado por Cerano *et al.* (2016) en los bosques de *P. hartwegii* en la Sierra Norte de Puebla, quienes encontraron una asociación significativa ($P < 0.05$) entre años ENSO en su fase cálida El Niño y la ocurrencia de incendios extensos. Sin embargo, a diferencia de estos estudios, para los bosques de alta montaña de *P. hartwegii* en el Pico de Orizaba en Veracruz, Yocom y Fulé (2012) no encontraron una asociación significativa entre El Niño y eventos de incendios, esto atribuible a la influencia antropogénica en el régimen de incendios. Sin embargo, eventos extremos de ENSO tanto en su fase cálida como fría han influido positivamente en la ocurrencia de incendios para las tres regiones en el centro del país.

La reconstrucción de incendios para la sierra norte de Puebla, presenta un 60% (12 incendios) de sincronía de incendios con el Cofre de Perote, cinco incendios relacionados con fase La Niña y siete con fase El Niño (Gergis y Fowler, 2009). En el Pico de Orizaba a pesar de la influencia humana en la alta frecuencia de incendios y no observarse una clara sincronía que indique fuegos extensos, se reconstruyeron cuatro incendios (1902, 1907,

1943 y 1960) con alta sincronía entre sitios, tres de los cuales (1902, 1943 y 1960) coinciden con incendios en el Cofre de Perote, uno asociado a El Niño y dos a La Niña, respectivamente (Gergis y Fowler, 2009).

En otras regiones, como en el suroeste de los Estados Unidos, se observa una relación significativa entre inviernos secos de La Niña y una mayor actividad de incendios, mientras que los inviernos húmedos ocasionados por la fase cálida de El Niño tienen un efecto opuesto, suprimiendo la actividad generalizada de incendios (Swetnam y Betancourt, 1990). Para el norte de México, en la Sierra Madre Occidental se ha observado una relación significativa de inviernos secos, La Niña, y una temporada de incendios más larga, aumentando la probabilidad de incendios generalizados. Sin embargo, los años de El Niño no se asocian significativamente con años de no incendios (Heyerdahl y Alvarado, 2003). Para la región centro de México, en los bosques de altura de *P. hartwegii* se reporta una influencia positiva pero no significativa tanto de El Niño como La Niña en la ocurrencia de incendios (Yocom y Fulé, 2012) y una relación significativa con El Niño y positiva con eventos La Niña para la Sierra Norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016).

Así como el fenómeno circulatorio ENSO, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) es un índice de las anomalías de la temperatura superficial del mar de largo período, para este caso del Pacífico Norte (Trenberth, 1990; Mantua y Hare, 2002). El ENSO y el PDO han sido asociados con la ocurrencia de incendios en el oeste de los Estados Unidos a través de un control sinóptico de las sequías anuales, que sincronizan con la ocurrencia de incendios (Heyerdahl *et al.*, 2002; Brown y Wu, 2005).

Se ha observado que las fases del PDO pueden afectar la fuerza con que se registren los eventos de El Niño o La Niña (Gershunov y Barnett, 1998). Durante la fase fría de PDO los efectos de El Niño sobre el clima pueden debilitarse, caso contrario, los efectos de La Niña pueden magnificarse. Por ejemplo, las sequías en el centro y oeste de los Estados Unidos se intensifican cuando La Niña ocurre durante la fase negativa del PDO (McCabe y Dettinger, 1999). Los efectos que ejerce el PDO sobre el clima se habían observado en el Pacífico Norte (Mantua y Hare, 2002) y suroeste de Norteamérica (Higgins *et al.*, 2000) manifestándose principalmente durante el período invernal. Sin embargo, Engleharth y Douglas (2002) y Pavia *et al.* (2006) dieron indicios del papel que juega el PDO en la modulación de anomalías de precipitación y temperatura estacional en México y Méndez *et al.* (2010) reafirman la influencia del PDO en la variabilidad del clima del norte y centro del país.

Históricamente, eventos extremos de ENSO en su fase La Niña han cubierto una escala geográfica extensa (Figura 6.12), propiciando incendios en el centro de México, como se ha discutido previamente; la sincronía entre La Niña y la fase fría de PDO pudieron haber magnificado los eventos extremos de La Niña ocasionando que sus efectos (sequía) se extendieran hasta el centro y sur de México, a lo cual se puede atribuir que en el Cofre de Perote se haya observado una relación significativa entre la fase negativa del ENSO (condición de sequía La Niña) y la fase fría (negativa) de PDO (Figura 6.6 y 6.13). La señal más fuerte para la ocurrencia de incendios está dada por la sincronización en la fase negativa de ambos fenómenos (ENSO y PDO), condición que magnifica la intensidad de las sequías y propicia las condiciones para la ocurrencia de incendios extensos tanto en el norte como en la región centro-sur de México (Figura 6.13).

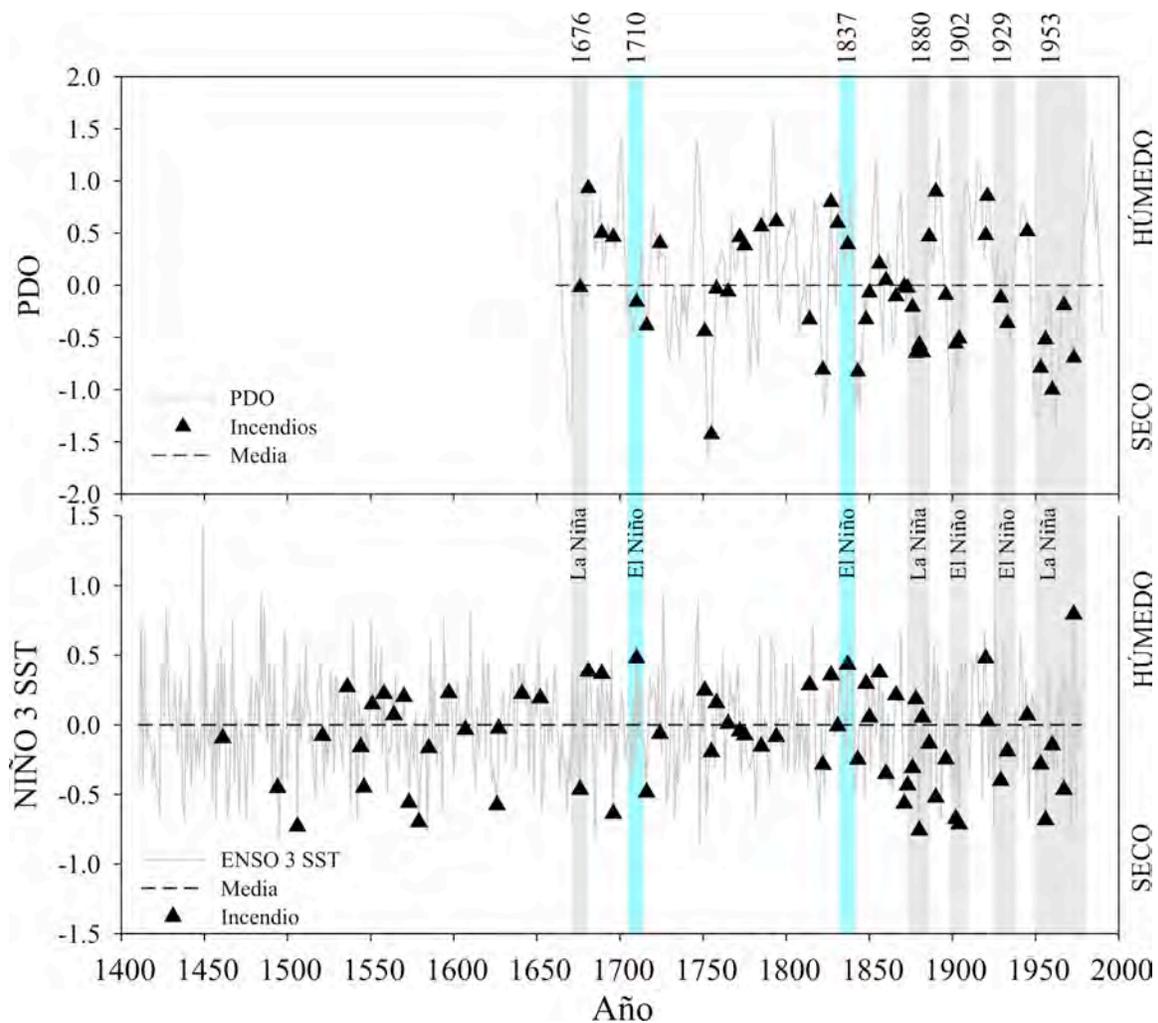


Figura 6.13. Condición de los índices climáticos NIÑO 3 SST (Cook, 2000a) y PDO (Biondi *et al.*, 2001) durante la ocurrencia de incendios extensos (triángulos) en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. La sincronía en fase negativa de ENSO y PDO se asocia a condiciones severas de sequía y ocurrencia de incendios a nivel nacional, tanto en la fase El Niño como La Niña (líneas en color gris). Las líneas en color azul claro, representan eventos El Niño con sequía localizada en el centro y sur de México. Cada uno de los años resaltados tanto en color gris como azul, corresponden a los años de incendios indicados en los mapas de sequía de la Figura 12.

Nuestros resultados corroboran lo reportado por Engleharth y Douglas (2002) y Pavia *et al.* (2006) quienes dieron indicios del papel que juega el PDO en la modulación de la precipitación y temperatura estacional en México, y se reafirma lo observado por Méndez

et al. (2010), quienes reportaron que el PDO se relaciona positivamente con la precipitación, en particular durante el invierno boreal (noviembre-abril), lo que significa que la fase negativa (positiva) del PDO favorece sequías (lluvias) invernales especialmente en la Altiplanicie Mexicana y el norte de México.

La relación positiva de la frecuencia de incendios ante eventos ENSO en fase fría La Niña y cálida El Niño, se ha evidenciado tanto en los bosques de *P. hartwegii* (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2016) como en los bosques de *P. douglasiana* (Cerano *et al.*, 2015) en la región centro de México. Los resultados de nuestra investigación en el Parque Nacional Cofre de Perote, reafirman la influencia significativa de ENSO (El Niño y La Niña) como modulador de la frecuencia de incendios. Así mismo, se observó que la fase fría (negativa) de PDO se asocia a condiciones de sequías invernales para el centro de México y con la ocurrencia de incendios. Sin embargo, hay que resaltar que la sincronía en fase negativa (sequía) de ENSO y PDO magnifican los eventos de La Niña, dando paso a sequías de gran intensidad en una zona geográfica más extensa y condiciones para el desarrollo de incendios en todo el país (Figura 6.13). Posiblemente a la sincronización de estos fenómenos se deba la influencia significativa de La Niña en la frecuencia de incendios durante los últimos 550 años en los bosques de *P. hartwegii* en el Cofre de Perote.

Referente a las variables temperatura y precipitación observadas, no se encontró una relación significativa de la temperatura mínima y máxima con la ocurrencia de incendios. Sin embargo, las condiciones de temperaturas máximas y mínimas durante los años de incendios fueron más cálidas tanto en la estación de invierno como en primavera. Así mismo, durante los años de incendios, se observaron condiciones significativas ($P < 0.05$)

de precipitación por debajo de la media durante el invierno y condiciones de precipitaciones por debajo de la media ($P > 0.05$) en la estación de primavera (Figura 6.14).

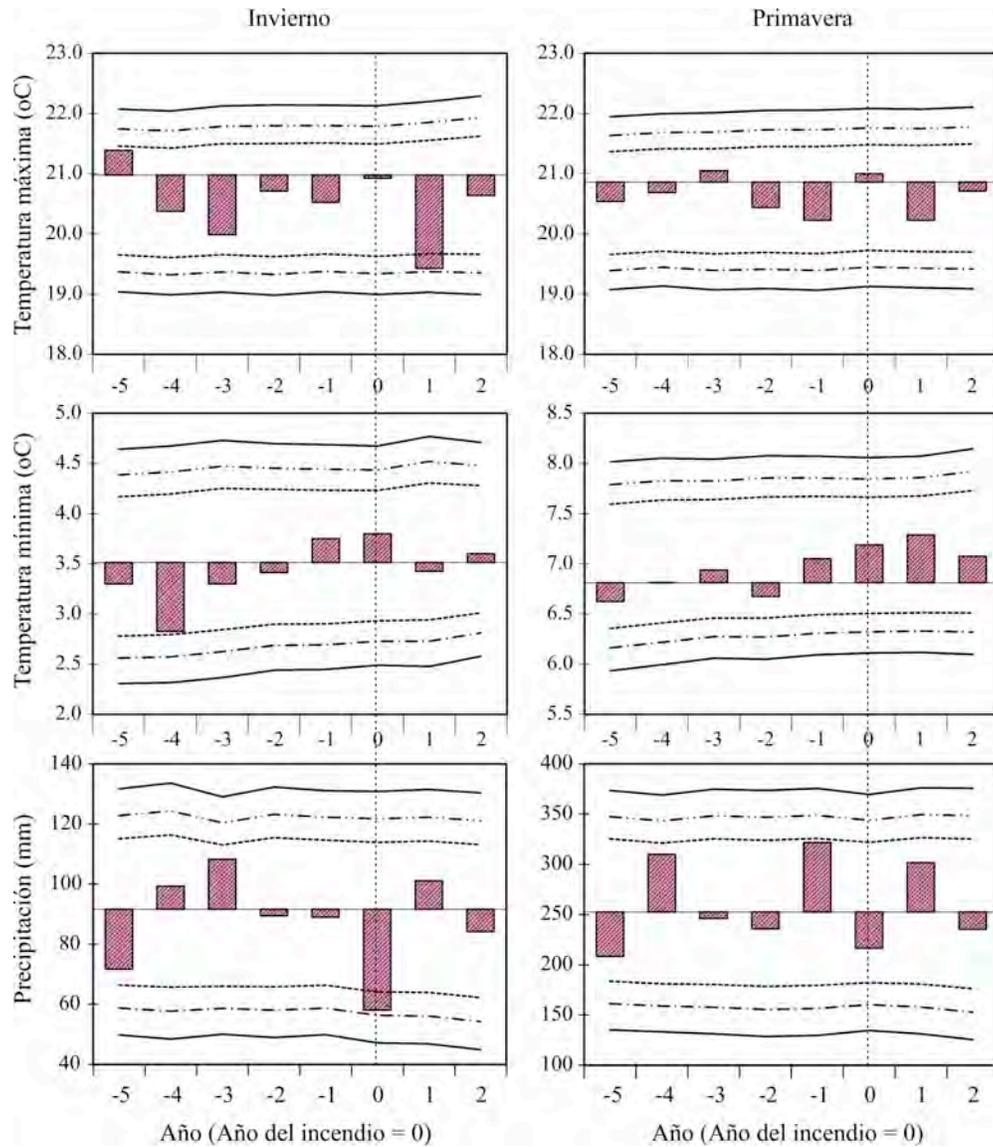


Figura 6.14. Análisis de sobreposición de época que muestra el valor medio de la temperatura máxima, mínima y precipitación (período de datos observados de 1923-2011) durante años de incendios reconstruidos en el Cofre de Perote. Los años de incendios están indicados por el 0. Las tres líneas por encima y por debajo del eje de la X representan intervalos de confianza del 95%, 99% y 99.9%.

La sincronía de incendios en el Parque Nacional Cofre de Perote, ha ocurrido durante el período relativamente caliente o seco de primavera. Probablemente la pérdida temprana de humedad ante el derretimiento de nieve, incremento en la evaporación y la disminución significativa de las lluvias de invierno, favorezcan la ocurrencia de incendios extensos (Westerling *et al.*, 2006). La falta de una relación significativa entre altas temperaturas y la ocurrencia de incendios, se puede atribuir al corto período de datos observados que se empleó en el análisis (1923-2011), ya que no se cuenta con una reconstrucción de temperatura más extensa para esta región.

6.7. Implicaciones de manejo y conclusiones

En general, todavía hay mucho que aprender sobre la ecología del fuego en los bosques mexicanos de coníferas (Rodríguez y Fulé, 2003; Rodríguez, 2014). El principal aporte derivado de este estudio, es que los incendios frecuentes han desempeñado un papel importante en la estabilidad del bosque de altura del Cofre de Perote durante los últimos 550 años. Así mismo, se determinó que el patrón de incidencia histórica de incendios cambió posteriormente a 1973. El cambio en la frecuencia de incendios después de 1973 indica que los bosques en el Parque Nacional Cofre de Perote no se han quemado durante los últimos 43 años. Se debe considerar, que la amplitud en los intervalos de la frecuencia de incendios propician un incremento en la acumulación de combustibles (hojas, pastos, arbustos y ramas), tanto en cantidad como en continuidad (Fulé *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2008), lo que puede favorecer la presencia de incendios más severos, en particular, cuando esto coincida con un año de sequía.

Yocom *et al.* (2010) describen el control de los incendios tanto de abajo hacia arriba “bottom-up” (combustibles) como de arriba hacia abajo “top-down” (clima); de abajo hacia arriba, por la reducción en la cantidad de combustibles ante una alta frecuencia de incendios superficiales, lo que reduce el riesgo de incendios severos incluso en años de sequía. El control de arriba hacia abajo se evidencia por la fuerte relación del fuego con años de sequía o algún fenómeno climático. Para el caso del Cofre de Perote, se observó una relación significativa de ENSO y PDO en la ocurrencia histórica de incendios.

Es importante resaltar que antes de la década de 1970, cuando inició la exclusión del fuego, el control del combustible (ascendente) estaba dado por la frecuencia de incendios, que probablemente moderaron la influencia climática de arriba hacia abajo. Sin embargo, este control ascendente que los incendios frecuentes ejercían ante la disminución de los combustibles, se eliminó con la exclusión del fuego, ahora los combustibles son más homogéneos en el área de estudio y en gran cantidad (observación personal). Lo cual puede propiciar que condiciones climáticas extremas (sequía), control de arriba hacia abajo, dominen el comportamiento de fuegos extensos en los próximos años. La supresión de incendios en áreas con regímenes de incendios superficiales históricamente frecuentes, no es la mejor herramienta de manejo, pues esto puede contribuir al cambio de las masas forestales, la acumulación de combustibles, problemas de plagas y a un mayor riesgo de incendios catastróficos (Rodríguez y Fulé, 2003; Yocom *et al.*, 2010). Sin embargo, tampoco se debe caer en el extremo de incendios demasiado frecuentes, condición que puede resultar degradador para el ecosistema (Rodríguez y Fulé, 2003).

El fuego debe utilizarse siempre que sea posible para restaurar un régimen de incendios superficiales frecuentes, con el objetivo de obtener beneficios ecológicos y reducir el riesgo de incendios severos que replacen la vegetación (Pollet y Omi, 2002; Fulé *et al.*, 2005). La información histórica sobre el régimen de incendios generada en este estudio, debe ser considerada e interpretada en el contexto de los objetivos actuales del área. Los intervalos de frecuencia histórica promedio para todos los incendios reportados en este estudio son de cinco años aproximadamente; esto no significa que los encargados del manejo del fuego o administradores del parque deben emular este patrón (Tiedemann *et al.*, 2000), quizás las condiciones ecológicas deseables podrían mantenerse con un intervalo más largo (Fulé *et al.*, 2003, 2005).

Los resultados de esta investigación son de gran relevancia para los administradores del parque, que pueden hacer uso de este conocimiento para mantener o restaurar los regímenes históricos de incendios en el futuro, con miras a garantizar la conservación del vasto recurso biológico del parque y de los servicios hidrológicos que proporciona. Se recomienda desarrollar estudios adicionales de estructura forestal y determinar cargas de combustibles actuales que soporten la definición de áreas de mayor riesgo de incendios, bases de conocimientos necesarios para lograr la conservación a largo plazo.

Capítulo 7. Discusión y conclusiones generales

7.1. Reconstrucción de la historia del fuego

Las montañas del centro y norte de México, constituyen un mosaico de ecosistemas diversos. Los bosques son centros de diversidad vascular de importancia global, y de endemismo tanto en especies vegetales como animales (Bye, 1993). Tienen el mayor número de especies de pino y encino en el mundo (Rzedowski, 1991). Los incendios superficiales han sido históricamente frecuentes en estos bosques, y variaciones en su frecuencia pueden haber contribuido al mantenimiento de esta biodiversidad tanto en el norte (Dieterich, 1983; Fulé y Covington, 1997, 1999; Park 2001; Heyerdahl y Alvarado, 2003) como en el centro de México (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2015, 2016). Sin embargo, sabemos muy poco aún sobre la variación de los regímenes históricos de incendios en los bosque de México (Rodríguez, 2001; Heyerdahl y Alvarado, 2003).

Las reconstrucciones de regímenes del fuego generadas en este estudio, contribuyen en gran medida a incrementar la red de estudios y bases de datos sobre regímenes de incendios, y que a su vez permitirán un mejor entendimiento del comportamiento histórico del fuego en ecosistemas de diferentes regiones geográficas. Para la región norte del país, en la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango, se logró reconstruir la historia del fuego para los últimos 350 años, serie que representa para el estado de Durango, la más extensa comparada con las desarrolladas previamente (Fulé y Covington, 1997 y 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Molina *et al.*, 2017) y de longitud similar a otras desarrolladas para la Sierra Madre Occidental (Fulé *et al.*, 2005).

El conocimiento sobre los regímenes del fuego fundamentado en técnicas dendrocronológicas, es aún más limitado para la región centro del país. Previo a los trabajos generados, se habían publicado únicamente dos reconstrucciones de la historia del fuego (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2015). Los estudios desarrollados en la Sierra Norte de Puebla y el Parque Nacional Cofre de Perote en Veracruz, han contribuido a incrementar la red de estudios del fuego y a mejorar el conocimiento sobre regímenes de incendios en los bosques de *P. hartwegii*. Se logró reconstruir la historia del fuego para los últimos 120 años en la Sierra Norte de Puebla y 550 años para el Cofre de Perote. Esta última serie, constituye la reconstrucción de regímenes del fuego más extensa para el centro del país y para los bosques de *P. hartwegii* en México.

7.2. Estación de ocurrencia de incendios

Las reconstrucciones de incendios con respecto a la época de ocurrencia, presentan similitud entre regiones. El 93.8%, 91.7% y 96.1% de los incendios, se registraron en la época de primavera para la parte alta del río Nazas, Durango; sierra norte de Puebla y el Cofre de Perote en Veracruz, respectivamente. En general, tanto en las regiones norte y centro del país, más del 90% de los incendios se han registrado en la estación de primavera, lo cual está modulado por condiciones climáticas similares para ambas regiones; es decir, un período seco de invierno-primavera, antes del inicio de las lluvias de verano, período caracterizado por escasa precipitación, altas temperaturas y menor tasa fotosintética (valor de NDVI) o mayor estrés de la vegetación (SMN, 2017; Figura 7.1).

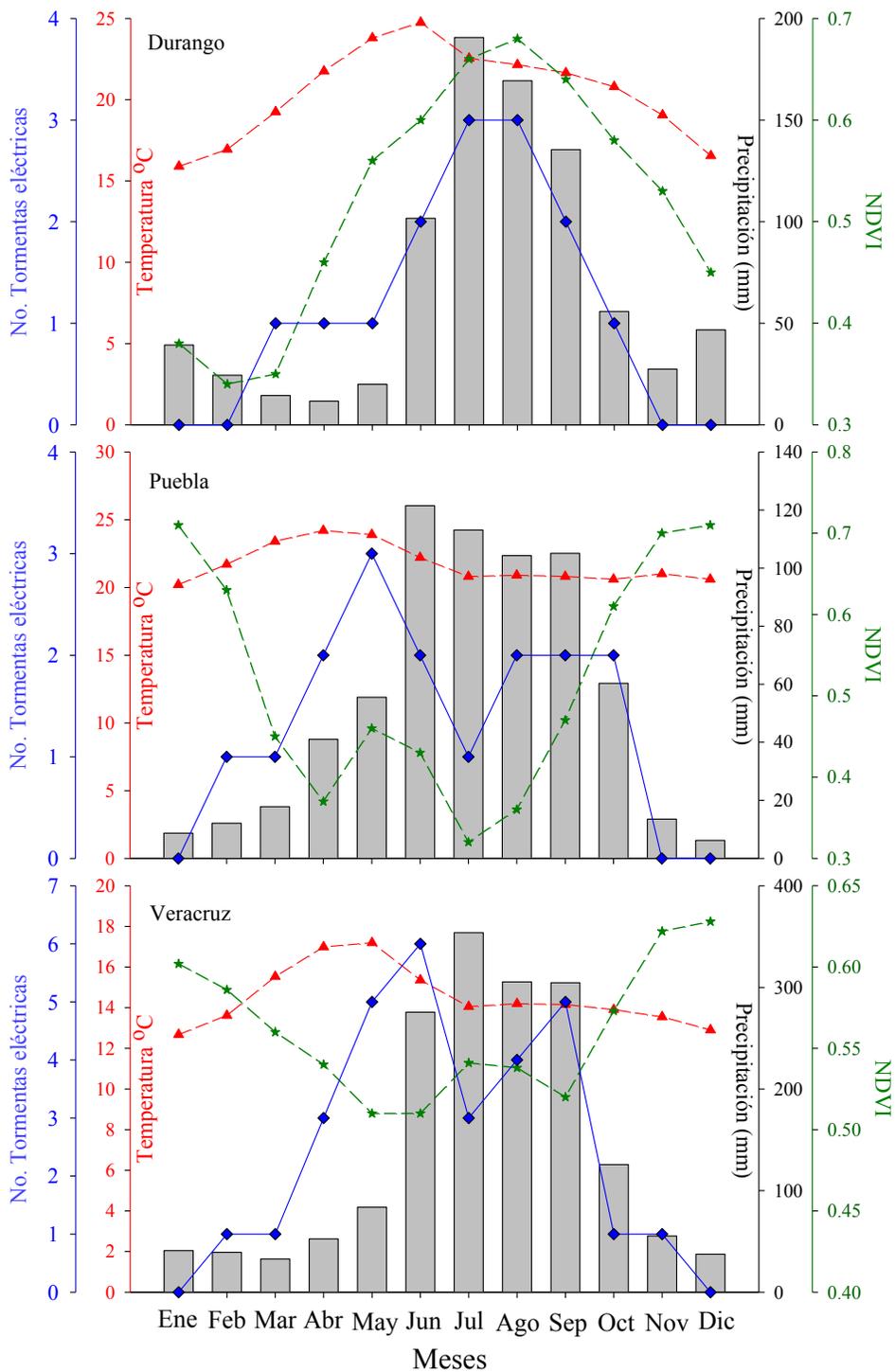


Figura 7.1. Distribución mensual de la variabilidad de la lluvia (barras) y temperatura (rojo) para las tres áreas de estudio. La distribución en el año de las tormentas eléctricas se indica en color azul y en color verde los valores de NDVI, que indican la tasa fotosintética de la vegetación o el nivel de estrés (ejes externos). Los datos de precipitación, temperatura y tormentas eléctricas corresponden a datos observados promedio (1951-2010) de las estaciones más cercanas a los sitios de estudio (SMN, 2017). Los valores de NDVI corresponden a datos promedio de la vegetación para el período 1981-2006 (Tucker *et al.*, 2005).

Así mismo, históricamente este período seco del año, sincroniza con el inicio e incremento en la incidencia de rayos o descargas eléctricas para el norte y centro del país (SMN, 2017; Figura 7.1).

Para el norte de México, Rodríguez (2014) indica la presencia de tormentas eléctricas en seco en el mes de abril, que dieron inicio a incendios forestales. En la Sierra Madre Occidental, Fulé y Covington (1997) reportan evidencias de presencia de incendios por rayos. Así mismo, en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos, se ha observado incidencia de rayos en el período seco de primavera y que han dado inicio a incendios naturales (Swetnam *et al.*, 2001).

Swetnam y Betancourt (1990) y Swetnam y Baisan (1996) señalan que las descargas eléctricas son la principal fuente de ignición en los ecosistemas de pino del suroeste de los Estados Unidos, y que este proceso de ignición natural, mantiene de manera significativa el régimen frecuente de incendios en la Sierra Madre Occidental. Durante los últimos 350 años para la región norte y 550 años para el centro de México, los incendios se han registrado en la época seca de primavera, posiblemente antes del establecimiento de comunidades y ejidos en las áreas forestales (influencia humana). La interacción en conjunto de todas las variables analizadas, dio inicio a los incendios de origen natural en las diferentes regiones.

7.3. Reconstrucción de regímenes de incendios

La región norte, la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango, presenta un MFI para todas las cicatrices de 2 a 3 años. Son intervalos más cortos que los reportados en otros estudios para el mismo estado (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Molina *et al.*, 2017) (Tabla 7.1), lo cual obedece a una mayor incidencia de incendios en esta región de la cuenca.

El MFI para los incendios más extensos (aquellos que cicatrizaron ≥ 25 % de las muestras) fue más amplio, y varió de 6 a 8.6 años. Son intervalos similares a los reportados en los trabajos desarrollados en el estado de Durango (Tabla 7.1), lo cual se puede atribuir a una variabilidad climática regional común, que ha modulado condiciones propicias (sequía) para la presencia y desarrollo de incendios con sincronía en períodos de tiempo en escalas geográficas extensas.

Los estudios de reconstrucción de la historia del fuego para los estados de Durango (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Molina *et al.*, 2017) y Chihuahua (Fulé *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2010), presentan similitud en períodos de mayor frecuencia de incendios, sobresaliendo los ocurridos a inicio del siglo XIX, mediados y finales del siglo XIX (1850 y 1890), inicio del siglo XX (1901, 1902, 1904) y mediados del siglo XX. Así mismo, estudios que documentan incendios en años más recientes, reportan frecuencia de incendios con sincronía en la década de 1970 (Heyerdahl y Alvarado, 2003; Molina *et al.*, 2017).

Tabla 7.1. Reconstrucción de regímenes de incendios con base en métodos dendrocronológicos para bosques mixtos de pino en México. Intervalos de frecuencia reconstruidos con base en el total de incendios identificados, y con base en incendios identificados en $\geq 25\%$ del total de las muestras.

Estado	Especie	Intervalos de frecuencia	Fuente
Sierra Madre Oriental			
Nuevo León	<i>Pinus hartwegii</i>	8.6-9.6 años (todos los incendios) 11.9-18.6 años ($\geq 25\%$)	Yocom <i>et al.</i> (2010)
Sierra Madre Occidental			
Durango	Pino-Encino	4-5 años (todos los incendios) 6-9 años ($\geq 25\%$)	Fulé y Covington (1997)
Durango	Pino-Encino	3-8 años (todos los incendios) 7-14 años ($\geq 25\%$)	Fulé y Covington (1999)
Durango	<i>Pinus durangensis</i> <i>Pinus teocote</i> <i>Pinus ayacahuite</i> <i>Pinus engelmannii</i>	3-6 años (todos los incendios)	Heyerdahl y Alvarado (2003)
Durango	<i>Pinus durangensis</i> <i>Pinus arizonica</i> <i>Pinus ayacahuite</i> <i>Pinus teocote</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i>	3 años (todos los incendios) 6 años ($\geq 25\%$)	Molina <i>et al.</i> (2017)
Durango	<i>Pinus arizonica</i> <i>Pinus ayacahuite</i> <i>Pinus teocote</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i>	2-3 años (todos los incendios) 6-8.6 años ($\geq 25\%$)	Cerano <i>et al.</i> (En prensa)
Chihuahua	<i>Pinus ayacahuite</i> <i>Pinus durangensis</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i>	3.9-5.2 años (todos los incendios) 6.9-8.4 años ($\geq 25\%$)	Fulé <i>et al.</i> (2005)
Chihuahua	<i>Pinus durangensis</i> <i>Pinus arizonica</i> <i>Pinus ayacahuite</i>	5.1-8.8 años (todos los incendios) 13 años ($\geq 25\%$)	Cerano <i>et al.</i> (2010)
Centro de México			
Jalisco	<i>Pinus douglasiana</i>	5.5 años (todos los incendios) 8.9 años ($\geq 25\%$)	Cerano <i>et al.</i> (2015)
Puebla	<i>Pinus hartwegii</i>	5.6 años (todos los incendios) 9.2 años ($\geq 25\%$)	Cerano <i>et al.</i> (2016)
Veracruz	<i>Pinus hartwegii</i>	2.1-3.5 años (todos los incendios) 6.5-9.5 años ($\geq 25\%$)	Yocom y Fulé (2012)
Veracruz	<i>Pinus hartwegii</i>	5 años (todos los incendios) 22 años ($\geq 25\%$)	Cerano <i>et al.</i> (En prensa)

Los diferentes períodos con sincronía en frecuencia de incendios, son períodos asociados a condiciones de sequía para la región norte de México (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2012). Lo anterior sustenta el supuesto de que la frecuencia de incendios en períodos comunes para diferentes regiones, está modulado por una variabilidad climática de gran escala.

Para los bosques de altura de *P. hartwegii* en la región centro del país, en la Sierra Norte de Puebla, se reconstruyeron intervalos de frecuencia de incendios de 5.6 años para todos los incendios y 9.2 años para los incendios más extensos (aquellos que quemaron ≥ 25 % de las muestras). Para el Cofre de Perote, se reconstruyó un intervalo promedio de frecuencia de 5 años al considerar todos los incendios y 22 años para los incendios más extensos (aquellos que quemaron ≥ 25 % de las muestras). Rodríguez (2001) reporta para los bosques de *P. hartwegii*, una frecuencia promedio de 5 años e intervalos extensos que no superan los 10 años. Los resultados para Sierra Norte de Puebla (Cerano *et al.*, 2016) indican intervalos similares a lo reportado por dicho autor (Tabla 7.1). Sin embargo, para el Cofre de Perote, los intervalos de incendios más extensos son de 22 años (Tabla 7.1).

Un resultado similar, se reporta para los bosques de *P. hartwegii* en el Pico de Orizaba, Veracruz (Yocom y Fulé, 2012) y Nuevo León (Yocom *et al.*, 2010), donde el primer sitio corrobora lo indicado por Rodríguez (2001), mientras que en el segundo caso los resultados difieren de los de este autor para los incendios más extensos, ya que se reportan intervalos de 12-18 años (Tabla 7.1). Los intervalos más amplios para bosques de *P. hartwegii* a la fecha, son los reconstruidos para el Parque Nacional Cofre de Perote.

Los intervalos de incendios más extensos en el Cofre de Perote y en el estado de Nuevo León, se pueden atribuir al cambio en la frecuencia de incendios, derivado de la influencia antropogénica, ya que se reconstruyó una exclusión del fuego posterior a 1973 y 1929, respectivamente. Por el contrario, para los bosques de la Sierra Norte de Puebla y el Pico de Orizaba, se reconstruyó una frecuencia continua de incendios hasta el presente. Aunque la historia de incendios para la Sierra Norte de Puebla, muestra un cambio en la frecuencia de incendios posterior a 1988, que se atribuye a un manejo forestal más controlado, el grado de severidad por la influencia humana es menor.

Para el norte del país, la exclusión del fuego es más severa, la cuenca del río Nazas muestra un cambio en la frecuencia natural de incendios a partir del inicio de la década de 1950. Estudios sobre regímenes de incendios desarrollados para el norte de México, específicamente para el estado de Durango, han reportado resultados similares, una exclusión del fuego posterior a 1950 (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003). Este cambio abrupto en los regímenes del fuego, se atribuye a cambios en los patrones de tenencia de la tierra (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Cortes *et al.*, 2012).

El establecimiento de ejidos en la década de 1950 en áreas forestales de la Sierra Madre Occidental, pudo haber modificado los regímenes de incendios al propiciar una gran discontinuidad de los combustibles, derivado de la intensificación en el pastoreo de ganado, construcción de caminos y explotación forestal (Fulé y Covington, 1997; Kaib, 1998; Heyerdahl y Alvarado, 2003). Con base en estos resultados, se aceptan las dos primeras

hipótesis de investigación planteadas en este estudio: 1) que los regímenes del fuego de alta frecuencia que históricamente mantuvieron el funcionamiento ecológico de ecosistemas forestales adaptados al fuego, en la parte norte y centro de México, han cambiado su frecuencia de manera importante durante el siglo XX y 2) que el cambio en la frecuencia de incendios en las últimas décadas del siglo XX, obedece principalmente a la influencia antropogénica.

Es importante recalcar que, la supresión de incendios en áreas con regímenes de incendios superficiales históricamente frecuentes, no es la mejor herramienta de manejo, esto puede contribuir al cambio de las masas forestales, acumulación de combustibles, problemas de plagas y un mayor riesgo de incendios catastróficos (Rodríguez y Fulé, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2008; Yocom *et al.*, 2010), situación de riesgo que se potencializa en años con sequía.

El cambio en la frecuencia de incendios es una tendencia que aún se puede corregir con buenas prácticas de manejo del fuego; por ello, se recomienda mantener la frecuencia de incendios dentro de la amplitud de su variación histórica, tanto en la región norte como centro del país. Los resultados de esta investigación son de gran relevancia para los administradores de los bosques bajo manejo y para áreas protegidas, que pueden hacer uso de esta información para mantener o restaurar los regímenes históricos de incendios en el futuro, con miras a garantizar la conservación biológica y los servicios hidrológicos que brindan estos bosques.

7.4. Influencia del clima en la frecuencia de incendios

Se encontró una relación significativa entre la ocurrencia de incendios y la variabilidad de la precipitación, donde los incendios más extensos y severos, se asocian a una disminución de la lluvia (sequías). La variabilidad de ENSO (NIÑO 3) tuvo un efecto significativo ($P < 0.05$) en la frecuencia histórica de los incendios en los últimos 350, 120 y 550 años, para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango, Sierra Norte de Puebla y Parque Nacional Cofre de Perote, respectivamente.

La condición climática para los años de incendios en las diferentes regiones, fundamentada en índices de series dendrocronológicas, precipitación reconstruida, índices del NIÑO 3, PDSI y PDO, fue seca. Resultados que sustentan la tercer hipótesis de esta investigación, que establece, que el régimen histórico de los incendios (régimen ecológico) está vinculado de manera importante a la variabilidad climática interanual y multianual (ciclos húmedos y secos), y que a su vez, es modulada en gran medida por patrones circulatorios de amplia escala como el fenómeno climático ENSO.

Los incendios forestales, se controlan mediante procesos que actúan a través de una amplia gama de escalas espaciales (Heyerdahl *et al.*, 2001). Los regímenes de incendios, es decir, el patrón, la frecuencia y la intensidad del fuego en una región, reflejan una compleja interacción entre los controles ascendente y descendente (Lertzman *et al.*, 1998).

Los controles ascendentes, incluyen variaciones locales, factores topográficos, de combustible y de tiempo en el momento del incendio (humedad, continuidad del

combustible, densidad y patrones locales de viento y humedad). La regulación ascendente se manifiesta como una gran heterogeneidad espacial y temporal en el comportamiento y efectos del fuego en el paisaje (Falk *et al.*, 2010). Por el contrario, en el control descendente, el clima es el principal control de los regímenes de incendios de arriba hacia abajo, actuando principalmente mediante la regulación interanual de la producción de biomasa, la humedad del combustible y los patrones regionales de ignición. La regulación de arriba hacia abajo, conduce a la sincronía espacial y temporal en la ocurrencia de incendios, más allá de las escalas en las que es probable que los incendios individuales se propaguen (Swetnam y Anderson, 2008; Falk *et al.*, 2010).

En escalas espaciales geográficamente amplias, los años con condiciones de clima extremo a nivel regional, pueden sincronizar la ocurrencia de incendios en áreas extensas (Swetnam y Betancourt, 1998). Por ejemplo, se han observado incendios generalizados durante años con precipitaciones bajas a escalas regionales en sitios del Norte y Sudamérica (Veblen *et al.*, 2000; Kitzberger *et al.*, 2001).

En este trabajo de investigación, se corrobora lo indicado por Swetnam y Betancourt (1998), Swetnam y Anderson (2008) y Falk *et al.* (2010). Los incendios presentan alta sincronía a nivel de sitio, entre sitios, en una región y a una mayor escala, entre regiones. Para el Parque Nacional Cofre de Perote, en el sitio VT, al considerar los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras, se identificaron 60 incendios, 23 (38%) se registraron en los tres sitios VT_{SB}, VT_{SA} y VT_H. Para los sitios de la condición seca (VT_{SB} y VT_{SA}) sincronizaron 33 incendios (55%). Porcentaje similar de incendios (55%, 33

incendios) presentaron sincronía entre la parte seca (VTSB y VTSA) y la exposición más húmeda (VTH).

El sitio BH registró 35 incendios en total, al considerar los incendios registrados en $\geq 10\%$ de las muestras. Al comparar los incendios de los sitios VT y BH, se identificó una sincronía del 51%, 18 de los 35 incendios tuvieron incidencia en ambas áreas, considerados incendios extensos. Así mismo, entre diferentes montañas en el centro de México, se observó una sincronía entre incendios. Para la Sierra Norte de Puebla, de 20 incendios reconstruidos durante el período de 1876-2011 (Cerano *et al.*, 2016), 12 (60%) sincronizaron con incendios extensos reconstruidos en el Parque Nacional Cofre de Perote.

En una escala más amplia, entre las regiones norte y centro de México, de igual manera, se observó sincronía entre incendios. Para la parte alta de la cuenca del río Nazas, en Durango, se reconstruyó un total de 111 incendios para los últimos 400 años, de los cuales 38 (34%) también estuvieron presentes para la región centro del país. Al considerar los incendios más extensos, de 39 incendios en la región norte, 15 se registraron en la región centro, esto indica un 38% de sincronía de incendios extensos entre ambas regiones (Tabla 7.2). Resultados que corroboran la influencia del clima en la modulación de la frecuencia de incendios en una escala geográfica extensa, control descendente.

Tabla 7.2. Sincronía de incendios en los últimos tres siglos (fechas en color rojo) entre las áreas de estudio de la región norte (cuenca alta del río Nazas, Durango) y centro de México (Sierra Norte de Puebla y Parque Nacional Cofre de Perote).

Años (Décadas)	Región norte Años de incendios	Región centro Años de incendios
1690	1696, 1699	1696
1700		
1710		1710, 1714, 1716, 1719
1720	1724, 1728, 1729	1724, 1727
1730	1732, 1739	1731, 1734
1740	1744, 1746	1745
1750	1751, 1752, 1754	1751, 1753, 1755, 1758
1760	1761, 1763, 1764, 1765, 1768	1765
1770	1774, 1775, 1777, 1778, 1779	1772, 1775
1780	1780, 1783, 1785, 1786, 1787, 1788	1780, 1782, 1785, 1787
1790	1790, 1791, 1792, 1796, 1797, 1799	1791, 1794
1800	1801, 1807, 1808	1800, 1802, 1804, 1805
1810	1812, 1813, 1814, 1817, 1818	1810, 1812, 1814, 1819
1820	1822, 1823, 1825, 1826, 1828	1821, 1822, 1824, 1827, 1829
1830	1830, 1832, 1833, 1835, 1838, 1839	1831, 1833, 1835, 1837
1840	1840, 1843, 1844, 1848	1840, 1843, 1848
1850	1850, 1851, 1852, 1854, 1857, 1858, 1859	1850, 1852, 1853, 1856, 1858
1860	1862, 1863, 1864, 1865, 1867, 1868	1860, 1862, 1864, 1866, 1868
1870	1870, 1872, 1874, 1875, 1878, 1879	1871, 1873, 1876, 1878
1880	1882, 1883, 1886, 1889	1880, 1882, 1886, 1888
1890	1890, 1892, 1896, 1897, 1899	1890, 1893, 1894, 1896, 1898
1900	1901, 1904, 1907, 1909	1902, 1904, 1908, 1909
1910	1911, 1913, 1914, 1916, 1917, 1919	1912, 1914, 1918
1920	1920, 1923, 1924, 1927	1920, 1921, 1923, 1924, 1926, 1929
1930	1932, 1934, 1935, 1937, 1939	1931, 1933, 1934, 1936, 1939
1940	1944, 1946, 1947	1940, 1941, 1943, 1945, 1948
1950	1951, 1954	1951, 1953, 1956
1960	1960, 1964	1960, 1962, 1967, 1968, 1969
1970	1972	1970, 1973, 1978
1980	1980, 1982	1983, 1988
1990	1998	
2000		2003
2010		2010

La principal variable que controla el régimen de incendios en el control descendente, es el clima. Los estudios de reconstrucción de la historia del fuego tanto para el norte (Fulé y Covington, 1997, 1999; Heyerdahl y Alvarado, 2003; Molina *et al.*, 2017; Cerano *et al.*, en prensa) como para el centro de México (Yocom y Fulé, 2012; Cerano *et al.*, 2016; Cerano *et al.*, en prensa), presentan similitud en cuanto a períodos de mayor frecuencia y sincronía en los años de incendios, a inicios del siglo XIX, mediados y finales del siglo XIX (1850 y

1890), inicio del siglo XX (1901, 1902, 1904) y mediados del siglo XX. Esta periodicidad está relacionada con una frecuencia de eventos recurrentes de sequía (50 años), tanto en el norte como el centro del país (Cerano *et al.*, 2012; Cerano *et al.*, en prensa). Lo anterior, corrobora la influencia de fenómenos climáticos a gran escala, que modulan el clima en períodos específicos para un área geográfica extensa.

Las dos fases de ENSO (El Niño y La Niña), propician un efecto de dipolo en el clima de México. El Niño está asociado a condiciones de mayor humedad en el norte de México y condiciones de sequía en el centro y sur del país. Por otra parte, La Niña, se asocia a condiciones de sequía para la región norte y mayor humedad para el centro-sur del país (Figura 7.2) (Magaña *et al.*, 2003; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011).

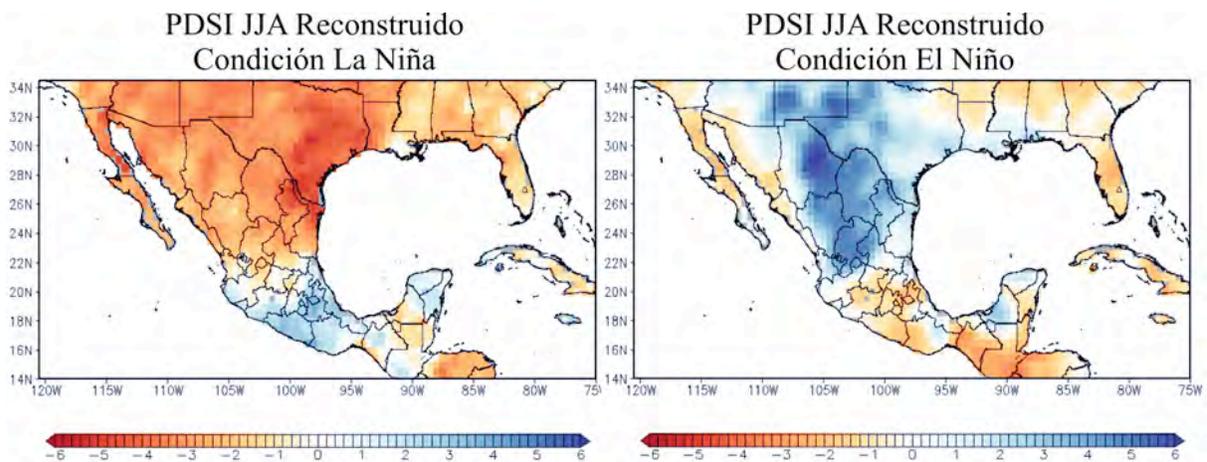


Figura 7.2. Efectos del ENSO en sus dos diferentes fases (La Niña y El Niño) sobre el clima de México. Los mapas se generaron con base en el MXDA (Stahle *et al.* 2016).

La Tabla 7.2, muestra un resumen por década de los incendios reconstruidos tanto para la región norte como para el centro de México, con el objetivo de observar sincronía entre eventos. Sin embargo, para muchos casos, se observa un desfase de un año en las fechas de incendios entre regiones. Por ejemplo, para la región centro, se reconstruyó un incendio en el año 1856 y para la región norte en 1857, con sincronía entre regiones para el año 1858 (Figura 7.3A).

Otro caso, se observa para el incendio de 1907 que se reconstruyó para la región norte y 1908 para el centro, sincronizando incendios ambas regiones en el año 1909 (Figura 7.3B). Esta variabilidad o falta de sincronía en la ocurrencia de incendios entre las dos regiones, se atribuye a la variabilidad del ENSO, a su efecto de dipolo entre el norte y centro del país, que para un año presenta condiciones de sequía en el norte y humedad en el centro y viceversa.

Los años con sincronía de incendios entre regiones, obedecen a eventos extremos tanto de El Niño como La Niña, condición que propicia sequía, la cual se extiende a nivel nacional, creando las condiciones para el desarrollo de incendios tanto en el norte como en el centro. Un ejemplo de lo anterior son los años de 1858 y 1909 (Figura 7.3).

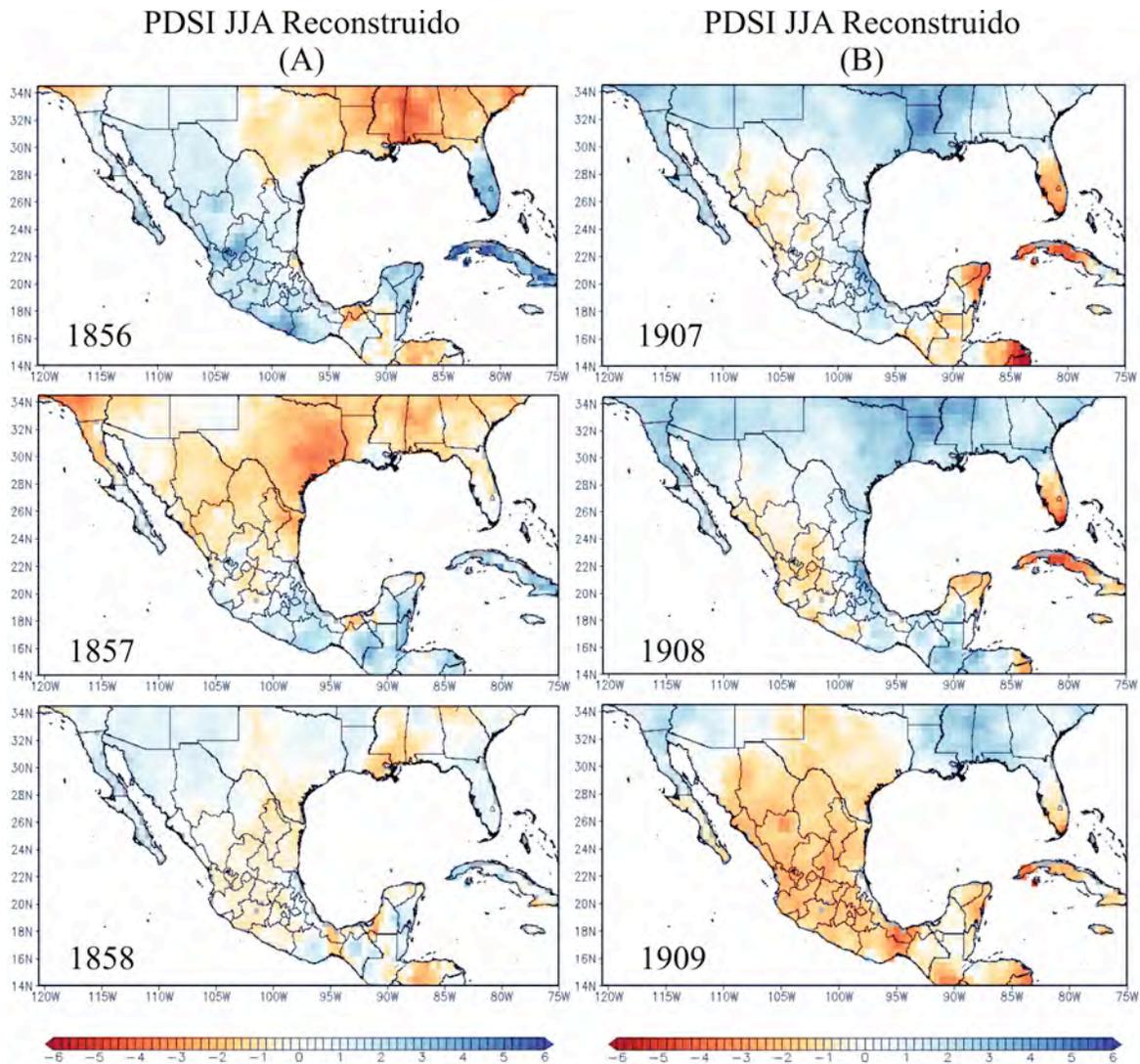


Figura 7.3. Esta imagen muestra los efectos de El Niño y La Niña en el clima del norte y centro de México, variabilidad que modula la frecuencia y sincronía de incendios. Para el año 1856 solo se registró incendio en el centro y en 1857 solo en el norte (A), en 1907 en el norte y 1908 en el centro, efecto de la condición de sequía propiciada por El Niño-La Niña y La Niña-El Niño, respectivamente (Gergis y Fowler, 2009). Para el caso de 1858 y 1909 (A y B), se observa sincronía entre incendios para ambas regiones, atribuido a eventos extremos de El Niño y La Niña, respectivamente (Gergis y Fowler, 2009). Ambos eventos propiciaron condiciones de sequía a nivel nacional, ocasionando incendios en ambas regiones. Los mapas se generaron con base en el MXDA (Stahle *et al.* 2016).

El 38% de sincronía de incendios extensos entre la región norte y centro (fechas resaltas en color rojo; Tabla 7.2), se atribuyen a eventos extremos tanto de El Niño como de La Niña que propiciaron condiciones de sequía que se extendió a todo el país. Así mismo, los

incendios se asociaron históricamente con años cuyos valores de PDO estuvieron significativamente por debajo de la media. La mayoría de los incendios ocurrieron ante condiciones de lluvia por debajo de la media y valores negativos de PDSI, NIÑO 3 y PDO, lo cual indica condición de sequía.

Se ha observado que las fases del PDO pueden afectar la fuerza con que se registren los eventos de El Niño o La Niña. Durante la fase fría de PDO, los efectos de El Niño sobre el clima pueden debilitarse, caso contrario, los efectos de La Niña pueden magnificarse (Gershunov y Barnett, 1998). La sincronía entre La Niña y la fase fría de PDO pudieron haber magnificado los eventos extremos de La Niña, ocasionando que sus efectos (sequía) se extendieran hasta el centro y sur de México. La señal más fuerte para la ocurrencia de incendios está dada por la sincronización en la fase negativa de ambos fenómenos (ENSO y PDO), condición que magnifica la intensidad de las sequías y propicia las condiciones para la ocurrencia de incendios extensos tanto en el norte como en la región centro-sur de México.

Durante los últimos 300 años, se reconstruyeron un total de 111 incendios para la región norte, se determinó una sincronía de 38 (34%) incendios entre la región norte y centro, 31 (82%) incendios se desarrollaron ante condiciones de sequía y de estos 38 incendios sincronizados en total, 30 (79%) se desarrollaron bajo condiciones de sincronía de fase negativa entre ENSO y PDO, sequía extrema a nivel nacional. La figura 7.4, muestra solo algunos ejemplos (seis años) de los 38 años con condiciones de sequía extrema a nivel nacional, condición que explica la ocurrencia de incendios y la sincronía de eventos a

escalas geográficas extensas, sincronización de incendios tanto para el norte como para el centro del país desde finales del siglo XVII hasta mediados del siglo XX (Tabla 7.1).

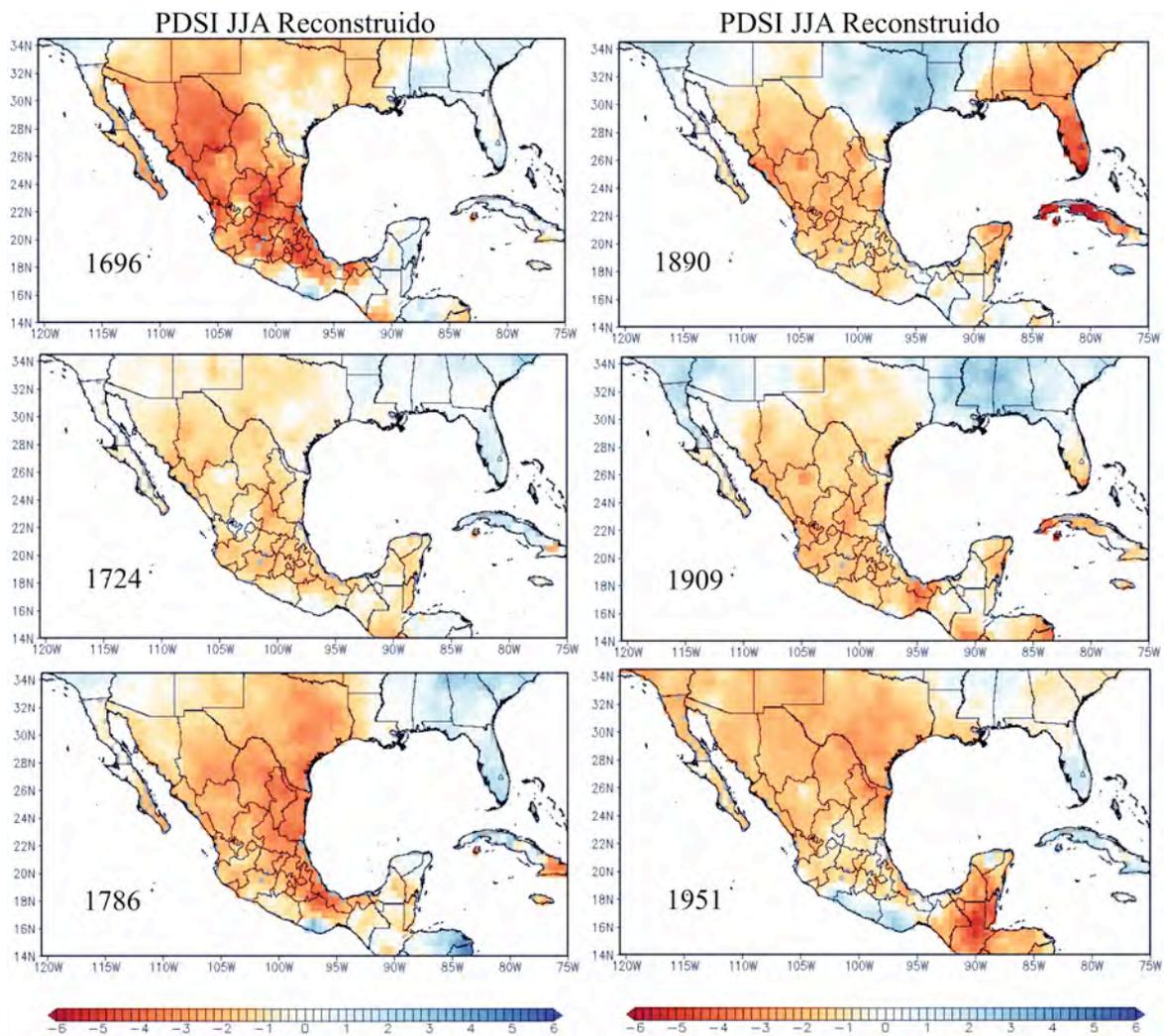


Figura 7.4. Ejemplos de las condiciones extremas de sequía a nivel nacional para seis de los 38 años que registran sincronía de incendios entre la región norte y centro de México. En los seis años se presentó una sincronía en fase negativa de ENSO y PDO. Los mapas se generaron con base en el MXDA (Stahle *et al.* 2016).

Al considerar cada uno de los diferentes estadísticos reconstruidos sobre los regímenes del fuego y el papel que históricamente ha jugado el clima en su frecuencia, con el objetivo de

contar con bases técnicas para la toma de decisiones en el control y manejo del fuego, se recomienda desarrollar estudios adicionales de estructura forestal y determinar cargas de combustibles actuales para cada una de las diferentes áreas de estudio. Tales estudios complementarían y darían mejor soporte técnico-científico a la definición de áreas de mayor riesgo de incendios, elementos necesarios para lograr la conservación a largo plazo de los bosques y sus innumerables beneficios ecológicos, económicos y sociales.

Así mismo, para las áreas con períodos de exclusión extensos del fuego, es importante iniciar con un proceso de medidas de manejo experimentales para el control de los combustibles, incluyendo quemas prescritas. Se podría iniciar con la frecuencia histórica reconstruida para cada área en específico por región de estudio, evaluando el efecto positivo y negativo en la regeneración, desarrollo de árboles jóvenes y adultos. La frecuencia de incendios se podrá reducir o ampliar con base en los resultados observados, dependiendo siempre de las condiciones ecológicas deseables, sin dejar de considerar la variación del clima, importante modulador descendente de la frecuencia histórica de incendios.

Con respecto a los fenómenos atmosféricos de circulación general, es importante, poner especial atención a los pronósticos de incidencia y posibles fases de ENSO en años futuros, fenómeno que ha influido de manera significativa en la modulación de la ocurrencia de incendios durante los últimos 350 años en la región norte y 550 años para el centro de México. Este fenómeno tiene actualmente cierta predictibilidad, lo cual puede representar una ventaja para anticipar labores de prevención de incendios.

Referencias

- Abrams, M. D. and Nowacki, G. J. 1992. Historical variation in fire, oak recruitment, and postlogging accelerated successions in central Pennsylvania. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 119(1): 19-28.
- Agee, J. K. 1993. Alternatives for implementing fire policy. In *Proceedings, Symposium on fire in wilderness and park management*. pp. 107-112.
- Andrews, T. G. 1996. Coral Paleoclimatology Natural recorders of interannual climatic variability in the tropical oceans and seas. World Data Center-A for Paleoclimatology Educational Slide Project. 15 pp.
- Arno, S. F. and Sneek, K. M. 1973. A method for determining fire history in conifer forests of the mountain west. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. GTR-INT-42. 26 pp.
- Arno, S. F. and Sneek, K. M. 1977. *A method for determining fire history in coniferous forests of the mountain west* (p. 28). I. Forest (Ed.). Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.
- Baisan, C. H. and Swetnam, T. W. 1990. Fire history on a desert mountain range: Rincon Mountain Wilderness, Arizona, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 1559–1569.
- Bernal, S. S. y Terrazas, T. S. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Maderas y Bosques* 6(1): 73-86.
- Biondi, F., Gershunov, A. and Cayan, D. R. 2001. North Pacific decadal climate variability since 1661. *Journal of Climate*, 14(1), 5-10.
- Black, B. A., Boehlert, G. W. and Yoklavich, M. M. 2005. Using tree-ring crossdating techniques to validate annual growth increments in long-lived fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(10), 2277-2284.
- Bosch, J. M. and Hewlett, J. D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of hydrology*, 55(1-4), 3-23.
- Bradley, R. S. 1999. *Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary*. Second Edition. Academic Press. USA 613 p.
- Brown, P. M. and Wu, R. 2005. Climate and disturbance forcing of episodic tree recruitment in a southwestern ponderosa pine landscape. *Ecology*, 86(11), 3030-3038.

- Brown, P. M. 2006. Climate effects on fire regimes and tree recruitment in Black Hills ponderosa pine forests. *Ecology*, 87(10), 2500-2510.
- Brown, P. M., Heyerdahl, E. K., Kitchen, S. G. and Weber, M. H. 2008. Climate effects on historical fires (1630–1900) in Utah. *International Journal of Wildland Fire*, 17(1), 28-39.
- Bull, W. B. 2008. *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology*. Blackwell Publishing. Reino Unido. 316 p.
- Bye, R. 1993. The role of humans in the diversification of plants in Mexico. In *Biological diversity of Mexico: Origins and distribution*, eds. T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, J. Fa, pp. 707–731. New York: Oxford University Press.
- Carrasco, N. G., Díaz, C. R., Siebert, L., Hubbard, B., Sheridan, M. F. and Rodríguez, S. R. 2006. Multiple edifice-collapse events in the Eastern Mexican Volcanic Belt: the role of sloping substrate and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(1), 151-176.
- Carrillo, G. R. L., Rodríguez, T. D. A., Tchikoué, H., Monterroso, R. A. I. y Santillan, P. J. 2012. Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia* 37(9): 678-683.
- Cassell, B. A. 2012. Fire history of the Sierra de Manantlán Reserve in western México. Thesis Master of Science. Washington, USA. University of Washington. 96 p.
- Castañeda, B. R. and Lozano, G. M. S. 1998. Palynological analysis refer to finding of *Mammuthus columbi* in the upper Lerma basin, México. American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting. Puerto Vallarta Mexico. 95
- Cavazos, T. and Hastenrath, S. 1990. Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4), 377-386.
- Cerano, P. J. 2008. Variabilidad climática, regímenes de incendios e influencia de patrones circulatorios para el suroeste de Chihuahua. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Dgo. México. 118 p.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Arreola, Á. J. G., Sánchez, C. I. y Valdez, C. R. D. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J. y Fulé, P.Z. 2010. Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la reserva Cerró el Mohinora, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 63-74.

- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I. y Constante, G. V. 2011a. “Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila”, *Rev. Mex. Cienc. For.* vol. 2, núm. 4, pp. 33-46.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Méndez, G. J. y Constante, G. V. 2011b. “Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México”, *Rev. Mex. Cienc. Agric. Pub. Esp.* Núm. 2, pp. 235-249.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Arreola, A. J. G. and Constante, G. V. 2011c. El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE.), 207-215.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L. y Estrada, A. J. 2012. Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7-23. Obtenido de http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal/vol3_no10.pdf
- Cerano, P. J., Villanueva D. J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R. y Guerra, C. V. 2014. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (83), 41-54. DOI: 10.14350/rig.35190
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Fulé, P. Z., Yocom, L., Esquivel, A. G. y Jardel, P. E. 2015. Historia de incendios en un bosque de pino de la sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque* 36(1): 39-50. DOI: 10.4067/S0717-92002015000100004
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Vázquez, S. L., Cervantes, M. R., Esquivel A. G., Guerra, C. V. y Fulé, P. Z. 2016. Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México. *Bosque* 37(2), 389-399.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva, D. J. and Burns, B.T. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Clements, F. E. 1910. *The life history of lodgepole burn forests* (No. 79). US Dept. of Agriculture, Forest Service.
- Cochrane, J. and Daniels, L. D. 2008. Striking a balance: Safe sampling of partial stem crosssections in British Columbia. *BC Journal of Ecosystems and Management* 9(1):38-46.

- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Cornejo, O. E. H. y Valencia M. S. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Cook, E. R. and Holmes, R. L. 1984. Program ARSTAN user's manual. *Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson*, 15.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47: 37-59.
- Cook, E. R. 2000a. Niño 3 index reconstruction. International Tree-Ring Data Bank. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series Number 2000-052. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA.
- Cook, E. R. 2000b. North American drought variability PDSI reconstructions. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series Number 2000-074. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA.
- Corona, E. 1986. Dendrocronologia: principi e applicazioni. In: Dendrocronologia: Principi e Applicazioni. Atti del Seminario a Verona nei giorni 14 e 15 Novembre 1984. Istituto Italiano di Dendrocronologia, Verona, Italy: 7–32.
- Cortes, M. C., Fulé, P. Z., Falk, D. A., Villanueva, D. J. and Yocom, L. L. 2012. Linking old-growth forest composition, structure, fire history, climate and land-use in the mountains of northern México. *Ecosphere* 3(11):126 (1-16).
- Descroix, L., González, B. J. L. y Estrada, A. J. 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Dgo. México. 300 p.
- Descroix, L., Nouvelot, J., Estrada, J. y Gutiérrez, A. 2004. Espacialización de las precipitaciones sobre las dos vertientes de la Sierra Madre Occidental. L. Descroix, J. L. González-Barrios y J. Estrada. (eds.). *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAPIRD. Gómez Palacio, Durango, México*, 133-144.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1937. Decreto que declara Parque Nacional el Cofre de Perote.
- Díaz, C. S. C. 2002. Paleoclimatología del Noroeste Mexicano. 71 p.
- Dieterich, J. H. 1983. Fire history of southwestern mixed conifer: a case study. *Forest Ecology and Management* 6(1), 13-31.
- Dieterich, J. H. and Swetnam, T. W. 1984. Dendrochronology of a fire-scarred ponderosa pine. *Forest Science* 30: 238–247.

- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K.W. and Reyes, S. 1993. The Mexican monsoon. *J. Clim.* 6:1665–1677.
- Drury, S. A. and Veblen, T. T. 2008. Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecology*, 197(2), 299-316.
- Dumbar, R. B. 1998. Coral records of ENSO and decadal ENSO-linked climate variability from the eastern Pacific: a multi-site synthesis from Galápagos to Baja California. American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting. Puerto Vallarta Mexico: 18-20.
- Englehart, P. J. and Douglas, A. V. 2002. "Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and their changes and teleconnectivity", *Atmósfera*, no. 15, pp. 147–164.
- Esau, K. 1965. Anatomía Vegetal, Barcelona, Ediciones Omega, S. A.
- Falk, D. A., Heyerdahl, E. K., Brown, P. M., Swetnam, T. W., Sutherland, E. K., Gedalof, Z. and Brown, T. J. 2010. Fire and climate variation in western North America from fire-scar and tree-ring networks. *PAGES news* 18(2): 70-72.
- Finley, R. B. 1990. Woodrat Ecology and behaviour and the interpretation of paleomiddens. In: Betancourt, J. L., T.R. VanDevender, and P.S. Martin (eds). *Packrat Middens The last 40,000 years of biotic Change*. The University of Arizona Press. Tucson. 28-42.
- Florescano, M. E. y Swan, S. 1995. *Breve historia de la sequía en México*. México: Universidad Veracruzana.
- Fritts, H. C., Mosimann, J. E. and Bottorff, C. P. 1969. A revised computer program for standardizing tree-ring series. *Tree-Ring Bulletin*.
- Fritts, H. C. 1971. Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research*, 1(4), 419-449.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and Climate*. London-New York-San Francisco: Academic Press.
- Fritts, H. C. and Swetnam, T. W. 1989. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in ecological research*, 19, 111-188.
- Fritts, H. C. 2001. *Tree rings and climate*. Caldwell, New Jersey: Blackburn Press.

- Fulé, P. Z. and Covington, W. W. 1997. Fire regimes and forest structure in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, (41), 43-79.
- Fulé, P. Z. and Covington W. W. 1999. Fire regime changes in La Michilía Biosphere Reserve, Durango, Mexico. *Conservation Biology* 13(3): 640-652.
- Fulé, P. Z., Heinlein, T. A., Covington, W. W. and Moore, M. M. 2003. Assessing fire regimes on Grand Canyon landscapes with fire-scar and fire-record data. *International Journal of Wildland Fire*, 12(2), 129-145.
- Fulé, P. Z., Villanueva, D. J. and Ramos, G. M. 2005. Fire regime in a conservation reserve, Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 320–330. DOI: 10.1139/X04-173
- Fulé, P. Z., Ramos, G. M., Cortes, M. C. and Miller, A. M. 2011. Fire regime in a Mexican forest under indigenous resource management. *Ecological Applications* 21:764–775.
- Fulé, P. Z., Yocom, L. L., Cortes, M. C., Falk, D. A., Cerano, P. J. and Villanueva, D. J. 2012. Testing a pyroclimatic hypothesis on the Mexico-United States border. *Ecology* 93:1830–1840.
- García, A. A. y González, E. M. S. 1998. *Pináceas de Durango*. Instituto de Ecología.
- García, A. A. y González, E. M. S. 2003. *Pináceas de Durango*. 2a. ed. Instituto de Ecología, A. C. México.
- García, A. V. y Escobar O. A. 2000. Introducción. En: García Acosta, V. (Coord.). *Estudios históricos sobre desastres naturales en México*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México. 9-17.
- García, A. V., Pérez Z. J. M. y Molina V. A. 2003. *Desastres agrícolas en México. Catálogo histórico. Tomo I. Épocas prehispánica y colonial (958-1822)*. FCE, CIESAS, México, D.F.
- García, M. E. 1987. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros Núm. 6. México, D. F. 155 p.
- Gates, D. M. 1993. *Climate Change and its biological consequences*. Sinauer Associates Inc. USA. 280.
- Gemmell, A. R. 1969. *Developmental Plant Anatomy*. London, Edward Arnold. 60 p.
- Gerez, F. P. 1985. *Uso del suelo durante cuatrocientos años y cambio fisionómico en la zona semi-árida poblana-veracruzana, México*. *Biótica* 10 (2): 123-144.

- Gergis, J. L. and Fowler, A. M. 2009. A history of ENSO events since AD 1525: implications for future climate change. *Climatic Change* 92(3-4): 343-387.
- Gershunov, A. and Barnett, T. P. 1998. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(12), 2715-2725.
- González, E. M. 2003. Indicadores de cambio climático en algunas especies de pináceas de la Sierra Madre Occidental, México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L. 193 p.
- Gordon, J. C. and Larzon, P. R. 1968. *Pl. Physiol.*, Lancaster, 43, 1617-24.
- Greene, K. 1995. *Archaeology: an introduction*. University of Pennsylvania Press. 208 pp.
- Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Stahle, D. W., Faulstich, H. L., Carrillo, C. and Leavitt, S. W. 2013. North American monsoon precipitation reconstructed from tree-ring latewood. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 954-958.
- Grissino-Mayer, H. D. 1993. An update list of species used in tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin*. 53: 17-43.
- Grissino-Mayer, H. D., Baisan, C. H. and Swetnam, T. W. 1994. Fire history and age structure analyses in the mixed conifer and spruce-fir forests of Mount Graham. Final report. Mount Graham Red Squirrel Study Committee. Phoenix, AZ, USA. U.S. Fish and Wildlife Service. 73 p.
- 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.
- Guttman, N. B. 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.
- Heinselman, M. L. 1981. Fire Intensity and Frequency as Factors in the distribution and structure of northern ecosystems. En: Mooney H.A. *et al.* (Eds.). *Regimes and Ecosystems properties*. Unites States Department of Agriculture (USDA). Forest Service. *General Technical Report*, WO-26, pp. 7-57.
- Hernández, A. J. C., Gutiérrez, G. G., Almeida, L. L. y Ordóñez, D. J. A. B. 2005. Análisis dendroclimático de *Pinus hartwegii* en el volcán nevado de Toluca. México. I Simposio Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México. Memorias. Laboratorio de Biotecnología y Ecología Aplicada. LABIOTECA. Xalapa, Veracruz, México. Noviembre 17 y 18. pp: 102-103.
- Heyerdahl, E. K. and Card, V. 2000. Implications of paleorecords for ecosystem management. *Trends in Ecology and Evolution (TREE)* 15(2): 49–50.

- Heyerdahl, E. K. and McKay, S. J. 2001. Condition of live fire-scarred ponderosa pine trees six years after removing partial cross sections. *Tree-Ring Research* 57(2): 131–139.
- Heyerdahl, E. K., Brubaker, L. B. and Agee, J. K. 2001. Spatial controls of historical fire regimes: A multiscale example from the Interior West, USA. *Ecology* 82:660–678.
- Heyerdahl, E. K., Brubaker, L. B. and Agee, J. K. 2002. Annual and decadal climate forcing of historical fire regimes in the interior Pacific Northwest, USA. *The Holocene*, 12(5), 597-604.
- Heyerdahl, E. K. and Alvarado, E. 2003. Influence of climate and land use on historical surface fires in pine-oak forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. In Veblen TT, WL Baker, G Montenegro, TW Swetnam eds. *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas*. New York, USA. Springer-Verlag. p. 196–217.
- Higgins, R. W., Leetmaa, A., Xue, Y. and Barnston, A. 2000. Dominant factors influencing the seasonal predictability of US precipitation and surface air temperature. *Journal of Climate*, 13(22), 3994-4017.
- Hoffmann, O. 1989. De los hacendados a los forestales: Manejo del espacio, dominación y explotación del bosque en la Sierra Madre Oriental (Cofre de Perote). *TRACE* (15). 49 p.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-75.
- Holmes, R. L. 1994. *Dendrochronology program manual. Laboratory of Tree-Ring Research, Tucson.*
- Huante, P., Rincon, E. and Swetnam, T.W. 1991. Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin* 51: 15 – 27.
- Hudson, J. A. and Gilman. 1993. Long term variability in the water balances of the Plynlimon cathments. *Journal of Hydrology*, 143: 355-380.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, MX). 2009. *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC), Software, Jiutepec, Morelos, México.*
- Israde, A. I., Lozano, G. M. S., Vázquez, D. R. and Garduño, M. V. H. 1998. Paleoenvironments and lake level records of Lake Cuitzeo since the last 35,000 yr BP. American Quaternary Association Program and Abstracts of the 15th Biennial Meeting. Puerto Vallarta Mexico. 117.
- Jardel, P. E. 1986. El control de la tierra y la producción forestal. Trabajo presentado en el Tercer Congreso Nacional sobre Problemas Agrarios, México, D.F. 25 p.

- Jardel, J. P. 1991. Perturbaciones naturales y antropogénicas y su influencia en la dinámica sucesional de los bosques de las joyas, Sierra de Manantlán, Jalisco. *Tiempos de Ciencia* 22: 9-26.
- Kaib, J. M. 1998. Fire history in riparian canyon pine-oak forests and the intervening desert grasslands of the southwest borderlands: A dendroecological, historical, and cultural inquiry. M.S. thesis. Tucson: University of Arizona.
- Kitzberger, T., Swetnam, T. W. and Veblen, T. T. 2001. Inter-hemispheric synchrony of forest fires and the El Niño-Southern Oscillation. *Global Ecology and Biogeography*, 10(3), 315-326.
- Kitzberger, T., Brown, P. M., Heyerdahl, E. K., Swetnam, T. W. and Veblen, T. T. 2007. Contingent Pacific–Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(2), 543-548.
- Krawchuk, M. A. and Moritz, M. A. 2011. Constraints on global fire activity vary across a resource gradient. *Ecology* 92: 121–132.
- Landres, P. B., Morgan, P. and Swanson, F. J. 1999. Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. *Ecological Applications* 9(4): 1179–1188.
- Larson, P. R. 1962. Auxin gradients and the regulation of cambial activity. In: *Tree Growth*. Edited by T. T. Kozlowski. New York, Ronald Press.
- Lertzman, K., Fall, J. and Dorner, B. 1998. Three kinds of heterogeneity in fire regimes: at the crossroads of fire history and landscape ecology. *Northwest Science*, 72(4), 23.
- Llamas, C. P. 2013. Régimen histórico de incendios forestales en bosques de coníferas del sur occidente de México. Tesis de Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Autlán, México. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Universidad de Guadalajara. 80 p.
- Lorimer, C. G. and Frelich, L. E. 1989. A method for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 651–663.
- Loyer, J. Y., Estrada, J., Jasso, R. y Moreno, L. (Eds). 1993. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36. INIFAP, CENID-RASPA, ORTSOM. Gómez Palacio, Dgo. México. 367 p.
- Madany, M. H., Swetnam, T. W. and West, N. E. 1982. Notes: Comparison of Two Approaches for Determining Fire Dates From Tree Scars. *Forest Science*, 28(4), 856-861.

- Magaña, R. V. O. 1999. Los impactos de El Niño en México. In *Los Impactos de El Niño en México*. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magaña, R. V. O., Vásquez, J. L., Pérez, J. L. and Pérez, J. B. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 313–330.
- Mantua, N. J. and Hare, S. R. 2002. The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44.
- Margolis, E. Q. and Balmat, J. 2009. Fire history and fire–climate relationships along a fire regime gradient in the Santa Fe Municipal Watershed, NM, USA. *Forest Ecology and Management*, 258(11), 2416-2430.
- Marlon, J. R., Bartlein, P. J., Carcaillet, C., Gavin, D. G., Harrison, S. P., Higuera, P. E., Joos, F., Power, M. J. and Prentice, I. C. 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience* 1:697–702.
- Martin, P. and Fahey, T. 2006. Fire history along environmental gradients in the subtropical pine forests of the Cordillera Central, Dominican Republic. *Journal of Tropical Ecology*, 22(3), 289-302. DOI: 10.1017/S0266467406003178
- Martínez, M. 1963. Las Pináceas Mexicanas. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México 20, D.F. 361 pp.
- MathWorks. 2002. Software matemático. MATLAB Versión 6.5.
- McCabe, G. J. and Dettinger, M. D. 1999. Decadal variations in the strength of ENSO teleconnections with precipitation in the western United States. *International Journal of Climatology*, 19(13), 1399-1410.
- McKenzie, D. 2004. Historia del fuego y su relación con el clima. En: Villers R. L. y López-Blanco J. (Eds.). *Incendios forestales en México: Métodos de evaluación*. Centro de Ciencias Atmósfera, UNAM. México, D.F., pp.13-28.
- Medina, A., Dussart, E. G., Estelrich, H. D. and Morici, E. A. 2000. Reconstrucción de la historia del fuego en un bosque de *Prosopis caldenia* (Burk.) de Arizona, sur de la provincia de San Luis. *Multequina*, 9(9).
- Méndez, G. J., Ramírez, L. A., Cornejo, O. E., Zarate. L. A. y Cavazos, P. T. 2010. Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones geográficas*, (73), 57-70.

- Molina, P. I. M., Cerano, P. J., Rosales, M. S., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Esquivel, A. G. and Cornejo, O. E. 2017. Historical fire frequency (1779-2013) in pine-oak forests in the community of Charcos, Mezquital, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 91-104. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2016.03.017
- Morales, M. J. E. y Aguilar, R. S. H. 2000. Avifauna del parque nacional cofre de perote, Veracruz México. *Foresta Veracruzana*, 2(1), 35-40.
- Morales, M. M. 2005. Programa de manejo forestal para el aprovechamiento persistente de recursos forestales maderables para el tercer ciclo de corta, ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, Puebla. Chignahuapan, Puebla, México. Asesores en Manejo de Recursos Forestales (ASMARF). 107 p.
- Morales, M. J. E., Suárez, D. E., Mestizo, R. L. R., Villa, C. J. T., Enríquez, R. J., Corona, L. C. y González, C. A. 2007. Riqueza, diversidad y distribución de anfibios, reptiles y mamíferos en las áreas naturales protegidas del estado de Veracruz. *Segundo Informe Técnico, Universidad Veracruzana/Conacyt. Xalapa, Veracruz, México.*
- Narave, F. H. 1985. La vegetación del Cofre de Perote, Ver. México. *Biotica* 10: 35-64.
- Naylor, T. H. 1971. Dendrochronology in Oaxaca, Mexico: A preliminary study. *Tree-Ring Bulletin* 31: 25 – 29
- Pausas, J. G. and Fernández, M. S. 2011. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change* 110: 215–226.
- Pavia, E. G., Graef, F. and Reyes, J. 2006. PDO–ENSO effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19(24), 6433-6438.
- Pollet, J. and Omi, P. N. 2002. Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests. *International Journal of Wildland Fire*, 11(1), 1-10.
- Poulos, H. M., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Camp, A. E. and Gatewood, R. G. 2013. Human influences on fire regimes and forest structure in the Chihuahuan Desert Borderlands. *Forest Ecology and Management* 298: 1–11. DOI: org/10.1016/j.foreco.2013.02.014
- Presnall, C. C. 1933. Fire studies in the Mariposa Grove. *Yosemite Nature Notes*, 12(3), 23-24.

- Quezada, R. D. A. 2013. Potencial dendrocronológico de *Pinus patula* (Schl. et Cham.) y reconstrucción de la precipitación para Tlaxcala-Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Bermejillo, Durango, México. Unidad Regional de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. 80 p.
- Ramírez, F. 1983. Situación del Parque Nacional Cofre de Perote, Ver. y su importancia como alternativa de uso de suelo. *Goldberg, AD (comp.), El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva, INIREB, Cuadernos de Divulgación, 9*, 51-56.
- Robinson, W. J. and Evans, R. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*. 40: 59-64.
- Rodríguez, T. D. A. and Pyne, S. J. 1999. Mexican fires of 1998. *International Forest Fire News*, 20, 61-63.
- Rodríguez, T. D. A. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. Revista Chapingo. *Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 145- 151.
- Rodríguez, T. D. A. and Fulé, P.Z. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *Int. J. Wildland Fire*, 12: 23–37.
- Rodríguez, T. D. A. 2014. Incendios de vegetación: su ecología, manejo e historia. Vol. 1. Ed. C. P., ColPos, UACH, ANCF, AMPF, Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl, CONAFOR, CONANP. México. 814 p.
- Rubio, E. A. 2006. Frecuencia de incendios forestales en bosques de *Pinus douglasiana* del ejido Ahuacapán, Jalisco. Tesis de Licenciatura. Autlán, México. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Universidad de Guadalajara. 60 p.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta botánica mexicana*, (14), 3-21.
- Sanderson, S. R. W. 1984. *Land Reform in Mexico: 1910–1980*. New York: Academic Press.
- Santillán, H. M., Cornejo, O. E. H., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Valencia, M. S. y Capó, A. M. A. 2010. Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y bosques*, 16(1), 17-30.
- Sarton, G. 1954. When was tree-ring analysis discovered?. *Isis* 45(4): 383–384.
- Savage, M. and Swetnam, T. W. 1990. Early 19th-Century Fire Decline Following Sheep Pasturing in a Navajo Ponderosa Pine Forest. *Ecology*, 71(6), 2374-2378.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2017. Información Climatológica. <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAP). 2000. Programa nacional de protección contra los incendios forestales. Resultados 1995–2000. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. México, D.F.
- Schulman, E. 1944. Dendrochronology in México. *Tree-Ring Bulletin* 10: 18 – 24.
- Schulman, E. 1954. Longevity under adversity in conifers. *Science* 119:396–399.
- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA. 142 pp.
- Schweingruber, F. H. 1983. Der Jahrring. *Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Haupt, Bern*, 234.
- Schweingruber, F. H. 1987. *Tree Rings*. Kluwer Academic Publishers. 276.
- Schweingruber, F. H. 1996. *Tree rings and environment: dendroecology*. Paul Haupt AG Bern.
- Scott, S. D. 1966. Dendrochronology in México. Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona Press, Tucson. 80 pp.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E. and Stahle, D. W. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22:1–31.
- Serrano, J., Rodríguez, L. y Vargas, Y. 1990. Análisis estadístico de datos dendrocronológicos para el Desierto de los Leones, México, D.F. En: XI Congreso de Botánica: Programas y Resúmenes. Oaxtepec, Morelos. 30 de Septiembre al 5 de Octubre. P. 184
- Show, S. B. and Kotok, E. I. 1924. *The role of fire in the California pine forests*. Washington, DC: US Dept. of Agriculture.
- Skinner, C. N., Burk, J. H., Barbour, M. G., Franco, V. E. and Stephens, S. L. 2008. Influences of climate on fire regimes in montane forests of north-western México. *Journal of Biogeography* 35: 1436-1451.
- Smith, A. P. and Young, T. P. 1987. Tropical alpine plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18(1), 137-158.
- Speer, J. H. 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. 509 p.

- Stahle, D. W., D'Arrigo, P. J., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., Cole, J. E., Dunbar, R. B., Therrell, M. D., Gay, D. A., Morre, M. D., Stokes, M. A., Burns, B. T., Villanueva, D. J. and Thompson, L. G. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152.
- Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D. and Villanueva, D. J. 1999. Tree-ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. 10th Conference of Global Change Studies. Preprint volume, American Meteorological Society, 79th Annual Meeting. January 10 – 15. Dallas, Texas.
- Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., Grissino-Mayer, H. D., Griffin, R. D., Fye, F. K., Therrell, M. D. and Villanueva, D. J. 2009. Cool-and warm-season precipitation reconstructions over western New Mexico. *Journal of Climate*, 22(13), 3729-3750.
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Villanueva, D. J., Heim Jr, R. R., Fye, F. K., Cerano, P. J., Acuña, S. R. and Cleaveland, M. K. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics* 39(6): 1431-1446. DOI: 10.1007/s00382-011-1205-z
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Burns, J. N., Griffin, R. D., Cook, B. I., Acuña, S. R., Torbenson, M. C. A. and Sjezner, P. 2016. The Mexican Drought Atlas: Tree-Ring Reconstructions of the Soil Moisture Balance During the Late Pre-Hispanic, Colonial, and Modern Eras. *Quaternary Science Reviews* 149: 34-60.
- Stednick, J. D. 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of hydrology*, 176(1-4), 79-95.
- Stephens, S. L., Skinner, C. N. and Gill, S. J. 2003. Dendrochronologybased fire history of Jeffrey pine-mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Martir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research* 33:1090-1101. DOI: 10.1139/X03-031
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. 1996. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago. 73 p.
- Suzan, H. y Franco, M. 1981. Estudios dendrocronológicos en México en poblaciones de *Pinus hartwegii*. En: Memorias del VII Congreso Mexicano de Botánica. Pp. 277 – 278.
- Suzan, H. y González, F. 1984. Estudios autoecológicos-dendrocronológicos de *Pinus nelsonii*. En S. Lavin (ed.) Informe 1984, Desarrollo Tecnológico y Científico. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Pp. 127 – 140

- Suzan, H. 1985. Estudios autoecológico-dendrocronológicos en *Pinus nelsonii*. En: J. Flores (ed.) Memorias del primer simposium nacional de pinos piñoneros. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Pp. 137 – 149.
- Swanson, F. J., Lones, J. A., Wallin, D. O. and Cissel, J. H. 1994. Natural variability-implications for ecosystem management. In: Jensen, M.E. and Bourgeron, P.S. tech., eds., Volume II: 467 Ecosystem management: principles and applications. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-318. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 89–103.
- Swetnam, T. W., Thompson, M. A. and Sutherland, E. K. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. USDA Forest Service, Agriculture Handbook 639. 39 p.
- Swetnam, T. W. and Betancourt, J. L. 1990. Fire southern oscillation relations in the southwestern United-States. *Science* 249: 1017–1020.
- Swetnam, T. W. and Baisan, C. H. 1996. Fire histories of montane forests in the Madrean Borderlands. *UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE FOREST SERVICE GENERAL TECHNICAL REPORT RM*, 15-36.
- Swetnam, T. W. and Betancourt, J. L. 1998. Mesoscale disturbance and ecological response to decadal climatic variability in the American Southwest. *Journal of Climate* 11, 3128–3147. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<3128:MDAERT>2.0.CO;2
- Swetnam, T. W., Allen, C. D. and Betancourt, J. L. 1999. Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological applications*, 9(4), 1189-1206.
- Swetnam, T. W., Baisan, C. H. and Kaib, J. M. 2001. Forest fire histories of the sky islands of La Frontera. *Changing Plant Life of La Frontera: Observations on Vegetation in the United States/Mexico Borderlands*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 95-119.
- Swetnam, T. W. and Baisan, C. H. 2003. Tree-ring reconstructions of fire and climate history in the Sierra Nevada and southwestern United States. In Veblen TT, WL Baker, G Montenegro, TW Swetnam eds. Fire and climatic change in temperate ecosystems of the western Americas. New York, USA. Springer-Verlag. p. 158–195.
- Swetnam, T. W. and Anderson, R. S. 2008. Fire climatology in the western United States: introduction to special issue. *International Journal of Wildland Fire*, 17(1): 1-7.
- Thompson, G. D. and Wilson, P. N. 1994. Ejido reforms in Mexico: Conceptual issues and potential outcomes. *Land Economics* 70:448–465.

- Tiedemann, A. R., Klemmedson, J. O. and Bull, E. L. 2000. Solution of forest health problems with prescribed fire: are forest productivity and wildlife at risk? *For. Ecol. Manage.* 127: 1–18.
- Tomazello, F. M., Botosso, P. C. and Lisi, C. S. 2001. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. *Indicadores ambientais: conceitos e aplicações. São Paulo: Educ*, 117-143.
- Torelli, N., Bufar, K. and Rovié, D. 1986. Some wood anatomical, physiological and silvicultural aspects of silver fir dieback in Slovenia (NW Yugoslavia). *IAWA Bulletin new series* 7(4): 343-351.
- Trenberth, K. E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(7), 988-993.
- Trenberth, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78(12): 2771-2777. DOI: 10.1175/1520-0477
- Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D. A., Pak, E. W., Mahoney, R. and El Saleous, N. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), 4485-4498.
- Van Devender, T. R. 1990. Late Quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and Mexico. In: Betancourt JL, TR Van Devender and PS Martín. *Packrat Middens. The last 40,000 years of biotic change.* The University of Arizona Press. Tucson 134-165.
- Veblen, T. T., Kitzberger, T. and Donnegan, J. J. 2000. Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado Front Range. *Ecological Applications*, 10(4), 1178-1195.
- Venugopal, N. and Krishnamurthy, K. V. 1987. Seasonal production of secondary xylem in the twig of certain tropical trees. *IAWA Bulletin new series* 8(1): 31-40.
- Villanueva, D. J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano, P. J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. and Cornejo, O. E. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117-131.
- Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Cerano, P. J., Estrada, A. J. y Sánchez, C. I. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México*, 34(105), 37-69.

- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Estrada, A. J., Constante, G. V. y Cortés, B. E. N. 2012. Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca Lerma Chapala en Guanajuato, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(4), 05-26.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Vázquez, S. L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., Franco, R. O. y Ruíz, C. J. A. 2015. Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 86: 5-14.
- Villanueva, D. J., Gómez, A., Cerano, P. J., Rosales, S., Estrada, J., Castruita, L. U. y Martínez, A. R. 2017. La variabilidad del caudal del río Acaponeta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua VIII (3): 55-74*
- Welsh, C. 2007. The relationship between climate and outbreak dynamics of *Dothistroma* needle blight in northwest British Columbia, Canada. M.S. Thesis. University of Northern British Columbia. 187 pp.
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. and Swetnam, T. W. 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science* 313: 940–943.
- White, P. S. and Pickett, S. T. 1985. Natural disturbance and patch dynamics. *Unknown Journal*, 3-13.
- White, M. A. and Vankat, J. L. 1993. Middle and high elevation coniferous forest communities of the North Rim region of Grand Canyon National Park, Arizona, USA. *Plant Ecology*, 109(2), 161-174.
- Wolter, K. and Timlin, M. S. 2011. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology*, 31(7), 1074-1087.
- Wright, C. S. 1996. *Fire history of the Teanaway River drainage, Washington*.
- Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Falk, D. A. and Cornejo, O. E. 2010. El Niño Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 91(6): 1660-1671.
- Yocom, L. L. and 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
- Zavala, J. M. L. 1977. San Antonio Tenextepec. In Siete ensayos sobre la hacienda mexicana 1780-1880 (E. Semo coord.) Colección científica 5567-98. INAH, México.

ANEXO 1

Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz Clave: COP (Cofre de Perote)
Longitud de la cronología 1436 – 2013 (578 Años)
Índice de ancho de anillo de *Pinus hartwegii*

Cronología Estándar

111792108376105181 93912 85041 68698 69847 78592114149130064 65458 72535 83339
131163122071137588100268 90130 88161 98452136338135316 95712 86438 88603 88051
104781 98441109089 73359124961126494 98271 84481125173117472 89988107652108038
107511 87028100658111757123541152967109901111302103287 97202 74515 79316108694
110584103331 91643 91111 97399 69482114357108766 78396 82502 92557112986110652
68275 79139 84629 85110122053 98208 95983 64480 87980 60451 59450 83793 96994
91798 91141101770115560122596148621112001 98318111419112639 98383120421105141
101773 62748 64860 74498119459123056 89008 89506 99860112349105613117526 94063
108965117188112757 65201 90260 73857 95174 94119 89838110246106821 99860 98856
82757 95409 94919 86400 78363 92985 91782104193 87959 81074 85506 59974100814
118087127428 93822 95666 84135 85446 72813 83143 81907 80333102085107015103592
99080 83113100940116894119372122070126939 83748 94726 89580106426 99053105781
105413107595108544112902121294119970117035103905103150119708112812100969 93293
90653 93063 82695 76371 96230107949101690102829104363102700101270100446106284
112956112899 76947 77528 86491 88914 78327 88964 69133 69490 88428 87496 92517
115435104341103390101380111594 94709 89869 99151125507120168113591 78399 85142
87152 76791 66997 68348 76173 95927 99938123612113122113738100986104102111272
101107102512103107105738135644113766105670100088 86140 75896 74089 69616 85188
97010 97741109735111826114083103898103663 99577104541118499110842116590119762
110449106756120598121195123308124131 93393 96984 90137112753109691105492 96318
103831 91481 64080 55867 61235 73332 86936 91483 94186 87569105924105261 88209
93753 80368 97300125946127830115727103740 96948 91389 85065 95387 88773107892
122929123053 76219 89294 90035 89386 92640 86538 91803 94752 95797 94015102567
101641110656108907126577122267110777 93447 91468 88859 98039100010 90862 85336
75609 88263 95710 92168106948113183 98635109713 98127 90496 78725 71652 85881
91578 84614 86924 85630 97727 90881 84112 78851 81602 94619100278110108109278
103957109771 94070 85402 95188107572 87910118934107852117216109536 81492 81601
93062 94863 97292105975124996116619 90727104525123152123475123589107522124446
134360104753106900112285113497 92289 94727 91553106859 91770 89755101634102865
108400127215115235 82834 70163 70118 63667 56427 72538 68281 80396 87646114059
109339 96774111160109819 91757 97176104058105843119684129279119033107199103696
105234118183114641113258105011 95776114130 93789104319 87882 87984 98506 89519
94416 92880 88122 80310 80383 81267 81828 90973 93505 92131 90943 94847 90488
100963 91220 89101 92239106419 88154 97955 96179 96973 90480 89199105764119199
106911 89084 73525 74782 86622 90504 91634104068117968110227103085100190108143
98893110149110146115387 96596 85011 98173 90687101840129720129291106068115857
105915111478140419124214 95991128015108996102296 87148 99723 88713 96058105793
98259101646 90266 69178 91061 81422 89610 80291 95199 84902 96498 80605 78299
85448 75153 63641 84208 89245 85556 89112 89003 85469 99104122818120260 89154
89275104937100891109430107639118158143052133637118226103732 94597 86218 67180
94129 94488104529 80912 74198 86714100939111680 86338101434120383112829114181
123165112679 88576 96615 83511114008 74766 93647 89844123125 71715 77982 93320
97216111589 87966 75906 99566117064124172 90572102272103172102312100627141942
116653115365107342 69922 79789 85963 89641108779 96634 77567 74262114357105797
93897103334115424 87312103117 94822

Cronología Residual

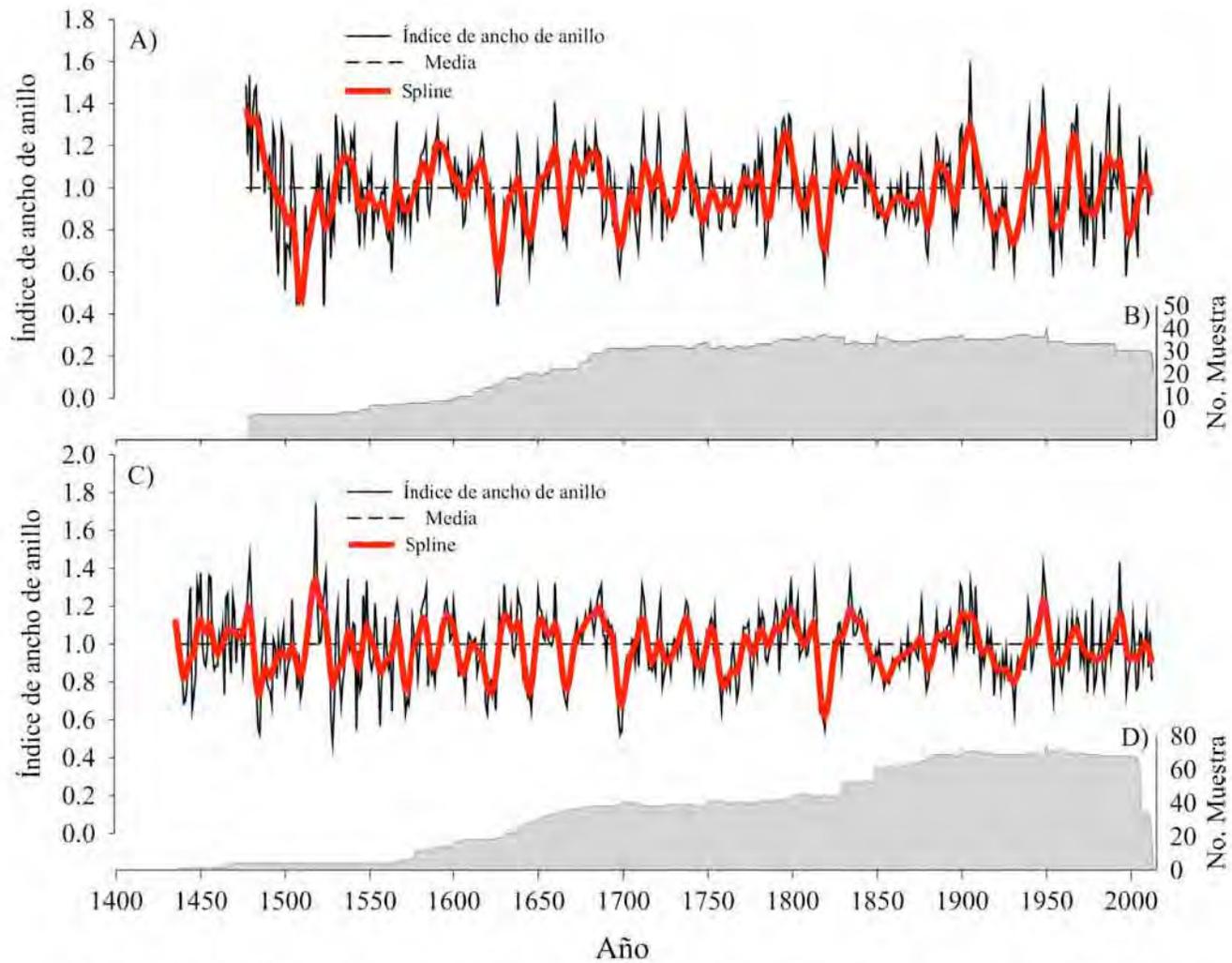
577 Años 1437 = Año inicial

100378 99562 90517 89493 79327 91855 99800129268120425 44738 96798102676142977
100585122434 74310 90156 95247106908137629110228 71335 72148 98905100091114842
101795114023 73575 95496117236100376 91725131366105680 86785111643104535106593
89899107284110148124759138875 95816 90959 98814 94573 78803 90766115090106792
89558 89610 96734102545 75197119842100785 75259 93775100120122521102119 63411
94839 97197 91796126988 83899 97563 67096104406 68010 81065105950108736 96715
100527104128114859109524137001101483 92641107267102550 92421119191 97445103535
63801 85171 94869133315113747 76734 91303102889112566 90267118290 87112109657
111493106603 56131104789 79865106038 99708 80986115521103385103087104435 84155
103349 98643 87033 85312108427 97627108570 86873 87504 95318 72191119991125929
118008 80911106945 86123 96161 82627 98315 92498 91088112914102855 97495 96832
78651107768114798110305109169116186 83418107910 90856102774101960109558106162
106669102605107484116739105889101048 93482 98801113823103146 90678 91527 93452
100202 87242 86709110398110271 98271101689105560100965 99967102017103960109107
109213 69950 93121100565100422 91929101579 75964 90031108008 96201100989123245
95739102484 98112112206 86870 91549105198124485105125 99504 68839 97101 95977
85615 83515 88984 96361111614103790124011 99420106693 93769102579108532 92839
100666102012102349132523 94202 96317 95946 85008 83956 89569 87168104395106891
100826111063107286107487 96061101716 98294105383114891102797110015110389 97804
101194115637106833110195109016 78365 98571 94821117561101805 99154 93936105563
88667 70519 79324 91980 97860104498 99849101237 92368114073102482 86416100966
84649108690127436110121 97648 92311 94559 93997 90419105538 91530113765118029
107739 61863101723 96753 97105 98371 91274 99774100290 99362 96301105969 99160
111023102733120547105823 96656 89620 95396 94857105252101477 93169 92425 84890
102869103204 94131110312109748 90710110669 93726 92307 83684 84971104550100081
88885 97348 93290106412 92884 89705 88769 93697106580102674110258102715 98706
107945 89035 88826104942110232 83744125107 96817112705 95288 76109 92645102998
99168 98757107625121015102133 82166110472117200110842108437 92056119366121517
84249103814108269104729 83886 98467 96272112103 86569 93964106646102721106631
123003 97579 71646 81965 90805 82000 82273 99366 87237 99547100418121850103154
91305111714102186 85340101350106458104276115909115807 99881 96674100972101017
114207101986104447 97544 92455116414 85761107908 87723 93230105079 90673101297
96882 92423 88701 92346 96070 93363103302 99120 97425 96476100255 95976106599
92565 94373 99619111318 85820105755 96479 99944 92857 95283112019117242 96885
82130 79015 91157102845100062 99205109705116793 99323 97669 97732108276 94796
110570104242108857 88299 85425105861 92018107702129065113232 88253110332 94843
106941133097101003 78689128474 92436 96476 85455106026 91336102524107715 93821
103148 90276 76291108046 89761 99487 87007105615 89104106459 84068 88689 99034
84620 79245105170 98937 94498 97627 96007 91861107647124765106799 77468 95479
111347 97276109255102091113266130067109180 96350 93173 93205 88984 74850112862
99654110160 80724 83276102249110233110550 79703107616120710101651105756116534
98160 79975103850 87222121608 69042107513 94389128518 59538 94721105712102666
113266 82839 83720113136116332114309 76336107003102648 99866 99314140544 93204
103855 99774 66668 95455 98219 99455115815 93531 78695 87989133236 98689 90027
107096113237 77765111634 95047

Cronología Arstan

578 Años 1436 = Año inicial

111792107227103760 92701 85253 70762 74873 85206120676132434 63576 75643 88529
136315121677135024 94652 87050 87725 99779137501132009 89925 66296 79329 88085
107922106397117738 83878 86132109182105709 95041128485122225 99693111464111194
113094 97504105835113537132621157822129399108035103480 96595 76825 77306101910
107901 94147 86211 88725 95997 72872104085103158 77093 80471 88778116002111414
70040 77438 84093 82557116857 93690 93898 63552 83236 58274 56830 80876 97628
95338 97819102862116521119120148105129423109730112918110053 98260118181108004
108184 68554 66907 75648119172124882 91185 86184 94864109583 95833115869 96329
107525115864115817 65318 84645 70947 89163 93414 77161102256104695105814107811
88692 96781 96774 85159 76693 94890 94660105469 90049 81724 84704 63307 98679
125162132622 99858106863 90110 90416 77061 84992 83781 81667102266104172 99918
96784 76783 94284111478116971119026127237 99237107467 95193 99981101950110691
112372113855110652113671124680120223112794100913 99332113435110950 97038 89806
87531 92960 83153 76924 96995108526103223103560107628105395103101103818106177
112694116586 79583 81262 89682 94430 88693 95012 73067 74387 93132 92212 96466
121192108048107158102269113524 94725 88485 98510123619118843110448 74907 82527
85829 77385 70380 71781 79971 99981103779126206114641115196102595104086110905
99172100185102120103580134602114299104622 98631 84213 74786 74925 72604 88483
100202100944111611114030115635105142104702101025105979118364113463117834120747
109854106918119655118249120794121093 90617 93121 90826112232108909104329 96450
103502 90701 65118 59064 68203 79393 92529 95510 98629 91571109178107813 90954
95711 82158 98328126465125492112454 99544 94295 90683 85008 96830 89689107776
122546120833 73963 86601 88971 90699 92969 87190 92334 95838 96944 94526102789
100781111477109398126005120927108811 94738 92339 90407 99680101292 93919 88893
78440 90347 97597 92735106092113286 98426109755 99391 91954 79011 72780 88740
93541 85133 88713 86735 98708 92134 85136 80136 82160 96218100477110535108834
103837110174 94944 85889 96746108342 88589118480107550117090105214 79137 80528
91688 94340 95470104994123915116023 91472105518120405122693121617104612122044
134320104182106243111895111637 90645 93034 92225107587 90975 88722100096102777
108244127791113720 79614 70124 73453 66582 62863 77796 74340 84644 91499116913
112977 98841111041108599 90335 95736103981106589119736127270115720105804104343
103540116263111432111087103983 94768113375 93529104150 90134 87500 97819 89406
95144 94061 88974 82297 82064 85653 85030 94608 95988 95095 93627 96553 93974
103099 94365 91100 94450108095 90521100249 96624 97983 91685 90454106475121003
109084 87406 71700 74720 88162 93186 95248106945120827111420104302100230108410
99681110384110274114824 96909 83630 96353 89900101836130131130732106102113877
102903108627138108123136 92127123901106318100145 85539 97627 89957 96691105793
97185101514 91155 71154 91292 84703 90603 81550 94899 86141 98410 83144 78899
86778 76941 65852 85337 90420 88934 91200 90895 86573 99848124677121132 89741
89521105260100331109447107578117668140328132603115286102051 94396 85729 66562
93441 95844107746 85223 74693 87550103002112293 86843 99975120695113671113696
124489112384 87167 96396 85129112970 76575 93908 90850123204 73015 79048 93542
98915112636 90178 78016100367116545123919 90228101328103419101852100389140770
116883113660107708 71145 78696 85846 91234110724 99760 78555 75534119026109740
95684104590115903 87002104085 97419



Cronologías estándar de índice de ancho de anillo de *Pinus hartwegii* para el Parque Nacional Cofre de Perote en Veracruz. A) Cronología para Barranca Honda y B) indica el tamaño de muestra en cada segmento de la serie. C) Corresponde a la cronología Valle la Teta y D) indica el tamaño de muestra. La cronología compuesta comprende el período de 1436-2013 (578 años).

ANEXO 2

BOSQUE

CONTENIDO

OPINIONES

- Bannister JR, PJ Donoso, R Mujica. **La silvicultura como herramienta para la restauración de bosques templados.** 229
- Castillo SP. **Introducción intencional de fauna exótica y futuros invasores: ¿Seguimos tropezando con la misma piedra una y otra vez?** 237

ARTÍCULOS

- Sandoval V, C Ramírez, C San Martín, O Vidal, M Álvarez, A Marticorena, Y Pérez. **Diversidad vegetal en las cuencas de los ríos Baker y Pascua (Aisén, Patagonia Chilena).** 243
- Hernández Zaragoza O, J López Upton, JJ Vargas Hernández, M Jiménez Casas. **Variación clonal de la fenología reproductiva en un huerto semi-llero de *Pinus patula*.** 255
- Kratz D, I Wendling, CA Stuepp, R de Oliveira Fragoso. **Clasificación de sustratos basados en parámetros morfológicos de *Piptadenia gonoacantha*.** 265
- Bulfé N, L Faustino, M Pinazo, C Graciano, ME Fernández. **Bases fisiológicas del crecimiento diferencial en la fase inicial del desarrollo de dos progenies de *Pinus taeda* bajo condiciones de campo, en Misiones Argentina.** 273
- Wendling I, CA Stuepp, KC Zuffellato-Ribas. **Injertación de *Araucaria angustifolia*: técnica, ambientes y fuente de material de propagación.** 285
- Valois-Cuesta H, C Martínez-Ruiz. **Vulnerabilidad de los bosques naturales en el Chocó biogeográfico colombiano: actividad minera y conservación de la biodiversidad.** 295
- Barroetaveña C, VN Bassani, JI Monges, M Rajchenberg. **Comportamiento a campo de *Pinus ponderosa* inoculado con hongos ectomicorrícicos plantado en pastizales de estepa en Patagonia Andina, Argentina.** 307
- Acheritobehere LM, IA Orellana. **Influencia del viento y de la vegetación nativa en la distribución de la regeneración de *Pseudotsuga menziesii* en Patagonia, Argentina.** 317
- Boydak M, S Caliskan. **Efectos de choque térmico sobre la germinación de semillas de pino rojo de Turquía (*Pinus brutia*).** 327
- Duyar A, E Makineci. **Variaciones estacionales y altitudinales de artrópodos del suelo en bosques de *Abies nordmanniana* subsp. *bornmuelleriana*.** 335
- Espinosa A, S Aravena, H Sandoval, N Ojeda, MA Herrera. **Hábitat de alimentación del carpintero negro (*Campephilus magellanicus*) en ecosistemas forestales del parque nacional Nahuelbuta, región de La Araucanía, Chile.** 347
- García V, J Simonetti, P Becerra. **Lluvia de semillas, depredación de semillas y germinación de especies nativas en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile centro-sur: efecto de la distancia a bosque nativo y presencia de sotobosque.** 359
- Sigala Rodríguez JA, MA González Tagle, JA Prieto Ruíz, E Basave Villalobos, J Jiménez Pérez. **Relaciones alométricas para predecir biomasa en plantas de *Pinus pseudostrobus* cultivadas en diferentes sistemas de producción in vitro.** 369
- Andrade Amaral L, I Marinho Pereira, M Aparecida Pereira da Silva, E Mendonça Machado, AP Dias Gonzaga, RA Pfeilsticker de Kneg. **Viabilidad del uso de la tierra vegetal ferruginosa yugo en la restauración de un vertedero de residuos.** 379
- Cerano-Paredes J, J Villanueva-Díaz, L Vázquez-Selem, R Cervantes-Martínez, G Esquivel-Arriaga, V Guerra-de la Cruz, PZ Fulé. **Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México.** 389
- Carpenedo Aimi S, M Machado Araujo, E Benítez León, G Gomez de Oliveira, F da Silva Cunha. **Volumen de contenedores y dosis de fertilizante de liberación controlada en el crecimiento de plantas de *Cabralea canjerana* producidas in vitro.** 401
- Rivas Y, MI Canseco, H Knicker, P Etcheverría, R Godoy, F Matus, E Valenzuela, R Gallardo. **Variación en el contenido de glomalina relacionada a las proteínas del suelo, después de un incendio forestal en un Andisol en bosques de *Araucaria araucana* del centro-sur de Chile.** 409
- Shaheen H, B Azad, A Mushtaq, R Waqar, A Khan. **Patrón de consumo de leña y sus impactos en la estructura del bosque en Cachemira, Himalaya.** 419
- Keten A, V Beskardes, E Makineci, M Kumbasli, JT Anderson. **La abundancia de *Apodemus* spp. varía con la edad del rodal de encina originado de monte bajo, Tracia, Turquía.** 425
- NOTAS
- Arturi M. **Evaluación del muestreo por recuento angular de Bitterlich en distintas distribuciones espaciales y diamétricas generadas por simulación.** 431

Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México

Historical fire regime and its relationship with climate in a forest of *Pinus hartwegii* to the north of Puebla State, Mexico

Julián Cerano-Paredes **, José Villanueva-Díaz ^b, Lorenzo Vázquez-Selem ^a,
Rosalinda Cervantes-Martínez ^b, Gerardo Esquivel-Arriaga ^b, Vidal Guerra-de la Cruz ^c, Pete Z Fulé ^d

* Autor de correspondencia: ^a Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D. F. México, C.P. 04510, cerano.julian@gmail.com

^b INIFAP CENID-RASPA, km 6,5 Margen Derecha del Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango. México.

^c INIFAP-Tlaxcala, km 2,5 Carretera Tlaxcala-Chiautempan, Tlaxcala, México.

^d Northern Arizona University, School of Forestry, Flagstaff, Arizona, USA.

SUMMARY

The *Pinus hartwegii* forest in cooperative lands Rinconada, Chignahuapan, represents the region of highest risk of forest fires in the state of Puebla. In order to reconstruct the history of fires and determine their historical association with climate, we collected 43 cross-sections with fire scars and analyzed them by dendrochronological techniques. Two hundred and thirty five fire scars were dated in 40 cross-sections. The fire history was reconstructed for the period 1876-2011 (136 years). Most (91.7 %) fires occurred during spring and 8.3 % in summer. The Mean Fire Interval (MFI) and Weibull Median Probability Interval (WMPI) for all the scars were 5.6 and 5.0 years, respectively. Large or extensive fires occurred when fire scars were recorded in 25 % of samples or more with MFI and WMPI values of 9.2 and 8.5 years, respectively. On this site, fires have continued to the present, but after 1988 a significant drop in fire frequency was noted. A positive association between lower precipitation (drought) and fire occurrence was determined. Similarly, negative values of NIÑO 3 and PDSI (dry conditions), associated with drought conditions, have a positive influence on the modulation of the historical frequency of fires in this region of central Mexico.

Key words: fire scars, precipitation, El Niño Southern Oscillation, Palmer drought severity index.

RESUMEN

El bosque de *Pinus hartwegii* en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, representa la región de mayor incidencia de incendios forestales en el estado de Puebla. Con el objetivo de reconstruir la historia del fuego y determinar su asociación histórica con el clima, se tomaron 43 muestras con cicatrices de incendios y se analizaron con base en técnicas dendrocronológicas; de 40 muestras, se lograron datar 235 cicatrices de incendios. Se reconstruyó la historia del fuego para el período 1876-2011 (136 años). El 91,7 % de los incendios se registró en la estación de primavera y el 8,3 % en verano. El intervalo medio de incendios (MFI, por sus siglas en inglés) y el intervalo de la mediana de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés) al considerar todas las cicatrices fue de 5,6 y 5,0 años, respectivamente; mientras que para los incendios más grandes o extensos cuyas cicatrices se registraron en el 25 % de las muestras o más, los valores de MFI y WMPI fueron de 9,2 y 8,5 años, respectivamente. La presencia de incendios fue continua hasta la primera década del siglo XXI; sin embargo, posterior a 1988 se observó una disminución en su frecuencia. Se determinó una relación positiva entre la disminución de la precipitación (sequía) y la ocurrencia de incendios. De igual manera, valores negativos de NIÑO 3 y PDSI, asociados a condiciones de sequía, han influido positivamente en la modulación de la frecuencia histórica de incendios en esta región del centro de México.

Palabras clave: cicatrices de fuego, precipitación, El Niño Oscilación del Sur, índice de severidad de sequía de Palmer.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática es un factor determinante en la variación histórica de la actividad de incendios forestales (Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005). En las últimas décadas el incremento de la actividad de incendios se ha

atribuido al cambio climático global y se pronostica un aumento alrededor del mundo (Westerling *et al.* 2006). La fuerte vinculación entre el fuego y el clima, ponen en manifiesto la relevancia de conocer la relación clima-incendios en distintos tipos de ecosistemas forestales para el diseño de prácticas de manejo del fuego y de adaptación al cambio climático.

Los incendios forestales requieren biomasa, condiciones atmosféricas propicias para la propagación del fuego (es decir, ambiente seco, caliente y vientos fuertes) y una fuente de ignición (Krawchuk y Moritz 2011). El clima puede afectar estos tres factores en conjunto de diferentes maneras y en múltiples escalas de tiempo. Los regímenes del fuego en los ecosistemas han cambiado a través de la historia, especialmente en relación con los cambios en el clima y las actividades humanas (Pausas y Fernández-Muñoz 2011).

Para la parte norte de México, se han desarrollado diversos estudios de reconstrucción de la historia del fuego, los cuales han permitido determinar la influencia de la variabilidad climática en la frecuencia de incendios (Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005, Cerano-Paredes *et al.* 2010, Yocom *et al.* 2010). Así mismo, se han generado diferentes estudios con resultados que ponen de manifiesto el efecto de la actividad humana en el cambio de los regímenes históricos del fuego durante diferentes períodos del siglo XX (Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005, Cerano-Paredes *et al.* 2010, Yocom *et al.* 2010).

Para el centro del país, este tipo de estudios son escasos; actualmente solo se ha publicado una cronología de incendios para los pinares de alta montaña del Pico de Orizaba, Veracruz/Puebla (Yocom y Fulé 2012) y un trabajo más en los bosques de *Pinus douglasiana* Martínez en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manatlán, Jalisco (Cerano-Paredes *et al.* 2015).

La comunidad de *Pinus hartwegii* Lindley presenta un régimen de incendios superficiales, frecuentes y de baja intensidad, se estima que la frecuencia promedio de incendios en estas comunidades no es superior a los 10 años, y probablemente la media está en torno a cinco años (Rodríguez-Trejo 2001). A la fecha no se ha generado una red de investigaciones fundamentada en técnicas dendrocronológicas para estudiar el régimen de fuego en este ecosistema, uno de los primeros trabajos para este tipo de bosque en el Pico de Orizaba, reporta regímenes de 3 a 9 años (Yocom y Fulé 2012).

Para generar mayor conocimiento sobre los regímenes históricos de fuego en los bosques del centro de México, que permita evaluar el comportamiento de esta perturbación y seleccionar las estrategias más apropiadas para su manejo, se consideró el bosque de *P. hartwegii* enclavado en la Sierra Norte de Puebla, en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, región de mayor incidencia de incendios forestales en el estado de Puebla (Carrillo *et al.* 2012). Ante esto se plantearon los siguientes objetivos: 1) reconstruir la historia del fuego, 2) determinar si en las últimas décadas existe un cambio en la frecuencia de incendios y 3) analizar la relación entre las condiciones de clima (sequías) y la frecuencia histórica de incendios.

Se plantearon las siguientes hipótesis: 1) los regímenes del fuego han cambiado en las últimas décadas del siglo XX y este cambio está asociado principalmente a la influencia humana y 2) las condiciones extremas del clima,

tales como sequías, han influido históricamente en la frecuencia de incendios.

MÉTODOS

Área de estudio. Se localiza en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, al norte del estado de Puebla, en los límites con el estado de Tlaxcala, entre los 19° 42' 06'' - 19° 42' 30'' N y 98° 13' 42'' - 98° 14' 06'' O (figura 1). El bosque de *P. hartwegii* en esta zona se distribuye de 2.800 a 3.000 m s.n.m.

El clima es del tipo *Cbw*, templado con verano fresco y régimen de lluvias de verano (García 1987), temperaturas promedio mensuales que varían de 10 °C la mínima en los meses más fríos (invierno) a 16 °C en los meses más cálidos (verano), con máximas entre 20 °C y 24 °C. La precipitación promedio anual es de 710 mm, con el mayor porcentaje presentándose en el verano y una mínima cantidad en las estaciones de invierno-primavera (figura 2), registros promedio (1961-2000) de la estación El Rosario, localizada a tres kilómetros del área de estudio y a 2.700 m s.n.m. (IMTA 2009). La estación meteorológica de referencia (El Rosario) representa el límite inferior de la distribución del bosque de *P. hartwegii*, la temperatura media en el límite superior (3.000 m s.n.m.) debe ser alrededor dos grados inferior.

La zona presenta una cubierta vegetal propia del clima templado frío. Las especies arbóreas más importantes, tanto por su abundancia como por su valor económico son los géneros de pino (*Pinus patula* Schlecht *et Cham*, *P. teocote* Schiede ex Schltdl, *P. hartwegii*), oyamel (*Abies religiosa* (H.B.K) Schlecht *et Cham*), encino (*Quercus* spp.), aile (*Alnus* sp.) y madroño (*Arbutus xalapensis* Kunth). En la parte baja de la zona boscosa, domina un bosque de coníferas con una mezcla de especies de *P. patula*, *P. teocote*, *Quercus* spp. y *Arbutus xalapensis*; mientras que en la parte alta (2.900-3.000 m s.n.m) se presenta un bosque con dominancia de *P. hartwegii* y *A. religiosa* asociados con *P. patula*, *Arbutus xalapensis*, *Quercus* spp. y *Alnus* sp.

Métodos de campo. En la parte alta de la zona boscosa en una superficie aproximada de 70 ha y un gradiente de 2.900-3.000 m s.n.m., se seleccionaron de forma dirigida árboles de *P. hartwegii* con cicatrices de incendios. Se removieron secciones parciales de árboles vivos, muertos en pie, caídos y tocones, con una motosierra (figura 3). Se consideraron los individuos con el mayor número de cicatrices (registros de incendios), lo mejor preservados en el caso de arbolado muerto y lo más longevos posible.

Métodos de laboratorio. En el laboratorio, las muestras fueron montadas y pulidas con lijas de grano 40 a 1.200 para lograr una superficie uniforme y apreciar de manera clara el xilema bajo microscopio (figura 3B). Las muestras se fecharon con base en una cronología maestra de anillo total de *P. patula* generada para la región (Quezada 2013), que presentó una correlación entre series de 0,61

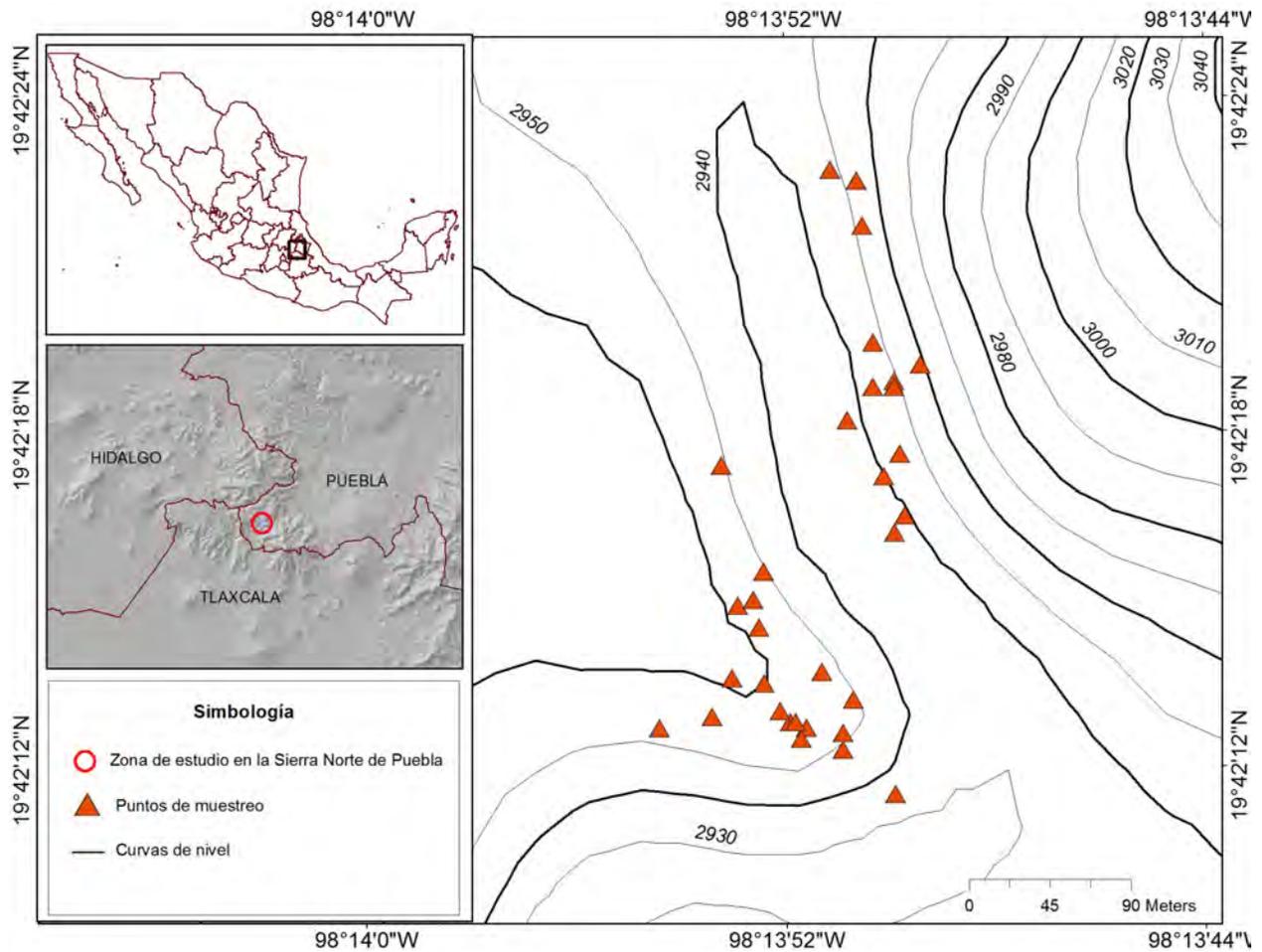


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio, bosque de *Pinus hartwegii* en el ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, Puebla. Los triángulos representan los diferentes puntos muestreados.

Geographical location of the study area, *Pinus hartwegii* forest in the cooperative lands Rinconada, municipality of Chignahuapan, Puebla. The triangles represent different points sampled.

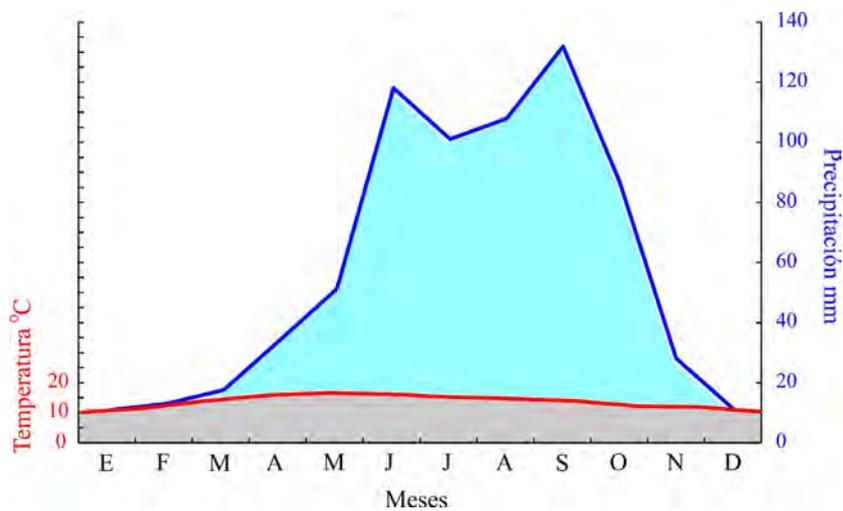


Figura 2. Climograma de la precipitación y temperatura media mensual del período 1961-2000 para la estación meteorológica El Rosario. El área muestra un régimen de lluvias de verano y una escasa precipitación durante el período invierno-primavera (IMTA 2009).

Climograph, monthly precipitation and average temperature for the period 1961-2000 for the weather station El Rosario. The area shows a summer rainfall and low rainfall during the winter-spring period (IMTA 2009).



Figura 3. (A) Bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla. (B) Ejemplar tomado de un tocón que muestra evidencia de registros de incendios (seis cicatrices). Este tipo de muestras permiten extender en el tiempo la historia de incendios y (C) es una sección parcial de un árbol vivo de *Pinus hartwegii* posterior a su preparación y fechado. La muestra presenta registros históricos de ocho cicatrices de incendios.

(A) *Pinus hartwegii* forest in the north of Puebla State. (B) Specimen taken from a stump showing evidence of fire logs (six scars). Such samples allow you to extend in time the fire history and (C) is a partial section of a live tree *Pinus hartwegii* after their preparation and dated. The sample presents historical records of eight fire-scars.

($P < 0,01$; $n = 97$), una longitud de 107 años y explica el 61 % ($P < 0,001$) de la variabilidad de la precipitación invierno-primavera. Se determinó el año exacto de formación de cada uno de los crecimientos anuales, mediante la comparación de los patrones de crecimiento (Stokes y Smiley 1968).

Después del fechado, el ancho de anillo de las muestras se midió con un sistema de medición Velmex de precisión 0,001 mm. La calidad del fechado se verificó con el programa COFECHA (Holmes 1983). Las cicatrices de los incendios se emplearon como evidencia de incendios, identificados como una discontinuidad en las células a lo largo del límite del anillo de crecimiento, donde el cambium murió, seguido por una supresión y deformación de los crecimientos (Dieterich y Swetnam 1984).

La estación de ocurrencia de los incendios se estimó con base en la posición relativa de cada una de las cicatrices de incendio en el anillo anual, considerando las siguientes categorías: EE (inicio de la madera temprana), ME (mitad de la madera temprana), LE (final de la madera temprana), L (madera tardía) y D (dormancia o límite del anillo) (Dieterich y Swetnam 1984). Las cicatrices determinadas en la estación de dormancia se asignaron al inicio de la madera temprana del siguiente año (incendios de primavera) (Heyerdahl y Alvarado 2003, Swetnam y Baisan 2003, Yocom y Fulé 2012). Las diferentes categorías se agruparon en dos períodos: 1) primavera (D + EE) y 2) verano (ME + LE + L) (Grissino-Mayer 2001).

Análisis de datos. La base de datos de historia del fuego se analizó con el programa FHX2, versión 3.2 (Grissino-Mayer 2001). El análisis se corrió a partir del primer año con un adecuado tamaño de muestra (1902), definido por el primer año de incendio registrado en el 10 % o más del número total de muestras (Grissino-Mayer *et al.* 1994) y finalizó en el año 2011.

Los intervalos medios de frecuencia y recurrencia de incendios se analizaron estadísticamente con tres diferentes filtros: (1) todas las cicatrices de incendio, (2) cicatrices presentes en ≥ 10 % de las muestras y (3) cicatrices de registradas en ≥ 25 % del total de las muestras. El filtro de 25 %, fue utilizado como un estimador de la frecuencia de incendios relativamente más extensos e intensos (Swetnam y Baisan 2003).

Para cada uno de los filtros, se determinaron los siguientes estadísticos descriptivos: intervalo medio de frecuencia de incendios (MFI, por sus siglas en inglés), número de intervalos, intervalo mínimo y máximo, y el intervalo mediana de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés). Esta última es una medida de distribución central, empleada para modelar la distribución asimétrica de los intervalos de incendios y para expresar en términos probabilísticos los intervalos de recurrencia (Grissino-Mayer *et al.* 1994).

Relación clima-incendios. Para analizar las condiciones climáticas y su relación con la frecuencia de incendios, se

empleó el análisis de sobreposición de época (SEA, por sus siglas en inglés) del programa FHX2 versión 3.2 (Grissino-Mayer 2001). Como proxy del clima, se emplearon tres variables: 1) una reconstrucción de precipitación local (invierno-primavera) generada con base en anillos de crecimiento de *Pinus patula* para el período 1905-2011 (Quezada 2013), 2) el índice invernal (diciembre-febrero) NIÑO 3 de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Cook 2000a) y 3) el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) (Cook 2000b). Cada una de estas tres variables se analizó por separado con la reconstrucción de la historia del fuego empleando la rutina SEA, comparando las condiciones durante el año del incendio, cinco años previos, y dos años posteriores al mismo. Para evaluar la significancia estadística del análisis SEA, los intervalos de confianza (95, 99 y 99,9 %) se calcularon utilizando la distribución bootstrapped de los datos climáticos con 1.000 repeticiones. Finalmente, se utilizó el Atlas de Sequía para México (MXDA, por sus siglas en inglés) (Stahle *et al.* 2016) para analizar las condiciones climáticas de años donde los incendios afectaron la mayoría de los árboles del sitio.

RESULTADOS

Se colectaron un total de 43 muestras con cicatrices de incendios (25 de árboles vivos y 18 de muertos) y se logró fechar 235 cicatrices al año exacto de su formación

correspondientes a 40 muestras (93 %); se descartaron tres muestras (7 %), cuyo grado de deterioro impidió su fechado. El mayor número de cicatrices se observó en el año 1970 (39), el 98 % de los árboles registraron este evento que representó el incendio más extenso de la zona durante el siglo XX (figura 4).

Estacionalidad de los incendios. La posición de la cicatriz del incendio dentro del anillo de crecimiento que define la estación del año en que se registró el incendio fue determinada para el 92,2 % de las muestras; la posición de la cicatriz más común fue al inicio de la madera temprana (91,7 %), y la menos común en la madera tardía (0 %). El 91,7 % de los incendios se registraron en primavera (estación seca) y el 8,3 % en verano (cuadro 1).

Frecuencia de incendios. Se logró reconstruir la historia del fuego para los últimos 136 años que comprende el período de 1876 a 2011. El incendio más antiguo se dató en el año 1890 y la cicatriz más reciente ocurrió en el año 2003 (figura 4). Para todas las cicatrices de incendios, se determinó un MFI de 5,6 años y un WMPI de 5,0 años. Al considerar las cicatrices registradas en el 10 % las muestras o más, se determinó un MFI y un WMPI de 7,2 y 6,1 años, respectivamente (cuadro 2). Para los incendios más grandes o extensos definidos por las cicatrices datadas en el 25 % de las muestras o más, los valores de MFI y WMPI fueron de 9,2 y 8,5 años, respectivamente (cuadro 2).

Cuadro 1. Determinación de la estacionalidad de las cicatrices de incendios.

Determination of the seasonality of the fire scars.

Sitio CHIG	Total	Estación determinada	Estación no determinada	D	EE	ME	LE	L	Incendios primavera ^A	Incendios verano ^B
Número cicatrices	234	216	18	0	198	17	1	0	198	18
Porcentaje	100	92,3	7,7	0	91,7	7,9	0,5	0	91,7	8,3

Nota: La definición de la estacionalidad de los incendios para esta región del centro de México, fue con base en la metodología de Grissino-Mayer (2001). ^ADormancia + inicio de madera temprana (D+EE). ^BMitad de la madera temprana + final de la madera temprana + madera tardía (ME+LE+L).

Cuadro 2. Intervalos de frecuencia de los incendios para el bosque de *P. hartwegii* del ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla. Período de análisis 1902-2011.

Fire frequency intervals in a forest of *P. hartwegii* in the cooperative lands Rinconada, Chignahuapan, Puebla.

Categoría de análisis	Número de intervalos	Intervalo medio de frecuencia	Mínimo	Máximo	Intervalo de la mediana de la probabilidad de Weibull
Todas las cicatrices	18	5,6	2	19	5,0
10 % cicatrices	14	7,2	2	19	6,1
25 % cicatrices	11	9,2	2	19	8,5

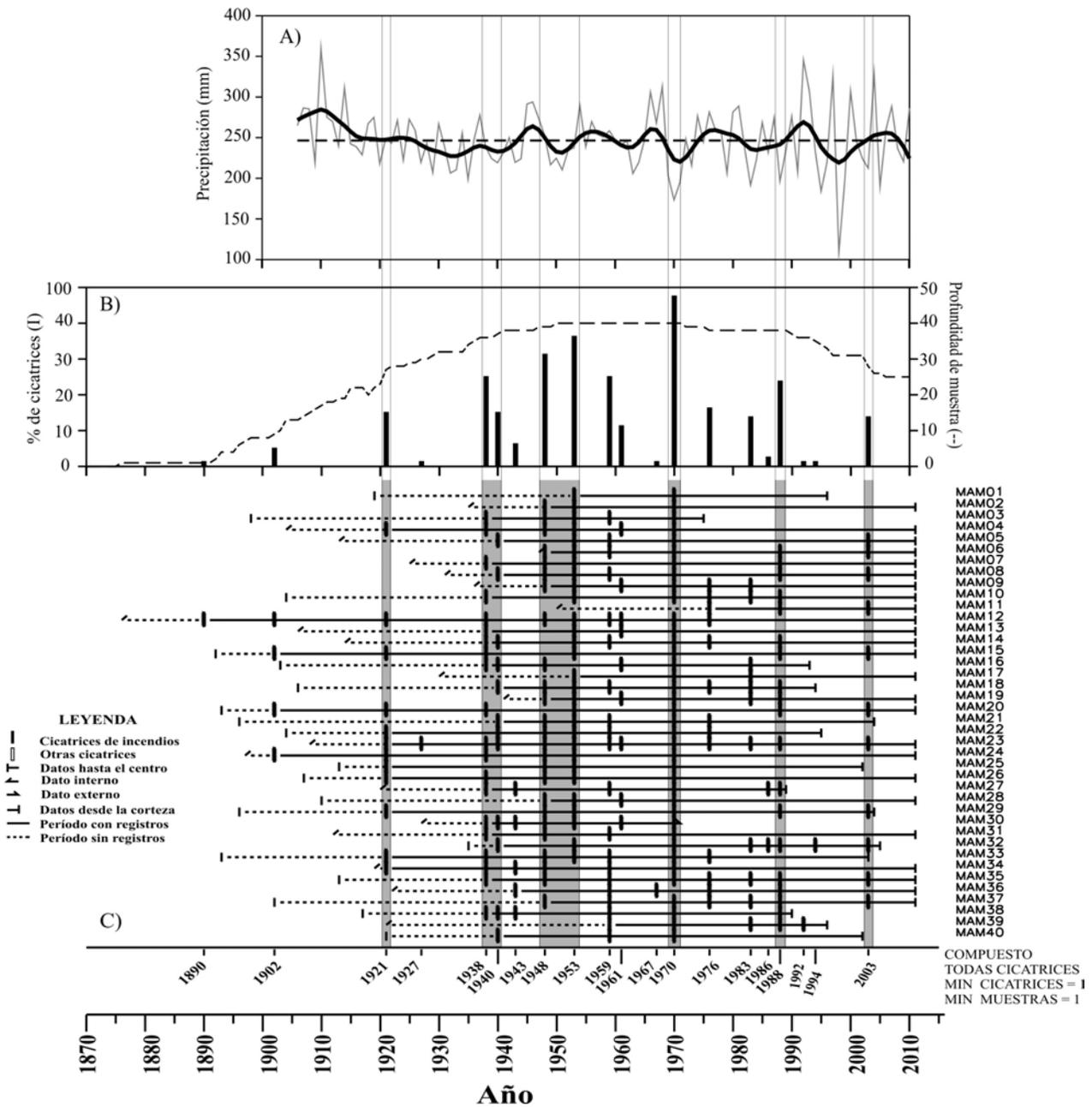


Figura 4. Historia del fuego en un bosque de *Pinus hartwegii* del ejido Rinconada, Chignahuapan, Puebla. (A) Indica la variabilidad de la precipitación para esta región en el último siglo (Quezada 2013), (B) muestra el número de eventos reconstruidos (20), porcentaje cicatrices por año y número de muestras por período y en (C) las líneas horizontales representan la longitud de cada uno de los árboles, punteadas antes del primer registro de incendio y sólidas para el período con registros. Las barras verticales en color negro representan las cicatrices de los incendios y, a medida que la línea se torna continua, indica mayor cantidad de árboles afectados y superficie. Los años en los que se registraron incendios se muestran en el eje secundario de las X.

Fire history in a forest of *Pinus hartwegii* cooperative lands Rinconada, Chignahuapan, Puebla. (A) Indicates the variability of precipitation for this region in the last century (Quezada 2013), (B) shows the number of reconstructed events (20), scars percentage per year and number of samples per period and (C) horizontal lines represent the length of each of the trees, dotted before the first record of fire and sound for the period with records. The vertical bars in black represent the scars of fires and, as the line becomes continuous, it indicates superior amount of affected trees and/or surface. The years in which fires were reported are shown in the secondary X-axis.

Relación clima-incendios. El análisis de relación clima-incendios SEA, indica que los incendios reconstruidos en el bosque de *P. hartwegii* se registraron durante años con valores de precipitación por debajo de la media y valores negativos de NIÑO 3 y PDSI (figura 5). En contraste, no se observaron incendios durante años con valores de precipitación por arriba de la media, ni valores positivos de PDSI y NIÑO 3, años que representan condiciones de mayor precipitación (figura 5). Las condiciones climáticas

de NIÑO 3 y PDSI, 1 y 2 años previos al incendio, respectivamente, presentaron valores positivos (condiciones húmedas) de manera significativa ($P < 0,01$) (figura 5B y C).

La mayoría de los incendios reconstruidos para el período 1890-2011, se registraron ante condiciones de lluvia por debajo de la media (15 de 20 incendios; 75 %) (figura 6). Así mismo, más de la mitad de los incendios ocurrieron ante eventos NIÑO 3 (10 de 14 incendios, 71,4 %) y PDSI (8 de 14 incendios, 57,1 %) con valores negativos, condiciones de sequía para el centro de México (figura 6).

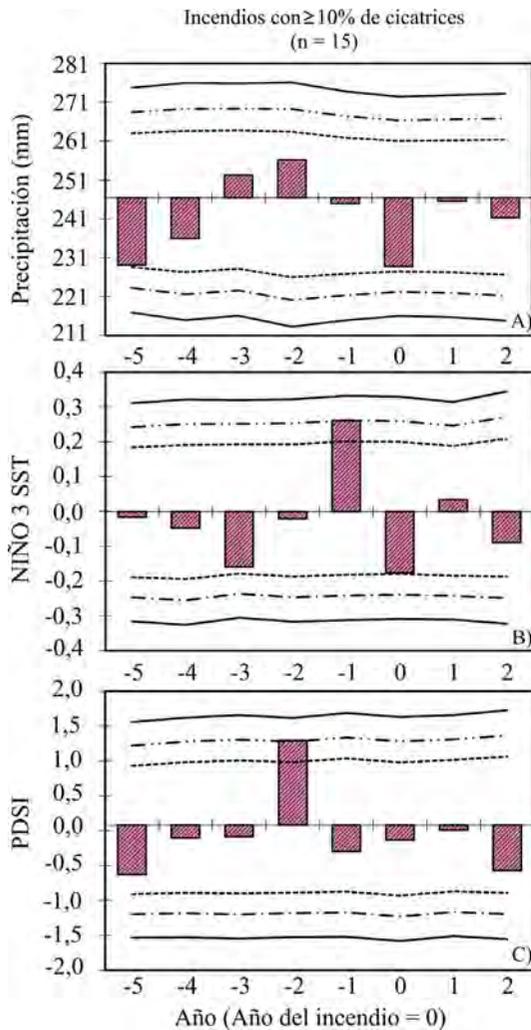


Figura 5. Análisis de sobreposición de época: muestra la relación entre la ocurrencia del incendio con el clima regional (reconstrucción de precipitación) (A), índices de NIÑO 3 (B) y PDSI (C), para todos los incendios registrados en ≥ 10 % de las muestras. El año del incendio está indicado por el 0, condiciones cinco años previos al incendio (valores negativos) y dos años posteriores al incendio (valores positivos). Las tres líneas superiores e inferiores representan los intervalos de confianza al 95 %, 99 % y 99,9 %.

Superposed Epoch Analysis showing the relationship between the occurrences of fire with the regional climate (precipitation reconstruction) (A), NIÑO 3 (B) and PDSI (C) indices for all fires in ≥ 10 % of the samples. The year of the fire is indicated by 0, conditions five years before the fire (negative values) and two years after the fire (positive values). The upper and lower three lines represent confidence intervals 95 %, 99 % and 99.9 %.

DISCUSIÓN

La reconstrucción de la variabilidad de la precipitación para esta región, muestra el año de 1970 como el segundo evento de sequía más intenso del siglo XX, solo superado por el año 1998 (Quezada 2013). Así mismo, registros climáticos observados del período 1961-2000 muestran este mismo comportamiento (IMTA 2009). La extensión y severidad de este evento, se puede atribuir a dos aspectos: uno, al intervalo de tiempo previo libre de incendios (9 años), condición que favoreció la acumulación de combustible tanto en cantidad como en continuidad, y dos, al efecto climático. Trenberth (1997) reporta un período de influencia del ENSO en su fase cálida El Niño de 19 meses, que se extiende de finales de 1968 a marzo de 1970, condición que representa sequía para el centro y sur de México (Magaña *et al.* 2003). Las condiciones de sequía un año previo al incendio (1970) como ocurrió en 1969 (figura 7), aunado al período libre de incendios que favoreció la acumulación de combustible, crearon el ambiente propicio para el desarrollo del incendio más extenso de los últimos 136 años. Situación similar se ha registrado para el norte de México, donde se han reconstruido incendios de alta intensidad, los cuales se han asociado a una elevada acumulación de combustible tras varios años libres de fuego y una posterior condición de sequía (Skinner *et al.* 2008).

Estacionalidad de los incendios. En el área de estudio las máximas temperaturas y la precipitación mínima se registran durante la estación de primavera (IMTA 2009) (figura 2), situación a la que se atribuye el elevado porcentaje de incendios en primavera (91,7 %). Los incendios en los bosques de *P. hartwegii* se registran en enero y continúa hasta mayo o junio (Rodríguez-Trejo 2001), lo cual se relaciona con el período seco de primavera.

Estudios desarrollados para el norte de México (Stephens *et al.* 2003, Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005, Cerano-Paredes *et al.* 2010) y para la región centro del país (Cerano-Paredes *et al.* 2015), reportan resultados similares sobre la estacionalidad de los incendios, coincidiendo un mayor número de cicatrices de incendios al inicio de la estación de crecimiento (madera temprana).

Frecuencia de incendios. Los regímenes reconstruidos corroboran lo reportado por Rodríguez-Trejo (2001) quien

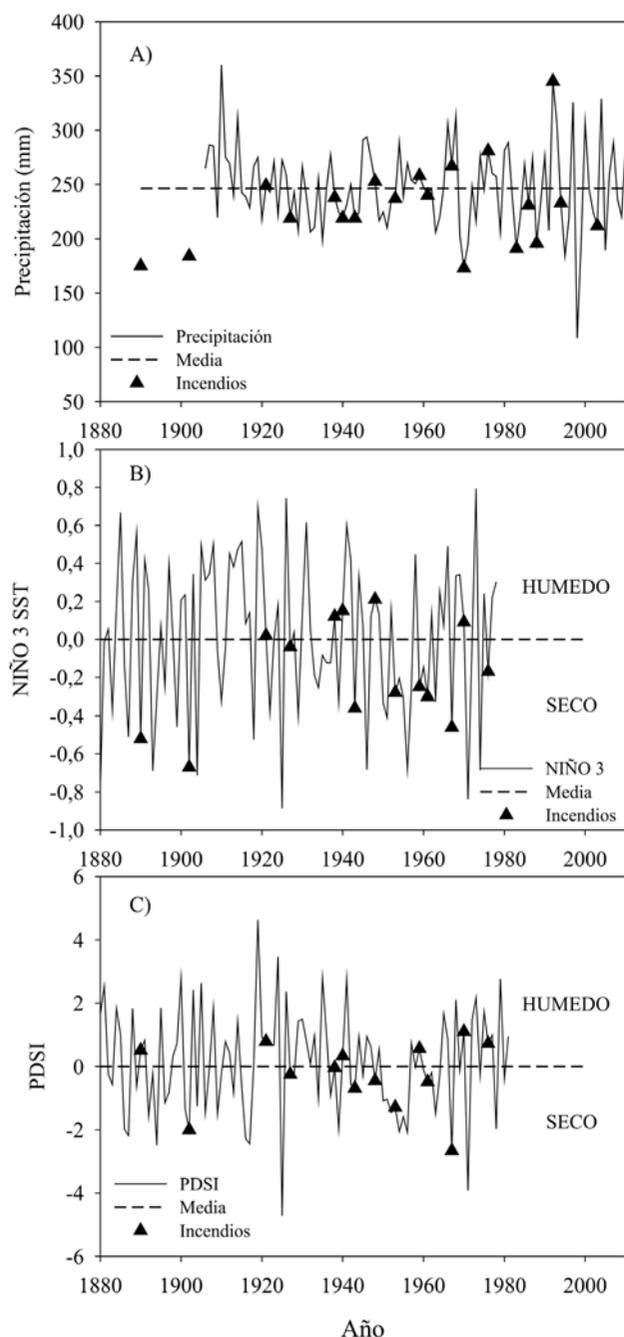


Figura 6. Condición anual del clima durante años de incendio (triángulos). Los tres diferentes gráficos de precipitación (A), NIÑO 3 (B) y PDSI (C) representan la reconstrucción de la variabilidad climática con base en anillos de crecimiento. (A) Muestra que la mayoría de los incendios reconstruidos para el periodo 1890-2011, se registraron ante condiciones de lluvia por debajo de la media y (B y C) que más de la mitad de los incendios ocurrieron ante eventos de NIÑO 3 y PDSI con valores negativos, condiciones de sequía.

Annual climate condition during fire years (triangles). The three different graphics precipitation (A), NIÑO 3 (B) and PDSI (C) represent the reconstruction of climate variability based on growth rings. (A) Shows that most fires reconstructed for the period 1890-2011 were recorded in conditions of precipitation below average and (B and C) that over half of fires events occurred in NIÑO 3 and PDSI with negative values, drought conditions.

indica que la frecuencia de incendios en los bosques de *P. hartwegii* no superan los 10 años, y presentan un promedio de cinco años, aproximadamente. Así mismo, se reafirman los regimenes reconstruidos con base en técnicas dendrocronológicas para los bosques de *P. hartwegii* del Pico de Orizaba en el centro de México por Yocom y Fulé (2012).

De un total 20 incendios reconstruidos durante los últimos 136 años, 14 (70 %) presentan alta sincronía (figura 4), lo que indica la ocurrencia de eventos extensos (Fulé y Covington 1999, Swetnam y Baisan 2003). De finales del siglo XIX a principios del siglo XXI los incendios han sido frecuentes, trabajos desarrollados para el centro de México, han reconstruido una incidencia continua del fuego hasta los primeros años del siglo actual (Yocom y Fulé 2012, Cerano-Paredes *et al.* 2015). A diferencia de la zona centro del país, para la región norte, se ha documentado una exclusión del fuego a partir de 1930 (Yocom *et al.* 2010) o 1950 (Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005, Skinner *et al.* 2008).

Aunque existe una incidencia ininterrumpida del fuego para esta región, se ha detectado una disminución en su frecuencia posterior al año 1988. Durante el periodo de 1988 a 2003 (15 años), sólo se registraron dos incendios, en 1992 y 1994, registrados por un solo individuo, eventos muy localizados (figura 4). El año 1998 representa una de las temporadas de incendios más severas para el país, sin embargo; no existe evidencia de daños en el área. Esta disminución de la frecuencia de incendios en este periodo puede estar relacionada con una marcada influencia humana en el régimen local de incendios, lo cual soportaría nuestra primera hipótesis. El ejido presenta registros de aprovechamiento maderable regulado a partir de 1985, el cual también implica un control mayor en la ocurrencia de incendios (Morales 2005). Posterior al año 2003 (intervalo de 8 años), no se registró evidencia de incendios. Al considerar todas las cicatrices de incendios ocurridas durante el periodo 1988-2003, se estimó un MFI de 4,6 años, similar a los últimos 100 años; sin embargo, los incendios de mediana (10 %) y alta (25 %) intensidad indican un MFI de 15 años, superiores al MFI histórico (9,2 años). Es importante considerar, que la amplitud en los intervalos de la frecuencia de incendios propician un incremento en la acumulación de combustibles (hojas, pastos, arbustos y ramas), tanto en cantidad como en continuidad (Skinner *et al.* 2008), lo que puede favorecer la presencia de incendios más severos, en particular, cuando esto coincida con un año de sequía. Se recomienda desarrollar estudios que determinen las cargas de combustibles actuales que soporten la definición de áreas de mayor riesgo de incendios.

La información generada en este estudio resulta esencial para los encargados de manejo del bosque en esta región, quienes deberán reducir el peligro de incendios severos. El conocimiento de la historia del fuego fundamenta el diseño de estrategias para ejecutar acciones de manejo del fuego. El cambio en la frecuencia de incendios en las últi-

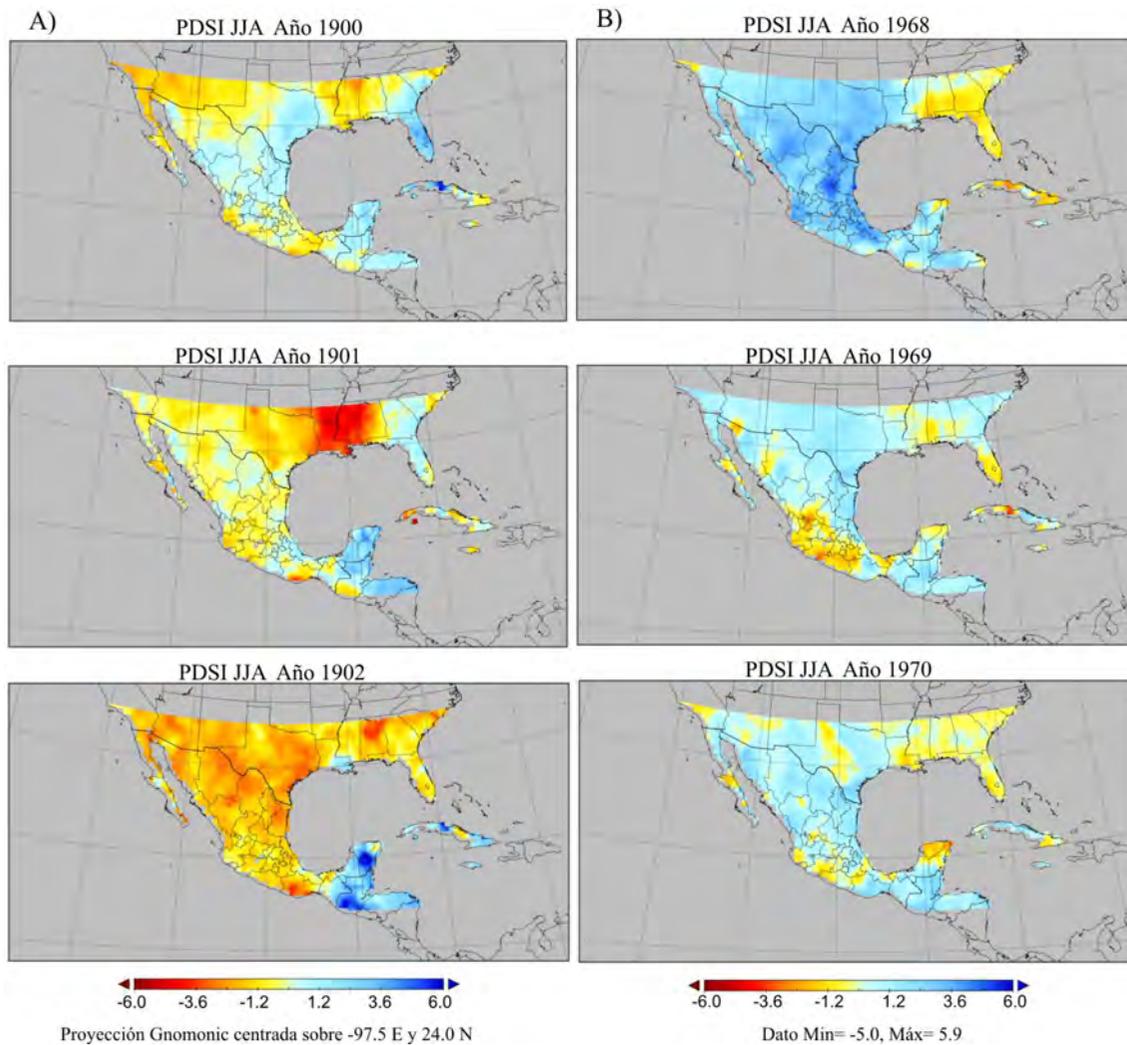


Figura 7. Mapas de sequía desarrollados utilizando el Atlas de Sequía para México (MXDA). Los mapas muestran las condiciones climáticas dominantes para dos años previos a los incendios (A) 1902 y (B) 1970. Ambos incendios son considerados extensos y afectaron el 50 % y 95 % del arbolado del sitio, respectivamente.

Drought maps developed using Drought Atlas of Mexico (MXDA). The maps show the prevailing climatic conditions for two years prior to the fire (A) 1902 and (B) 1970. Both fires are considered extensive and affected 50 % and 95 % woodland site, respectively.

mas décadas obedece posiblemente a una tendencia debido a una mayor efectividad en el control de incendios, por lo tanto, se debe mantener la frecuencia de incendios dentro de la amplitud de su variación histórica, con el objetivo de obtener beneficios ecológicos, reducir el riesgo de incendios severos y garantizar la permanencia de estos bosques.

Relación clima-incendios. El fenómeno ENSO, es un mecanismo de forzamiento climático que afecta a la precipitación y ocurrencia de incendios forestales en muchas partes del mundo (Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005, Skinner *et al.* 2008). En el sur de Estados Unidos y norte de México, los eventos cálidos (El Niño) se asocian con condiciones invernales húmedas y menor cantidad de incendios; a su vez, eventos fríos (La Niña) tienden a fa-

vorecer inviernos secos y mayor ocurrencia de incendios (Heyerdahl y Alvarado 2003, Fulé *et al.* 2005). Un estudio reciente en la Sierra Madre Oriental, reporta un cambio temporal en la influencia de ENSO sobre los incendios, antes de 1830 La Niña fue asociada significativamente con años de incendio y posterior a 1830 esta asociación no fue significativa (Yocom *et al.* 2010). Para el sur de México, los efectos de este fenómeno muestran también un comportamiento dipolar aunque opuesto a lo observado en el norte, es decir, eventos El Niño propician inviernos secos que favorecen el desarrollo incendios y eventos La Niña se asocian a condiciones de mayor humedad (Magaña *et al.* 2003, Seager *et al.* 2009, Stahle *et al.* 2011).

Para el área de estudio se reconstruyó un total de 20 incendios (figura 4), de los cuales 18 se registran durante

el siglo XX, 16 (89 %) bajo la presencia de ENSO en su fase cálida (El Niño) y dos en condiciones de ENSO en su fase fría (La Niña) (Trenberth 1997, Gergis y Fowler 2009). Estos resultados corroboran la asociación entre ENSO y eventos de incendios para esta región, eventos El Niño son asociados significativamente ($P < 0,05$) con años de incendios. Lo anterior representa condiciones de sequía para el centro de México (Magaña *et al.* 2003, Seager *et al.* 2009, Stahle *et al.* 2011) y sustenta la segunda hipótesis de investigación, que establece que condiciones de sequía han influido en la frecuencia histórica del fuego en esta región del centro del país. A diferencia de este estudio, para los bosques de alta montaña de *P. hartwegii* en el Pico de Orizaba, Veracruz, no se encontró una asociación significativa entre El Niño y eventos de incendios, atribuible a la influencia antropogénica en el régimen de incendios (Yocom y Fulé 2012). Sin embargo, es importante destacar que eventos extremos de ENSO tanto en su fase cálida El Niño (figura 7A) como fría La Niña (figura 7B) impactaron ambas regiones, como ocurrió en los años de 1902 y 1968, respectivamente.

Los eventos La Niña de 1921 y 1943 (Gergis y Fowler 2009), que en teoría deberían haber impactado el norte de México, ocasionaron incendios importantes en este ecosistema de *P. hartwegii* del centro del país (figura 4). Por el contrario, los años El Niño de 1983 y 1998 (Trenberth 1997), que debieron haber propiciado condiciones secas para el sur del país, impactaron incluso la parte norte de México, donde se han reconstruido incendios de alta intensidad durante estos dos años (Yocom *et al.* 2010).

Las condiciones significativas ($P < 0,01$) de humedad para NIÑO 3 y PDSI uno y dos años previos a la ocurrencia del incendio, respectivamente, se asocian a una elevada producción de biomasa de plantas herbáceas y pastos, lo que aunado a una posterior disminución de la lluvia, origina condiciones propicias para el desarrollo de fuertes incendios (figura 7). Swetnam y Baisan (2003) indican que la propagación del fuego se ve favorecida cuando un año seco sigue a un año húmedo, probablemente por la alta producción de combustible fino. Las condiciones significativas de humedad para el centro del país uno (figura 5B) y dos años antes del incendio (figuras 7, 5A y 5C) han influido de manera significativa en la propagación del fuego.

Resultados similares sobre condiciones significativas ($P < 0,05$) de humedad antes de incendios intensos, se han reportado para diferentes bosques de coníferas en el norte de México (Stephens *et al.* 2003, Fulé *et al.* 2005, Cerano-Paredes *et al.* 2010, Yocom *et al.* 2010) y suroeste de los Estados Unidos (Swetnam y Baisan 2003).

CONCLUSIONES

La reconstrucción de la historia de incendios para los últimos 136 años (1876-2011), en el bosque de *P. hartwegii*, muestra que de finales del siglo XIX a la primera década del siglo XXI ha permanecido una frecuencia

ininterrumpida del fuego. Sin embargo, posterior a 1988 se detecta un cambio en la frecuencia de incendios, intervalos de 15 y 11 años en las últimas décadas, tendencia que obedece posiblemente a una mayor efectividad en el control de incendios a partir de 1985. Se acepta la primera hipótesis, que plantea que los regímenes del fuego han cambiado en las últimas décadas, cambio asociado a la influencia humana. El cambio de la frecuencia de incendios es una tendencia que aún se puede corregir con buenas prácticas de manejo del fuego; por ello, se recomienda mantener la frecuencia de incendios dentro de la amplitud de su variación histórica.

Se presenta una relación importante entre condiciones de sequía modulada por ENSO y la presencia de incendios. Eventos El Niño que representan condiciones de sequía para el centro de México, están asociados significativamente con años de incendios, estos resultados sustentan la segunda hipótesis de investigación, que establece que condiciones de sequía han influido en la frecuencia histórica del fuego en esta región del centro del país.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento SEP-CONACYT a través del proyecto “Estudio de la relación clima-incendios en el norte-centro de México” y al proyecto “Reconstrucción de la frecuencia histórica de incendios y caracterización de las cargas de combustible en ecosistemas forestales del norte-centro de México”, con fondos del INIFAP. Gracias a Omar Durán Guerra, Laura Hernández García, Rafael Escobar Cabrera y Gabriel Corona Cuatcontzi por su valioso apoyo durante el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Carrillo-García RL, DA Rodríguez-Trejo, H. Tchikoué, AI Monterroso-Rivas, J Santillan-Pérez. 2012. Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Inter-ciencia* 37(9): 678-683.
- Cerano-Paredes J, J Villanueva-Díaz, PZ Fulé. 2010. Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la Reserva Cerro El Mohinora, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1: 63-74.
- Cerano-Paredes J, J Villanueva-Díaz, R Cervantes-Martínez, PZ Fulé, L Yocom, G Esquivel-Arriaga, E Jardel-Peláez. 2015. Historia de incendios en un bosque de pino de la sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque* 36(1): 39-50. DOI: 10.4067/S0717-92002015000100004
- Cook ER. 2000a. Niño 3 index reconstruction. International Tree-Ring Data Bank. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series Number 2000-052. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA. Consultado 09 mar. 2015. Disponible en <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/recons.html>
- Cook ER. 2000b. North American drought variability PDSI reconstructions. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series Number 2000-074. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colo-

- rado, USA. Consultado 23 may. 2015. Disponible en <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/recons.html>
- Dieterich JH, TW Swetnam. 1984. Dendrochronology of a fire-scarred ponderosa pine. *Forest Science* 30: 238-247.
- Fulé PZ, J Villanueva-Díaz, M Ramos-Gómez. 2005. Fire regime in a conservation reserve, Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 320-330. DOI: 10.1139/X04-173
- García ME. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. México D.F., México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros Núm. 6. 155 p.
- Gergis JL, AM Fowler. 2009. A history of ENSO events since AD 1525: implications for future climate change. *Climatic Change* 92(3-4): 343-387.
- Grissino-Mayer HD, CH Baisan, TW Swetnam. 1994. Fire history and age structure analyses in the mixed conifer and spruce-fir forests of Mount Graham. Final report. Mount Graham Red Squirrel Study Committee. Phoenix, AZ, USA. U.S. Fish and Wildlife Service. 73 p.
- Grissino-Mayer HD. 2001. FHx2—software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research* 57: 115-124.
- Heyerdahl EK, E Alvarado. 2003. Influence of climate and land use on historical surface fires in pine-oak forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. In Veblen TT, WL Baker, G Montenegro, TW Swetnam eds. Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas. New York, USA. Springer-Verlag. p. 196-217.
- Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-75.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, MX). 2009. Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC), Software. Jiutepec, Morelos, México.
- Krawchuk MA, MA Moritz. 2011. Constraints on global fire activity vary across a resource gradient. *Ecology* 92: 121-132.
- Magaña VO, JL Vásquez, JL Pérez, JB Pérez. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 313-330.
- Morales MM. 2005. Programa de manejo forestal para el aprovechamiento persistente de recursos forestales maderables para el tercer ciclo de corta, ejido Rinconada, municipio de Chignahuapan, Puebla. Chignahuapan, Puebla, México. Asesores en Manejo de Recursos Forestales (ASMARF). 107 p.
- Pausas JG, S Fernández-Múñoz. 2011. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change* 110: 215-226.
- Quezada RDA. 2013. Potencial dendrocronológico de *Pinus patula* (Schl. et Cham.) y reconstrucción de la precipitación para Tlaxcala-Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Bermejillo, Durango, México. Unidad Regional de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. 80 p.
- Rodríguez-Trejo DA. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 145-151.
- Seager R, M Ting, M Davis, M Cane, N Naik, J Nakamura, C Li, E Cook, DW Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22:1-31.
- Skinner CN, JH Burk, MG Barbour, E Franco-Vizcaino, SL Stephens. 2008. Influences of climate on fire regimes in montane forests of north-western México. *Journal of Biogeography* 35: 1436-1451.
- Stahle DW, DJ Burnette, J Villanueva-Díaz, RR Heim Jr, FK Fye, J Cerano-Paredes, R Acuña-Soto, MK Cleaveland. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics* 39(6): 1431-1446. DOI 10.1007/s00382-011-1205-z
- Stahle DW, ER Cook, DJ Burnette, J Villanueva, J Cerano, JN Burns, RD Griffin, BI Cook, R Acuña, MCA Torbenson, P Sjezner. 2016. The Mexican Drought Atlas: Tree-Ring Reconstructions of the Soil Moisture Balance During the Late Pre-Hispanic, Colonial, and Modern Eras. *Quaternary Science Reviews* 149: 34-60.
- Stephens SL, CN Skinner, SJ Gill. 2003. Dendrochronology-based fire history of Jeffrey pine-mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Martir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research* 33:1090-1101. DOI: 10.1139/X03-031
- Stokes MA, TL Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. Chicago, USA. University of Chicago Press. 73 p.
- Swetnam TW, CH Baisan. 2003. Tree-ring reconstructions of fire and climate history in the Sierra Nevada and southwestern United States. In Veblen TT, WL Baker, G Montenegro, TW Swetnam eds. Fire and climatic change in temperate ecosystems of the western Americas. New York, USA. Springer-Verlag. p. 158-195.
- Trenberth KE. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78(12): 2771-2777. DOI: 10.1175/1520-0477
- Westerling AL, HG Hidalgo, DR Cayan, TW Swetnam. 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science* 313: 940-943.
- Yocom LL, PZ Fulé, PM Brown, J Cerano-Paredes, J Villanueva-Díaz, DA Falk, E Cornejo-Oviedo. 2010. El Niño Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 91(6): 1660-1671.
- Yocom LL, PZ Fulé. 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

Recibido: 27.10.15
Aceptado: 14.04.16