



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

RÉGIMEN DE INCENDIOS Y ESTRUCTURA DEL BOSQUE DE *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* EN LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA

ADIN HELBER VELÁZQUEZ PÉREZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: **Régimen de incendios y estructura del bosque de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila**, realizada por el alumno Adin Helber Velázquez Pérez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. Valentín José Reyes Hernández

ASESOR

Dr. Armando Gómez Guerrero

ASESOR

Dr. José Villanueva Díaz

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2021

RÉGIMEN DE INCENDIOS Y ESTRUCTURA DEL BOSQUE DE *Pinus greggii*

Engelm. var. *greggii* EN LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA

Adin Helber Velázquez Pérez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

La reconstrucción del régimen de incendios con técnicas dendrocronológicas, y la comprensión de sus efectos en la dinámica del bosque, auxilian en el desarrollo de estrategias de gestión en bosques de pino. Se seleccionaron tres poblaciones de *Pinus greggii* var *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, con los objetivos de analizar los regímenes de incendios, y su influencia en la estructura horizontal y vertical. En cada rodal, se establecieron unidades de muestreo para recolectar cicatrices de incendios de arbolado vivo y muerto, y para tomar información para caracterizar a la estructura arbórea, edades, y riqueza de especies herbáceas y arbustivas. El régimen de incendios se determinó con el datado de cicatrices, relacionándolo con patrones climáticos de circulación global e índices de sequía; además, se analizó la sincronía de incendios con periodos de reclutamiento y clima. Los incendios pequeños fueron frecuentes (3.4-5.9 años) con mayor ocurrencia en primavera, con influencia del clima y factores locales (uso de suelo y topografía). La estructura arbórea y el análisis de sincronía, sugieren que estos bosques están adaptados a un régimen de severidad mixta, y que incendios pequeños de copa y superficiales son parte de su historia natural. El mayor reclutamiento se sincronizó con periodos de humedad, después de incendios de copa que reemplazaron rodales pequeños, pero estos incendios no fueron frecuentes; las especies herbáceas y arbustivas ayudan a mantener el régimen de incendios al crear continuidad vertical.

Palabras clave: ENSO, conos serótinicos, reclutamiento, sotobosque, sincronía.

**FIRE REGIME AND FOREST STRUCTURE OF *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii*
IN THE SIERRA ZAPALINAMÉ, COAHUILA**

Adin Helber Velázquez Pérez, MC.
Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

Fire regime reconstruction through dendrochronological techniques, and the understanding of their effects on forest dynamics, is a reliable and useful approach to develop management strategies in pine forests. Three natural populations of *Pinus greggii* var *greggii* were selected and sampled in the sierra Zapalinamé, Coahuila, in order to analyze fire regimes, and their influence on vertical and horizontal vegetation structure. Sampling plots were set up on each population to collect fire scars from dead and alive trees, and also information to characterize vegetation structure and richness. The fire regime was determined with scar dating and further related to climate patterns of global circulation and drought indices; an analysis of the relationship between fire synchrony with recruitment periods and climate was also performed. The results indicated that small fires were frequent (3.4-5.9 years) with greater occurrence in spring, except in one population. Local factors, such as topography and land use, influenced fire frequency, in addition to climate. Tree structure and synchrony analysis suggests that these forests are adapted to a fire regime of mixed severity, where small crown and surface fires are part of their natural history. The greatest recruitment was synchronized with wet periods, after crown fires that replaced small stands, but these fires were not frequent; herbaceous and shrub species help maintain the fire regime by creating a vertical continuity.

Key words: ENSO, serotinous cone, recruitment, understory, synchrony.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca recibida para realizar mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y el apoyo económico para el desarrollo de la presente tesis; a los investigadores del Postgrado en Ciencias Forestales y de otros programas de Postgrado, por compartir sus conocimientos en clases.

Al Dr. Valentín José Reyes Hernández por fungir como Consejero, por las gestiones ante el Colegio para el desarrollo de la tesis, asesoría, tiempo y revisiones exhaustivas para la mejora del presente documento. Gracias.

Al Dr. Armando Gómez Guerrero, gracias por las sugerencias, tiempo en las revisiones y aportaciones para la mejora del presente trabajo.

Al Dr. José Villanueva Díaz, gracias por su apoyo en el establecimiento del estudio en campo, materiales, y análisis de muestras en laboratorio, por contagiar su pasión por la dendrocronología, su disponibilidad y asesoría en el desarrollo de la presente investigación, y motivación para continuar con los estudios de postgrado.

Al Dr. José M. Iniguez, gracias por su apoyo en el establecimiento del estudio en campo, materiales, financiamiento en parte del análisis de muestras, asesoría, disponibilidad para compartir sus conocimientos en ecología del fuego, y motivación de continuar con los estudios de postgrado.

A Juan Carlos Montoya, Adriana Paredes, Jonathan Hernández y demás compañeros por su valiosa amistad, por formar parte de esta etapa de mi vida.

A Lidia Velázquez y Yesenia Velázquez, por su valiosa amistad y motivación para finalizar esta etapa de mi vida.

A la dirección de Protección de la Fauna Mexicana A.C., Saltillo, en particular, al Ing. Sergio Marín e Ing. Juan Manuel Cárdenas, por la aceptación del proyecto en la Reserva Natural Estatal Sierra de Zapalinamé (RNESZ), y la gestión de los accesos a los sitios de estudio.

A los guardaparques de la RNESZ, Leticia Jiménez, Arturo Cruz, Efraín Ramírez, Rafael Cárdenas, Brigada Cilaván del ejido Cuauhtémoc, también, a Jesús Pérez y Jonathan Torres, por el invaluable apoyo en la toma de datos de campo, y compartir la historia de manejo de los sitios de estudio.

A las autoridades ejidales de El Cedrito, Arteaga; Cuauhtémoc, Saltillo; y al dueño del paraje El Penitente, por los permisos de ingreso a los sitios de estudio.

A la M.C. Fátima del Rocío Reyes, por su invaluable apoyo en el análisis de muestras en laboratorio, asesoría en el análisis y su amistad.

Al Dr. Aldo Sifuentes por su apoyo inicial en campo y amistad;

Al Dr. Julián Cerano por sus comentarios iniciales en el análisis de datos.

Al departamento forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en particular, al Dr. Celestino Flores López y M.C Héctor Darío por sus consejos y apoyo incondicional para facilitar vehículo y personal de campo.

Al M.C Andrés Nájera Díaz y Biol. Eglantina Canales, por ser los principales impulsores para continuar con mis estudios de postgrado, los consejos y respaldo.

Al Dr. Juan Antonio Encina Domínguez, del departamento de recursos naturales de la UAAAN, por su apoyo en la identificación de especies herbáceas y arbustivas.

A don Guadalupe Sifuentes García, por compartir la historia de incendios de los ejidos Chapultepec y El Cedrito, Arteaga.

Al combatiente de incendios, Gerardo Balandrán por compartir sus experiencias e historia de manejo de incendios de la Sierra de Zapalinamé y Arteaga.

DEDICATORIA

A Dios por la salud y oportunidad de culminar una meta más en mi vida.

A mis padres, por ser los principales motores para cumplir un sueño más, quienes me dieron las bases para lograrlo, por todo el amor, motivación, enseñanzas y sabios consejos durante toda mi vida. Con respeto y admiración, Paula Pérez Vázquez y Armando Velázquez Morales.

A mis hermanos, Floridalma Velázquez y Gadiel Velázquez, por sus enseñanzas y apoyo que siempre me han brindado.

A María Magdalena Colón, por su amor, comprensión y apoyo en todo momento; por compartir su vida con la mía; a nuestro hijo Helber Armando Velázquez Colón, quién cada día haces que esté orgulloso de tu nobleza, amor, sueños, sonrisas, motivaciones, y de tus logros; por acompañarme y ser parte de mi fuente de inspiración.

A la Dra. Silvia González Aldaco (†) y M.C. Rusbel Eliud Gómez Morales (†), quienes motivaron mi formación profesional y personal.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE CUADROS.....	xv
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO I. RÉGIMEN HISTÓRICO DE INCENDIOS Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN BOSQUES DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. var. <i>greggii</i>, EN LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA.....	6
1.1 RESUMEN	6
1.2 ABSTRACT	7
1.3 INTRODUCCIÓN	8
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	12
1.4.1 Área de estudio.....	12
1.4.2 Sitios de estudio.....	12
1.4.3 Muestreo de campo	13
1.4.4 Métodos de laboratorio	14
1.4.5 Análisis de datos.....	15
1.4.6 Relación clima-incendios	17
1.5. RESULTADOS	19
1.5.1 Régimen de incendios	19
1.5.2 Estacionalidad de los incendios.....	23
1.5.3 Sincronía de incendios.....	24
1.5.4 Relación clima-incendios	27
1.6 DISCUSIÓN	36
1.6.1 Régimen de incendios	36
1.6.2 Cambios en la frecuencia de incendios después de 1998	38

1.6.3 Relación clima-incendios	39
1.7 CONCLUSIONES	44
1.8 LITERATURA CITADA.....	45
CAPÍTULO II. INCENDIOS Y ESTRUCTURA DEL BOSQUE DE <i>Pinus greggii</i>	
Engelm. var. <i>greggii</i> EN LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA.....	51
2.1 RESUMEN	51
2.2 ABSTRACT	52
2.3 INTRODUCCIÓN	53
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	57
2.4.1 Área de estudio.....	57
2.4.2 Delimitación de rodales.....	58
2.4.3 Muestreo en campo	60
2.4.4 Métodos de laboratorio	63
2.4.5 Análisis de datos.....	64
2.5 RESULTADOS	67
2.5.1 Estructura del bosque de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i>	67
2.5.2 Sincronía de incendios, reclutamiento y variabilidad climática	72
2.5.3 Riqueza de especies herbáceas y arbustivas	77
2.6 DISCUSIÓN	82
2.6.1 Estructura del bosque de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i>	82
2.6.2 Sincronía de incendios, reclutamiento y variabilidad climática	85
2.6.3 Riqueza de especies herbáceas y arbustivas	87
2.7 CONCLUSIONES	89
2.8 LITERATURA CITADA.....	90
CONCLUSIONES GENERALES	97
Apéndice 1.1.....	98
Apéndice 1.2.....	99
Apéndice 1.3.....	100
Apéndice 1.4.....	101
Apéndice 1.5.....	102
Apéndice 1.6.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de los sitios de estudio en las tres poblaciones de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	13
Figura 1.2. Historia de incendios en la población de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> , sitio El Penitente (TVE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las líneas horizontales discontinuas indican la línea de tiempo de cada árbol, las cuales muestran las cicatrices de incendios en pequeñas barras verticales. Los años de ocurrencia de todos los incendios se presentan en la parte inferior del gráfico. La línea azul indica el incendio que cicatrizó más árboles.....	21
Figura 1.3. Historia de incendios en la población de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> en el sitio Cañón de las Norias (CNO), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las líneas horizontales discontinuas indican la línea de tiempo de cada árbol, las cuales muestran las cicatrices de incendios en pequeñas barras verticales. Los años de ocurrencia de todos los incendios se presentan en la parte inferior del gráfico. La línea azul indica el incendio que cicatrizó más árboles.....	22
Figura 1.4. Historia de incendios en la población de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> en el sitio Cañón del Negro (CNE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las líneas horizontales discontinuas indican la línea de tiempo de cada árbol, las cuales muestran las cicatrices de incendios en pequeñas barras verticales. Los años de ocurrencia de todos los incendios se presentan en la parte inferior del gráfico. La línea azul indica el incendio que cicatrizó más árboles.....	23
Figura 1.5. Sincronía de incendios entre sitios, en bosques de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las barras en rojo indican años de incendios en los tres sitios.....	25
Figura 1.6. Sincronía de incendios por sitio, en bosques de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	26

Figura 1.7. Número de incendios por periodo de 10 años por sitio, en bosques de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	26
Figura 1.8. Número de cicatrices de incendio por periodo de 10 años en tres sitios, en bosques de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	27
Figura 1.9. Análisis SEA para el bosque de <i>Pinus greggii</i> , en El Penitente (TVE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos y los números positivos representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.	28
Figura 1.10. Análisis SEA en el bosque de <i>Pinus greggii</i> en Cañón de las Norias (CNO), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos y los números positivos, representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.	30
Figura 1.11. Análisis SEA para el bosque de <i>Pinus greggii</i> , en Cañón del Negro (CNE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos, y números positivos representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.	32
Figura 1.12. Influencia de eventos intensos de ENSO (Niño 3.4 \pm 0.5) en los incendios ocurridos en los tres sitios de estudio: A) TVE, B) CNO y C) CNE con dominancia de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	33
Figura 1.13. Análisis SEA con los índices SOI (A), Niño 3.4 (B), SPEI (C), AMO (D), PDO (E) y ENSO intensos (F) con 24 incendios que tienen sincronía en dos o más sitios en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos, y los números positivos representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior	

señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.....	35
Figura 2.1. Ubicación de las áreas de estudio en tres poblaciones de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> en la Reserva Natural Estatal Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Se muestra la delimitación de rodales por población, sitios de muestreo y ubicación de las colectas de cicatrices de incendios.	59
Figura 2.2. Esquema de los sitios de muestreo para árboles, brinzales, plántulas, especies arbustivas y herbáceas, en rodales de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	62
Figura 2.3. Distribución del número de árboles por ha ⁻¹ por rodal, en tres poblaciones de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las marcas de color rojo indican el valor promedio. TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro; CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas	67
Figura 2.4. Distribución de los diámetros de copa (cm) por rodal, en tres poblaciones de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las marcas de color rojo indican el valor promedio. TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro; CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas.....	69
Figura 2.5. Distribución de diámetros de copa en relación con la densidad arbórea (individuos ha ⁻¹) en bosques de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	70
Figura 2.6. Distribución de árboles por clases diamétricas (CD) por población y rodal. TVE (El Penitente), CNO (Cañón de las Norias) y CNE (Cañón del Negro). Notar que las escalas en el eje Y son diferentes.....	72
Figura 2.7. Sincronía de estructura de edades (B), historia de incendios (A) y variabilidad climática (C), en El Penitente (TVE), Sierra de Zapalinamé. Como proxy del clima se utilizó una cronología de anillo total de <i>Pinus greggii</i> del mismo sitio.	74

Figura 2.8. Sincronía de estructura de edades (B), historia de incendios (A) y variabilidad climática (C), en Cañón de las Norias (CNO), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Como proxy del clima se utilizó una cronología de anillo total de <i>Pinus greggii</i> del mismo sitio.....	75
Figura 2.9. Sincronía de estructura de edades (B), historia de incendios (A) y variabilidad climática (C), en Cañón del Negro (CNE), Sierra de Zapalinamé. Como proxy del clima se utilizó una cronología de ancho de anillos de <i>Pinus greggii</i> del mismo sitio.....	77
Figura 2.10. Dendrograma de similitud de especies arbustivas por rodal del bosque de <i>Pinus greggii</i> . Rodales (CP= Copas pequeñas, CM= Copas medianas, CG= Copas grandes), población (TVE= El Penitente, CNO= Cañón de las Norias, CNE= Cañón del Negro). Los valores en el eje Y indican distancias, entre menor sea el valor indica menor distancias entre grupos o rodales, por tanto, mayor similitud.....	79
Figura 2.11. Dendrograma de similitud de especies herbáceas por rodal del bosque de <i>Pinus greggii</i> . Rodales (CP= Copas pequeñas, CM= Copas medianas, CG= Copas grandes), población (TVE= El Penitente, CNO= Cañón de las Norias, CNE= Cañón del Negro). Los valores en el eje Y indican distancias, entre menor sea el valor indica menor distancia entre grupos o rodales, por tanto, mayor similitud.....	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Información de los árboles colectados en bosques de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	14
Cuadro 1.2. Intervalos medios de frecuencia incendios en tres sitios, en bosques de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila	20
Cuadro 1.3. Historia de incendios en poblaciones de <i>Pinus greggii</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	21
Cuadro 1.4. Estacionalidad de los incendios con base en la posición de las cicatrices de fuego en el anillo de crecimiento, para las tres poblaciones analizadas de <i>Pinus greggii</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	24
Cuadro 2.1. Características físicas de los rodales y poblaciones de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	60
Cuadro 2.2. Características de los estratos y variables medidas en las parcelas de muestreo, en rodales de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	61
Cuadro 2.3. Muestras obtenidas por población, para el análisis de estructura de edades en los rodales	63
Cuadro 2.4. Características estructurales de rodales en tres poblaciones de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> , Sierra de Zapalinamé, Coahuila.....	71
Cuadro 2.5. Riqueza de especies y familias de arbustos y herbáceas, e índice de diversidad de Shannon-Wiener por rodal, en bosques de <i>Pinus greggii</i> , Sierra de Zapalinamé, Coahuila.	78

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* se distribuyen en los estados de Coahuila y Nuevo León, en la Sierra Madre Oriental, siendo una especie endémica del noreste de México que forma rodales pequeños, puros, aislados y fragmentados (Donahue & Lopez Upton, 1999; Farjon, 2013). Si bien no se encuentra protegida por la normatividad mexicana, sí está en la lista roja de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), en la categoría de *casi amenazada* debido a la fragmentación de sus poblaciones (Farjon, 2013). La serotinidad de los conos de esta especie son un indicador de cierta adaptabilidad a los incendios naturales (Farjon *et al.*, 1997; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2003).

Las especies de pinos con conos seróticos evolucionaron con incendios intensos de copa (He *et al.*, 2012). Este régimen natural de incendios favorece la conservación del material genético, y en ausencia de fuego, de períodos que exceden la longevidad de la planta, o presencia de incendios muy frecuentes, el carácter de serotinidad tiende a ser menor (Buma *et al.*, 2013; Lamont *et al.*, 2020). Después de incendios pequeños de copa, el reclutamiento se establece en altas densidades con edades uniformes, como sucede con especies como *Pinus contorta* Douglas ex Loudon (Lotan, 1976; Forrestel *et al.*, 2017), *Pinus banksiana* Lamb.(Heinselman, 1973), *Pinus attenuata* Lemmon (Fry *et al.*, 2012), y *Pinus patula* Schltldl. & Cham. (Farjon *et al.*, 1997; Lamont *et al.*, 2020), ya que algunas de sus características adaptativas al fuego se relacionan con el aumento de producción de semillas que son liberadas con las altas temperaturas del incendio (Enright *et al.*, 1998).

Los incendios naturales crean heterogeneidad a nivel del paisaje a lo largo del tiempo, lo que permite que los bosques expresen su resiliencia a las perturbaciones naturales producto de variaciones climáticas (Hessburg *et al.*, 2005; Stephens *et al.*, 2008; Berkey *et al.*, 2021); sin embargo, cuando los incendios son suprimidos por actividades humanas se crean paisajes homogéneos alterándose rasgos estructurales del bosque, y se promueve la continuidad horizontal y vertical en los combustibles, por lo que pueden producirse incendios extensos de alta severidad (Heinselman, 1973; Covington & Moore, 1994; Agee, 1998).

De esta forma, los incendios de origen natural son perturbaciones que contribuyen a mantener la estructura y función de ecosistemas (Agee, 1993; Attiwill, 1994), siendo necesarios para el reclutamiento de plántulas por medio de la escarificación y estimulación de semillas en reservorios del suelo, apertura de conos serótimos y promoción de rebrotes (Agee, 1993; Keeley & Fotheringham, 2000). Si los incendios se presentan fuera de su régimen natural, el reclutamiento de plántulas podría limitarse o verse amenazado (Keeley & Fotheringham, 2000).

Las variables del clima como la temperatura y precipitación crean condiciones para la germinación y sobrevivencia de las plántulas. Además, factores como la disponibilidad de semillas de árboles sobrevivientes, y la distribución y tamaños de los manchones quemados ayudan al establecimiento de la regeneración (Boyden *et al.*, 2005; Owen *et al.*, 2017) además de factores topográficos (Stevens-Rumann & Morgan, 2019); sin embargo, se prevé que con las variaciones climáticas, los incendios sean más frecuentes y de alta severidad, y es posible que los bosques de pinos sean reemplazados por vegetación resistente al fuego (i.e. especies arbustivas) (Falk, 2013; Owen *et al.*, 2017).

La variabilidad climática es un detonador de la ocurrencia de incendios y del cambio de régimen a través del tiempo (Yocom *et al.*, 2010; Meunier *et al.*, 2014; Yocom *et al.*, 2017), si bien cambios de régimen pueden también atribuirse también a las actividades humanas (Savage & Swetnam, 1990; Covington & Moore, 1994; Poulos *et al.*, 2013). En las Sierras Madre Oriental y Occidental, el régimen de incendios se ha interrumpido o modificado, en particular por pastoreo intensivo de cabras, reparto agrario de tierras, y construcción de caminos carreteras, lo cual se intensificó a mediados del siglo XX con la supresión de incendios de origen natural (Fulé & Covington, 1997; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Yocom *et al.*, 2010; Poulos *et al.*, 2013; Yocom *et al.*, 2014 y 2017).

Los patrones climáticos de circulación global, como El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), modulan las precipitaciones del norte de México, donde los años secos se asocian con eventos La Niña (fase fría) y años húmedos con eventos El Niño (fase cálida) (Stahle *et al.*, 2012 y 2016). Estos patrones también se relacionan con la ocurrencia de incendios, aunque es posible que los cambios climáticos y actividades humanas, permitan que en las últimas décadas del siglo XX esta relación no haya sido consistente en la Sierra Madre Oriental, debido a que tanto la fase fría como la cálida de ENSO generan condiciones secas (Yocom *et al.*, 2010; Poulos *et al.*, 2013; Yocom *et al.*, 2014 y 2017). También, se reconoce que que el clima regional, a través del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) se relaciona con la ocurrencia de incendios en el norte de México (Villanueva & McPherson, 2002; Brown *et al.*, 2008).

Los años 1998 y 2011 fueron los de mayor superficie afectada por incendios forestales en México; en particular, en el año 2011 el estado de Coahuila fue el de mayor superficie

afectada en su historia (CONAFOR, 2011), y dichos eventos se relacionaron con la fase cálida y fría de ENSO, siendo las descargas eléctricas la principal fuente de ignición (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2003; Marín *et al.*, 2018).

Los estudios de frecuencia de incendios en bosques de coníferas de Coahuila y Nuevo León en la Sierra Madre Oriental (Yocom *et al.*, 2010, 2014 y 2017; Poulos *et al.*, 2013), así como en bosques de coníferas en Durango y Chihuahua en la Sierra Madre Occidental, sugieren que estos evolucionaron con regímenes de fuego frecuente y superficial, con frecuencia menor a 10 años, y con intervalo de ocurrencia de 6-17 años con incendios relativamente grandes, asociados con dominancia de condiciones secas favorecidas por la fase La Niña (Fulé & Covington, 1997; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano-Paredes *et al.*, 2010; Meunier, *et al.*, 2014; Cerano-Paredes *et al.*, 2019). El limitado número de estudios de frecuencia histórica de incendios en la Sierra Madre Oriental, señala la necesidad de realizar mayor cantidad de estudios para entender la variabilidad en el régimen de incendios, en particular, en bosques como *Pinus greggii* var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

La gestión de las poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Reserva Natural Estatal Sierra de Zapalinamé, requiere el entendimiento de la dinámica del bosque en relación con los regímenes de incendios a los que están adaptados; además, la estructura arbórea (vertical y horizontal), de edades y la historia de incendios no se ha documentado, lo cual crea incertidumbre sobre cómo gestionarlos en el corto y mediano plazos. Por lo tanto, uno de los desafíos en la gestión de los bosques de *Pinus greggii* es comprender la influencia del clima e incendios en la estructura de estos bosques.

Los objetivos generales de este trabajo fueron analizar los regímenes de fuego y evaluar su efecto en las características estructurales del bosque de *Pinus greggii* var. *greggii* en la sierra de Zapalinamé, Coahuila, con el fin de obtener algunas bases para la toma de decisiones en la gestión de sus poblaciones, y generar información para considerar al fuego como una herramienta ecológica en la gestión y conservación de estas poblaciones.

Para lo anterior, el documento se divide en dos capítulos principales. En el primero se presenta la reconstrucción del régimen de incendios y su relación con patrones climáticos de circulación global, mientras que en el Capítulo II, se presentan resultados del análisis de la estructura arbórea, riqueza del sotobosque, y la sincronía de los incendios con el reclutamiento y la variabilidad climática en los bosques de *Pinus greggii* de la Sierra de Zapalinamé.

CAPÍTULO I. RÉGIMEN HISTÓRICO DE INCENDIOS Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN BOSQUES DE *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii*, EN LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA

1.1 RESUMEN

El análisis del régimen histórico de incendios con técnicas dendrocronológicas permite el desarrollo de estrategias de gestión del fuego en bosques naturales. Los objetivos de este trabajo fueron reconstruir la historia de incendios y analizar la influencia que ejercen en su frecuencia fenómenos de circulación global océano-atmosfera, en rodales de *Pinus greggii* var. *greggii* en Coahuila, México. El estudio se realizó en tres sitios de la Sierra de Zapalinamé, El Penitente (TVE), Cañón de las Norias (CNO) y Cañón del Negro (CNE). Se dataron con técnicas dendrocronológicas, muestras de 99 árboles cicatrizados por fuego (45.7% vivos y 54.3% muertos), y se reconstruyó la frecuencia de incendios del periodo 1784-2019. La mayoría de los incendios ocurrió en primavera, excepto en CNO. La frecuencia media de incendios para los tres sitios al considerar todas las cicatrices fue de 3.47 a 5.96 años. Los incendios en cada sitio y los que ocurrieron en sincronía en dos o más sitios, no presentaron interacción significativa ($p > 0.05$) con índices climáticos de circulación global e índices de sequía, excepto en el sitio TVE que se asociaron con la fase fría (Niña) con el Índice de Oscilación del Sur (SOI) de invierno ($p < 0.05$); el sitio CNO se asoció con la fase cálida de ENSO, con influencia además de topografía y uso del suelo. En las últimas dos décadas, los incendios disminuyeron en CNE, en CNO su frecuencia se ha mantenido, y en TVE han aumentado. Los patrones climáticos están relacionados con la ocurrencia histórica de incendios; sin embargo, actividades antrópicas han modificado el régimen de incendios en estos bosques.

Palabras clave: dendrocronología, ENSO, historia de incendios, PDSI, *Pinus greggii*

HISTORICAL FIRE REGIME AND ITS RELATIONSHIP TO CLIMATE IN FORESTS OF *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii*, IN THE SIERRA OF ZAPALINAMÉ, COAHUILA

1.2 ABSTRACT

The analysis of historical fire regime with dendrochronological techniques allows the development of fire management strategies in natural forests. This work aimed to reconstruct the fire history and to analyze the influence of global ocean-atmosphere circulation phenomena on fire frequency, in stands of *Pinus greggii* var. *greggii* in Coahuila, Mexico. The study was conducted at three sites in the Sierra Zapalinamé: El Penitente (TVE), Cañón de las Norias (CNO) and Cañón del Negro (CNE). Samples of 99 fire-scarred trees (41.4% alive and 58.6% dead) were dated with dendrochronological techniques, and the fire frequency for the 1784-2019 period was reconstructed. Most fires occurred in spring, except in CNO. The mean fire frequency of the three sites ranged from 3.47 to 5.96 years when considering all scars. Fires at each site and those that occurred in synchrony at two or more sites, did not show significant interaction ($p > 0.05$) with climatic indices of global circulation and drought indices, except at TVE, where they were associated with the cold phase (Niña) with the winter Southern Oscillation Index (SOI) ($p < 0.05$); fires in CNO were associated with the warm phase of ENSO, with influence of topography and land use. In the last two decades, fire frequency decreased in CNE, it has been constant in CNO and increased in TVE. Climatic patterns are related to the historical occurrence of fires; however, anthropogenic activities have modified the fire regime in these forests.

Key words: dendrochronology, ENSO, fire history, PDSI, *Pinus greggii*

1.3 INTRODUCCIÓN

El régimen de incendios se caracteriza por la frecuencia, extensión, magnitud y estacionalidad con que éstos se presentan en un ecosistema (Agee, 1998), características que varían en tiempo y espacio, en el mismo o en diferentes ecosistemas; sin embargo, factores como la vegetación, topografía, y patrones climáticos influyen en la propagación del fuego (Heyerdahl *et al.*, 2001; Falk *et al.*, 2011) donde la altitud y exposición constituyen elementos importantes en la ocurrencia de incendios (Baisan & Swetnam, 1990; Heyerdahl *et al.*, 2001; Zúñiga-Vásquez & Pompa-García, 2019).

Las cicatrices de incendios en árboles vivos y muertos constituyen un recurso excelente en la reconstrucción de la historia de incendios (Agee, 1993; Baisan & Swetnam, 1990); además, las clases de edad de los árboles de un rodal permiten identificar el reclutamiento después de perturbaciones y permiten comprender mejor la evolución de la estructura de un rodal, y los factores ecológicos que intervienen en este proceso (Heinselman, 1973; Agee, 1993). La variabilidad climática es un detonador de la ocurrencia de incendios a escalas global y regional. Por un lado, los años húmedos favorecen la acumulación de combustibles, mientras que los secos aumentan el riesgo de ignición del combustible. Además, intervienen factores asociados con la actividad humana (Yocom *et al.*, 2010 y 2017), también influyen sobre el régimen de incendios (Covington & Moore, 1994; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Sakulich & Taylor, 2007; Poulos *et al.*, 2013).

Algunos estudios indican que la precipitación invernal es el principal detonante de incendios regionales, aunque los años con sequía en invierno y verano presentan mayor

frecuencia de incendios regionales e incendios de mayor extensión (Arizpe, 2016). Asimismo, patrones climáticos globales tales como El Niño Oscilación del Sur (ENOS, o ENSO por El Niño-Southern Oscillation) modula las precipitaciones del norte de México, donde los años secos se asocian con eventos La Niña (fase fría) y años húmedos con eventos El Niño (fase cálida) (Stahle *et al.*, 2016); también, Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) se relaciona con la ocurrencia de incendios en el norte de México (Villanueva & McPherson, 2002). En general, estos patrones climáticos causan sincronía de incendios a escalas global o regional (Brown *et al.*, 2008), y la variación climática a escalas global, regional o local, puede afectar la duración de la temporada de incendios (Heyerdahl *et al.*, 2001).

La ocurrencia de incendios también está asociada a condiciones de mayor humedad previas al año del incendio (Baisan & Swetnam, 1990; Swetnam & Betancourt, 1998); la humedad crea condiciones para la producción de combustibles finos como hierbas y arbustos de crecimiento anual que facilitan la propagación del fuego (Swetnam & Betancourt, 1998). Condiciones como las descritas, se consideran detonadores de los incendios ocurridos en 2011 en Coahuila, ya que en el año previo se presentó el huracán Alex, y con las heladas de febrero del 2011, aunado a condiciones dominantes de sequías en ese año, se creó el escenario ideal para la ocurrencia de incendios, que fueron de gran magnitud en la historia de Coahuila, y en general de México (Marín *et al.*, 2018).

Los estudios de frecuencia de incendios que existen en la Sierra Madre Oriental, en bosques de coníferas de Coahuila y Nuevo León, indican que los incendios en siglos

pasados fueron superficiales, con una frecuencia menor a 10 años, y se asociaron con la dominancia de condiciones secas y favorecidos por la fase La Niña; no obstante, a finales del siglo XX, esta relación no se mantuvo (Yocom *et al.*, 2010, 2014 y 2017; Poulos *et al.*, 2013). El reducido número estudios relacionados con la frecuencia histórica de incendios en esta cadena montañosa, señala la necesidad de ampliar este tipo de estudios; en particular en los bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. En la Sierra Madre Occidental, los bosques de coníferas de Durango y Chihuahua, evolucionaron con un régimen de fuegos pequeños frecuentes y superficiales, con una frecuencia menor a 10 años, e incendios presentes en amplias superficies (rango 6-17 años) asociados a condiciones invernales secas (La Niña) (Fulé & Covington, 1997; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Cerano-Paredes *et al.*, 2010; Meunier, *et al.*, 2014; Cerano-Paredes *et al.*, 2019).

En la Sierra Madre Oriental y Occidental, los periodos sin incendios se relacionan con el cambio de uso del suelo, en particular, con el pastoreo intensivo de cabras, reparto agrario de tierras, fragmentación del paisaje por asentamientos humanos, construcción de carreteras y caminos, lo cual se magnificó a mediados del siglo XX, con la supresión de incendios de origen natural (Fulé & Covington, 1997; Heyerdahl & Alvarado, 2003; Fulé *et al.*, 2005; Yocom *et al.*, 2010; Poulos *et al.*, 2013; Yocom *et al.*, 2014 y 2017; Cerano-Paredes *et al.*, 2019). La Sierra de Zapalinamé, Coahuila, es un área natural protegida con alto valor ecológico por sus endemismos, y riqueza de flora (Encina *et al.*, 2016) y fauna, además, de su importancia hidrológica. En ella, se distribuye *Pinus greggii* var. *greggii*, especie endémica de la Sierra Madre Oriental, presente en pequeños rodales puros y fragmentados (Donahue & Lopez Upton, 1999; Ramírez-Herrera *et al.*,

2005; Farjon, 2013). Estos bosques son importantes para la recarga de acuíferos que proveen de agua al área metropolitana de la ciudad de Saltillo (Villanueva-Díaz *et al.*, 2009; CNA, 2015). Para el manejo de estos bosques requiere comprender el régimen de incendios a los que están expuestos, como lo indican las características de sus conos (*i.e.* serótinicos), lo cual constata que son especies que han coevolucionado con incendios de alta severidad; sin embargo, la historia de incendios en esta zona, y su relación con el clima se desconoce, lo cual limita planear su conservación a corto y mediano plazo.

Comprender el régimen histórico de incendios permitirá a los manejadores del área protegida, considerar la frecuencia y extensión de los mismos para minimizar los efectos negativos y proveer beneficios ecológicos que este ecosistema puede proporcionar a la población humana de esta región (Fulé *et al.*, 2005; Cerano-Paredes *et al.*, 2019). Entender la interacción entre el clima y la ocurrencia de incendios, constituye información técnica que puede ayudar a predecir la ocurrencia de incendios intensos y minimizar sus riesgos (Heyerdahl *et al.*, 2001). Por lo anterior, una de las preguntas planteadas es ¿Con qué frecuencia, extensión y estacionalidad han ocurrido los incendios en los bosques de *Pinus greggii* var. *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé?, ¿Qué variables climáticas determinan su presencia? Los objetivos de este estudio fueron: 1) reconstruir la historia de incendios en tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, y; 2) analizar la influencia que ejercen fenómenos océano-atmósfera en la ocurrencia histórica de incendios. Las hipótesis que se planteó fue que la ocurrencia de incendios está relacionada con las condiciones climáticas dominantes (*i.e.* temperatura, precipitación) un año previo y durante el año del incendio.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Área de estudio

Ésta se encuentra dentro de la Reserva Natural Estatal Sierra Zapalinamé, en los municipios de Saltillo y Arteaga, al sureste del Estado de Coahuila (POE, 2017). Forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental y subprovincia fisiográfica Gran Sierra Plegada, representada por sierras con pliegues y bajadas con poco declive en las partes bajas de las sierras (González, 2017; INEGI, 2011).

El clima de la subprovincia Gran Sierra Plegada es templado subhúmedo (Cx) con lluvias en verano y en general precipitación escasa todo el año, con media anual de 490 mm, y temperatura media anual entre 12 y 18°C; las partes más altas se caracterizan por presentar clima semifrío sub húmedo (C(E)x) con temperatura media anual entre 5 y 12°C (INEGI, 2000; García, 2004; Mendoza & González, 2017). El suelo es de tipo litosol caracterizado por tener una profundidad menor a 10 cm, con presencia de rocas, tepetate o caliche (INEGI, 2004).

La vegetación está representada por bosques con rodales puros de *Pinus greggii* aunque también se presentan masas mezcladas con *Pinus arizonica* Engelm. y especies de porte arbustivo como *Juniperus* y *Quercus* (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

1.4.2 Sitios de estudio

En dicha Sierra, se seleccionaron tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, las cuales se denominaron: 1) Cañón del Negro (CNE), Saltillo, 2) Cañón de las Norias (CNO), Arteaga, y 3) El Penitente (TVE), Saltillo (Figura 1.1). En estas poblaciones se

colectaron muestras (cuñas) con cicatrices de incendios, con la metodología que se describe en la sección 1.2.3.

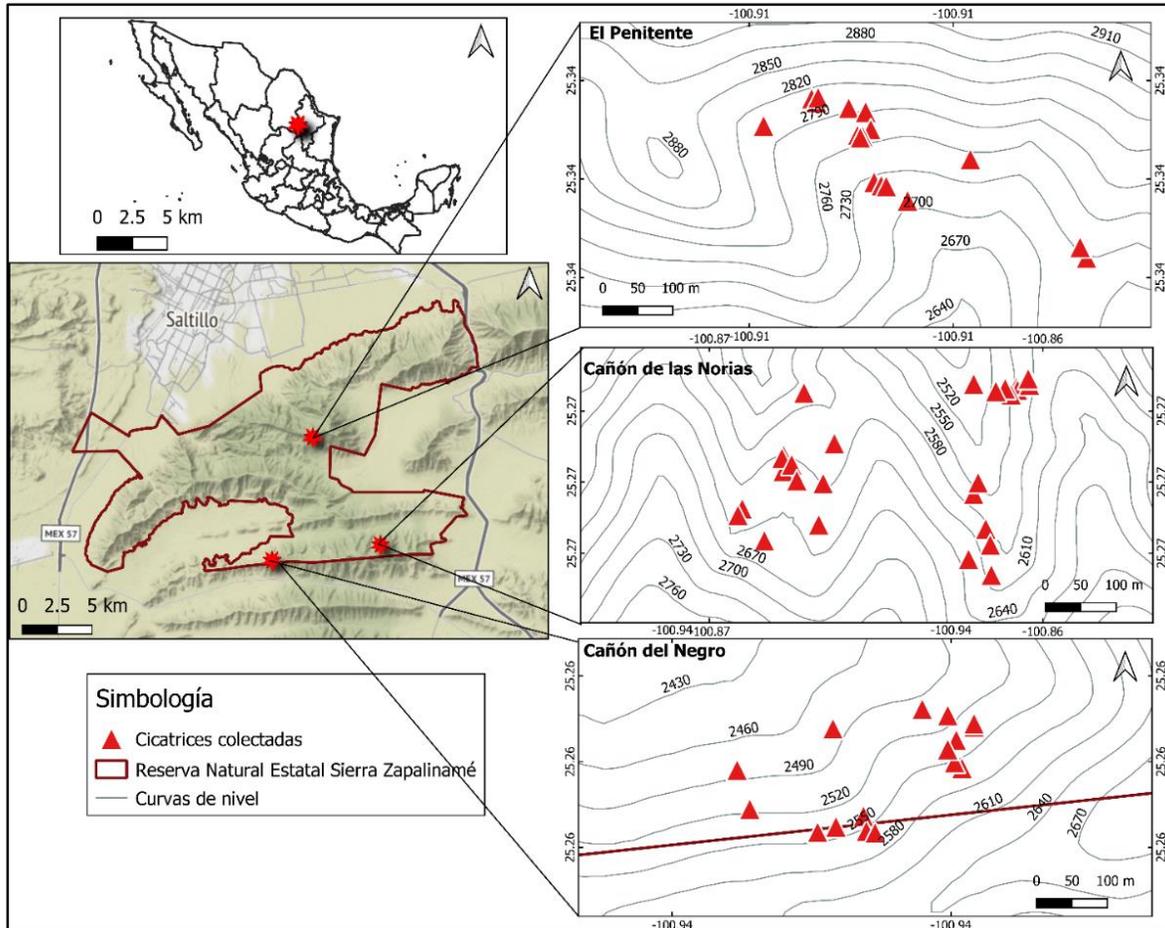


Figura 1.1. Ubicación de los sitios de estudio en las tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila

1.4.3 Muestreo de campo

Las muestras de cicatrices se obtuvieron en septiembre y octubre del 2019, de árboles vivos a través de secciones transversales parciales o cuñas, y de árboles muertos en pie, tocones y árboles caídos (Baisan & Swetnam, 1990; Agee, 1993); las muestras se obtuvieron con una motosierra y con sierra manual, se georreferenciaron con un GPS Garmin® 64sx y se les asignó una clave de identificación (Baisan & Swetnam, 1990;

Cerano-Paredes *et al.*, 2020). La mayoría de muestras colectadas fueron de *Pinus greggii*, y sólo cuatro de *Pinus arizonica* Engelm., tres en TVE y una en CNO. La recolección se realizó sobre superficies aproximadas de 10 ha para TVE, 25 ha para CNO y 20 ha para CNE. La distancia promedio entre poblaciones fue de 9 km. Algunas características de los árboles colectados se presentan en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Información de los árboles colectados en bosques de *Pinus greggii* var. *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Clave del sitio	Árboles colectados / datados	Árboles vivos y muertos datados (%)
TVE	29/25	72/28
CNO	50/44	25/75
CNE	30/30	40/60

TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro

1.4.4 Métodos de laboratorio

Las muestras de cicatrices se analizaron en el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Gómez Palacio, Durango; éstas se pulieron con una secuencia de lijas de grano grueso a fino, de calibres de 60 al 1200. Para visualizar los anillos de crecimiento, se utilizó un estereoscopio Olympus® de 10x de aumento, y se determinó el año de ocurrencia del incendio mediante la datación de los anillos al año exacto de su formación; para esto, se usó el principio del fechado cruzado, que permite datar los crecimientos anuales mediante la similitud de patrones de crecimiento, y facilita la corrección en el datado por la presencia de anillos perdidos o falsos, microanillos o problemas de crecimiento derivados del daño del incendio; en el caso de árboles vivos, el primer anillo

datado fue el ubicado junto a la corteza (Stokes & Smiley, 1968; Baisan & Swetnam, 1990).

Para el fechado de muestras de árboles muertos, se utilizó la técnica “skeleton plot”, que consiste en construir gráficos de crecimiento en papel milimétrico. En éstos, los anillos más delgados se representan con líneas verticales por década, el tamaño de la línea está en función del ancho de los anillos, enfatizando los anillos más pequeños con un tamaño de línea relativamente mayor, y señalando con una flecha el anillo de la cicatriz de fuego (Stokes & Smiley, 1968). Se determinó el año de muerte del árbol y los años en que se presentaron cicatrices de incendios, al compararlos con un gráfico compuesto (cronología maestra) (Baisan & Swetnam, 1990; Agee, 1993; Dieterich & Swetnam, 1984); esta cronología de anillo total de *P. greggii* se dató y estandarizó acorde a la metodología convencional utilizada por el Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad de Arizona (Holmes, 1983; Cook, 1987).

La época de ocurrencia de los incendios se determinó al ubicar la cicatriz dentro del anillo 3 de crecimiento (Baisan & Swetnam, 1990). De esta manera, se determinaron cinco períodos o clases de ubicación del incendio: inicio de la madera temprana (EE), mitad de la madera temprana (ME), final de la madera temprana (LE), madera tardía (L) y dormancia (D). La época de ocurrencia del incendio se definió al agrupar las categorías en los periodos de primavera (D + EE) y verano (ME + LE + L) (Grissino-Mayer, 2001).

1.4.5 Análisis de datos

Los registros de incendios y estacionalidad se analizaron con el programa FHAES (*Fire History Analysis and Exploration System*) versión 2.0.2 (Brewer *et al.*, 2016). Se

realizaron cronologías de incendios por sitio de estudio (Heinselman, 1973), y se utilizaron los siguientes estadísticos descriptivos: intervalo medio de frecuencia de incendios (MFI, por sus siglas en inglés), intervalo de frecuencia mínimo y máximo (MinFI y MaxFI, por sus siglas en inglés) e intervalo de mediana de probabilidad de Weibull (WMPI, por sus siglas en inglés).

La mediana de probabilidad de Weibull sirve para modelar distribuciones asimétricas o no normales de intervalos de fuego, lo que es útil para que los resultados sean menos sensibles a largos intervalos de ocurrencia de incendios, lo que le convierte en un estimador de tendencia central robusto (Grissino-Mayer *et al.*, 1994; Grissino-Mayer, 2001; Brewer *et al.*, 2016). El periodo de análisis de cada localidad se presenta en el Cuadro 1.2.

Todos los estadísticos mencionados se obtuvieron también para el periodo 1998-2019, ya que fue a partir de 1998 que el programa de protección contra incendios comenzó a ser recurrente, tanto en México como en el sureste de Coahuila. Los estadísticos de frecuencia de incendios se analizaron con base en los siguientes filtros: 1) todos los registros de incendios en todas las cicatrices, 2) 10 % de registros, que incluye los años de incendios marcados en 10% de las muestras y 3) 25 % de registros, que se refiere a los incendios presentes en $\geq 25\%$ de las muestras. El filtro es un indicador relativo del tamaño del incendio, y es utilizado para identificar años con incendios extensos; los filtros del 10 y 25 % son indicadores de incendios relativamente extensos, por tanto, el uso de todos los registros de incendios indica incendios localizados que provocaron cicatrices en pocos árboles (Swetnam & Baisan, 1996; Farris *et al.*, 2010).

1.4.6 Relación clima-incendios

El análisis de la relación del clima con la ocurrencia de incendios en las tres localidades, se realizó con la subrutina Análisis de Sobreposición de Época (SEA, por sus siglas en inglés) en el programa FHAES versión 2.0.2 (Brewer *et al.*, 2016). Esto ayudó a determinar qué tan intensa era la relación de patrones climáticos con la ocurrencia de incendios a través de todos los registros de incendios, eventos con sincronía en dos o más poblaciones, e incendios ocurridos en eventos de ENSO intensos, al considerar cinco años previos y dos años posteriores al incendio. Para evaluar la significancia estadística, se calcularon los intervalos de confianza al 95 % de confiabilidad, utilizando métodos de simulación (bootstrapping) con 1000 repeticiones de datos climáticos, para garantizar niveles robustos de confianza (Grissino-Mayer, 2001; Meunier *et al.*, 2014).

Este análisis utiliza dos cronologías: 1) registros de años de incendios determinados con el datado de cicatrices y, 2) una serie climática que abarque el periodo de registros de incendios. El SEA es un método estadístico que compara las condiciones climáticas con los registros de incendios, a través de una sobreposición de datos climáticos promedios antes y en el año del incendio (Grissino-Mayer, 2001).

Como proxy del clima, se utilizaron series de varios índices de circulación global y de sequía, los cuales fueron: Índice de Oscilación del Sur (SOI) de invierno (1706-1977) (Stahle *et al.*, 1998), Niño región 3.4 para diciembre-febrero (1950-2021) (NOAA, 2021a), Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) anual (1856-2020) (Enfield *et al.*, 2001), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) anual (1854-2021) (NOAA, 2021b), Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) de junio-agosto (1400-2012) del Atlas de Sequía

Mexicano (MXDA por sus siglas en inglés) (Stahle et al., 2016), e Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) para diciembre-febrero (1902-2018) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Cada índice se analizó por separado con los años de incendios reconstruidos para cada sitio de estudio, para así identificar las condiciones climáticas locales y regionales presentes durante los incendios reconstruidos en los bosques de *Pinus greggii* de la Sierra de Zapalinamé.

1.5. RESULTADOS

1.5.1 Régimen de incendios

De un total de 109 árboles con cicatrices de incendios en los tres sitios, se dataron 99 (90.8 %), 95 de *Pinus greggii* y cuatro de *Pinus arizonica*; no fue posible la datación de diez árboles restantes debido a la descomposición de la madera y presencia de anillos de crecimiento suprimidos e irregulares. Para TVE se dataron 25 muestras con 43 cicatrices y 29 registros de incendios; en la Figura 1.2 se presenta la reconstrucción de la historia de incendios del periodo 1800-2019 (219 años) para TVE. El incendio más antiguo registrado ocurrió en 1840, y el más reciente en 2007 (Cuadro 1.3).

Las muestras más longevas se obtuvieron de árboles vivos de *Pinus arizonica*, con 218 años, y los incendios más antiguos antes de 1900 fueron registrados por las tres muestras de esta especie. En contraste, *Pinus greggii* registró incendios a partir de 1918 y los árboles vivos más longevos fueron de 113 años (Figura 1.2).

Los estadísticos descriptivos de frecuencia de incendios para TVE, con base en todas las cicatrices de incendio, indican un MFI = 5.96 y un WMPI = 4.76 años, con un intervalo de 1 a 25 años. En el periodo 1998-2019, esta frecuencia aumentó, con un valor de MFI = 2.33 años y WMPI = 2.21 años (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Intervalos medios de frecuencia incendios en tres sitios, en bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila

Sitio	Periodo de análisis	Categoría de análisis	MFI	Intervalo de frecuencia mínimo	Intervalo de frecuencia máximo	WMPI
TVE	1800-2019	Todas las	5.96	1	25	4.76
	1998-2019	cicatrices	2.33	1	4	2.21
CNO	1859-2019	Todas las	3.47	1	9	3.05
	1998-2019	cicatrices	3.67	1	5	3.42
CNE	1784-2019	Todas las	5.27	1	27	4.18
	1998-2019	cicatrices	--	--	--	--

MFI: Intervalo medio de frecuencia de incendios, WMPI: Intervalo mediana de probabilidad de Weibull.

Para el sitio CNO se dataron muestras de 44 árboles, con 54 cicatrices y 33 incendios (Cuadro 1.3); en este sitio, se reconstruyó la historia de incendios del periodo 1859-2019 (160 años), el incendio más antiguo ocurrió en 1901 y el más reciente en 2012, con un periodo libre de incendios de 41 años (*i.e.* de 1859-1900) (Figura 1.3). No se observaron cambios en la frecuencia de incendios en CNO de 1998-2019, con respecto al periodo 1859-2019 (Cuadro 1.2).

En el sitio CNE se dataron muestras de 30 árboles, con 44 cicatrices y 34 incendios (Cuadro 1.3) por lo que se reconstruyó la historia de incendios de los últimos 235 años (1784-2019). El incendio más antiguo se registró en 1840 y el más reciente en 2014, y se observó un periodo de 56 años sin incendios (1784-1939) (Figura 1.4). La frecuencia de incendios en CNE disminuyó de 1998-2019 con respecto al periodo 1784-2019 (Cuadro 1.2). El análisis de la frecuencia de incendios, con filtros de 10 % y 25 % del total de cicatrices, no implicó cambios en los estadísticos obtenidos, debido en parte al bajo número de incendios, lo que sugiere que los incendios fueron localizados, pequeños y no se extendieron a los otros sitios.

Cuadro 1.3. Historia de incendios en poblaciones de *Pinus greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Sitio	Número de incendios	Número de cicatrices	Primera cicatriz (año)	Última cicatriz (año)	Periodo sin incendios
TVE	29	43	1840	2007	1800-1839, 1919-1942
CNO	33	54	1901	2012	1859-1900
CNE	34	44	1840	2014	1784-1939

TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro.

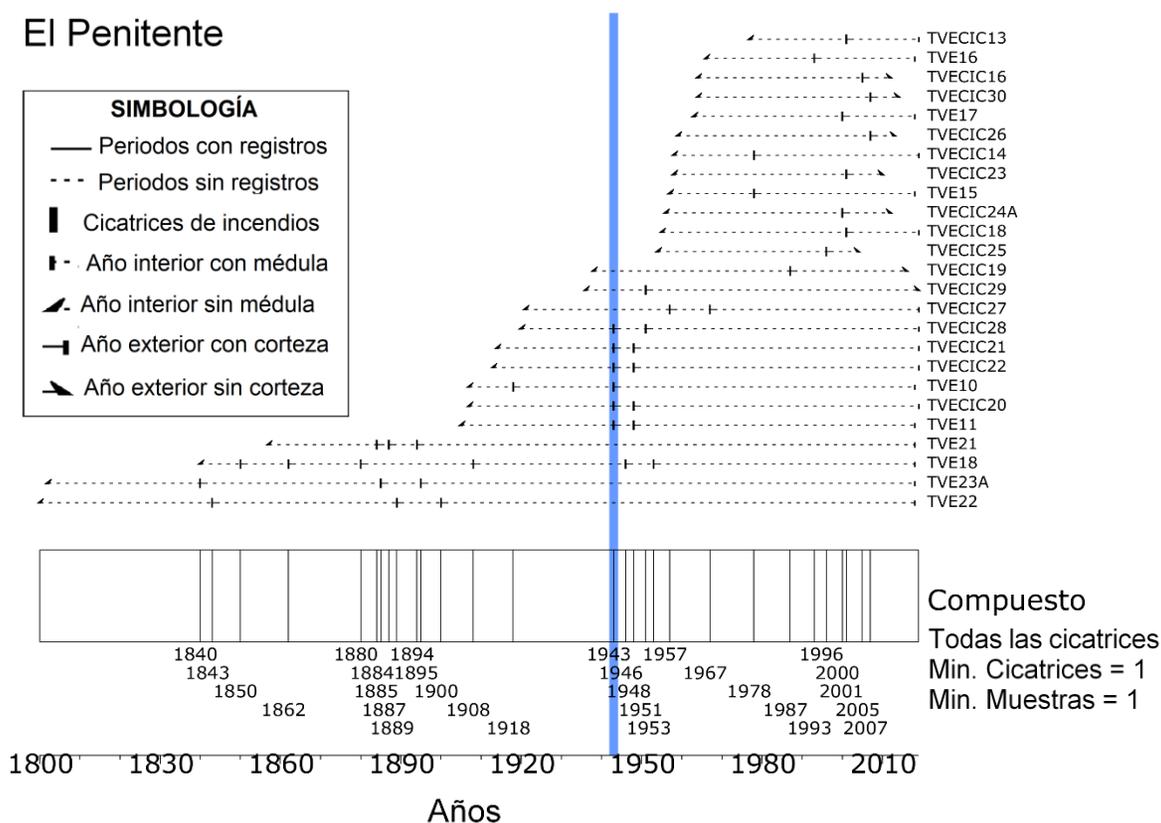


Figura 1.2. Historia de incendios en la población de *Pinus greggii* var. *greggii*, sitio El Penitente (TVE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las líneas horizontales discontinuas indican la línea de tiempo de cada árbol, las cuales muestran las cicatrices de incendios en pequeñas barras verticales. Los años de ocurrencia de todos los incendios se presentan en la parte inferior del gráfico. La línea azul indica el incendio que cicatrizó más árboles.

Cañón de las Norias

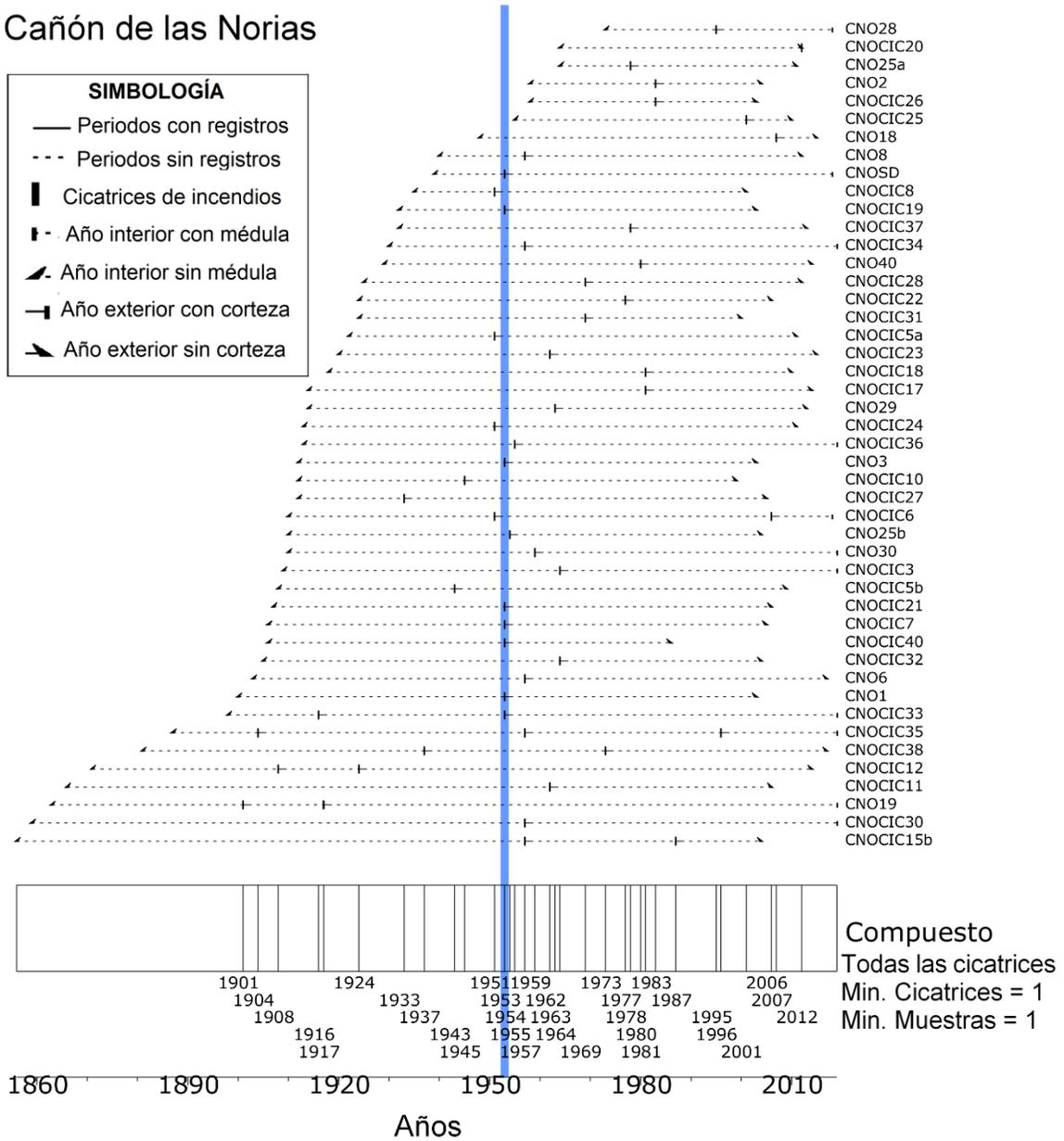


Figura 1.3. Historia de incendios en la población de *Pinus greggii* var. *greggii* en el sitio Cañón de las Norias (CNO), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las líneas horizontales discontinuas indican la línea de tiempo de cada árbol, las cuales muestran las cicatrices de incendios en pequeñas barras verticales. Los años de ocurrencia de todos los incendios se presentan en la parte inferior del gráfico. La línea azul indica el incendio que cicatrizó más árboles.

Cañón del Negro

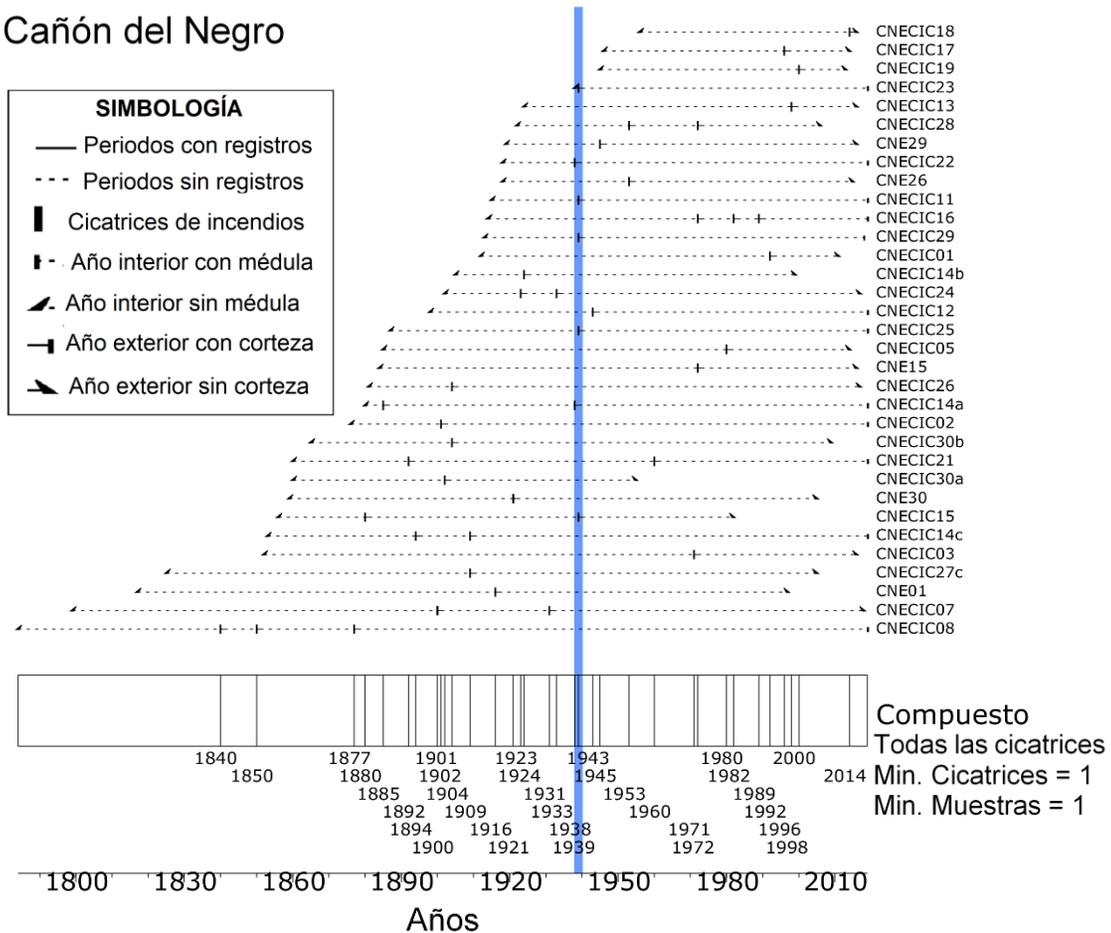


Figura 1.4. Historia de incendios en la población de *Pinus greggii* var. *greggii* en el sitio Cañón del Negro (CNE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las líneas horizontales discontinuas indican la línea de tiempo de cada árbol, las cuales muestran las cicatrices de incendios en pequeñas barras verticales. Los años de ocurrencia de todos los incendios se presentan en la parte inferior del gráfico. La línea azul indica el incendio que cicatrizó más árboles.

1.5.2 Estacionalidad de los incendios

La estacionalidad se determinó para 68 % de las cicatrices de incendios (Cuadro 1.4). El 62.5 % de incendios se registró al inicio de la madera temprana, 18.3 % a mitad de la madera temprana y 19.1 % en la madera tardía. No se registraron incendios durante el periodo de dormancia, por lo cual se deduce que 62.5 % de los incendios se presentó en primavera y 37.5 % en verano. Así, la mayor cantidad de incendios se presentó entre

marzo y finales de junio para TVE y CNE, y 55.9 % de éstos ocurrieron en verano en CNO.

Cuadro 1.4. Estacionalidad de los incendios con base en la posición de las cicatrices de fuego en el anillo de crecimiento, para las tres poblaciones analizadas de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Sitio	Estación determinada	Estación indeterminada					Incendios de primavera	Incendios de verano
			D	EE	ME	L		
TVE								
Número (n)	35	8	0	26	7	2	26	9
%	81.4	18.6	0	74	20	5.7	74.3	25.7
CNO								
Número (n)	34	20	0	15	8	11	15	19
%	63	37	0	44	24	32	44.1	55.9
CNE								
Número (n)	26	18	0	18	3	5	18	8
%	59	41	0	69	12	19	69.2	32

D= dormancia; EE= inicios de la madera temprana; ME= mitad de la madera temprana; LE= final de la madera temprana; L= madera tardía. D+EE= incendios de primavera; ME+LE+L= incendios de verano; TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro.

1.5.3 Sincronía de incendios

En total en los tres sitios se dataron 69 incendios, de los cuales 24 ocurrieron en dos o más sitios de manera simultánea. Los incendios ocurridos en los años 1943, 1953 y 1996 presentaron sincronía en las tres poblaciones analizadas (Figura 1.5).

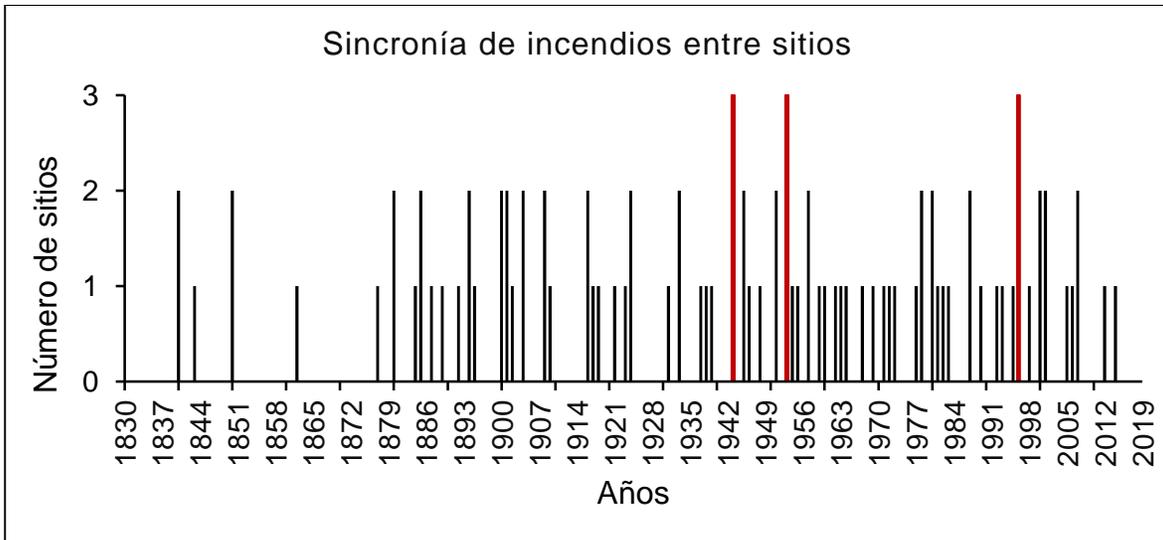


Figura 1.5. Sincronía de incendios entre sitios, en bosques de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las barras en rojo indican años de incendios en los tres sitios.

En TVE, los incendios de 1943, 1948 y 2001 fueron los de mayor sincronía al cicatrizar seis, cuatro y tres muestras, respectivamente. En CNO, los incendios de 1951, 1953 y 1957 fueron los que cicatrizaron más árboles con cuatro, ocho y seis muestras, respectivamente; en CNE, los incendios de 1939 cicatrizaron cinco muestras, y los de 1972 tres (Figura 1.6). Se aprecia que los años con mayor sincronía indican incendios relativamente extensos, aunque los incendios pequeños fueron frecuentes en los tres sitios.

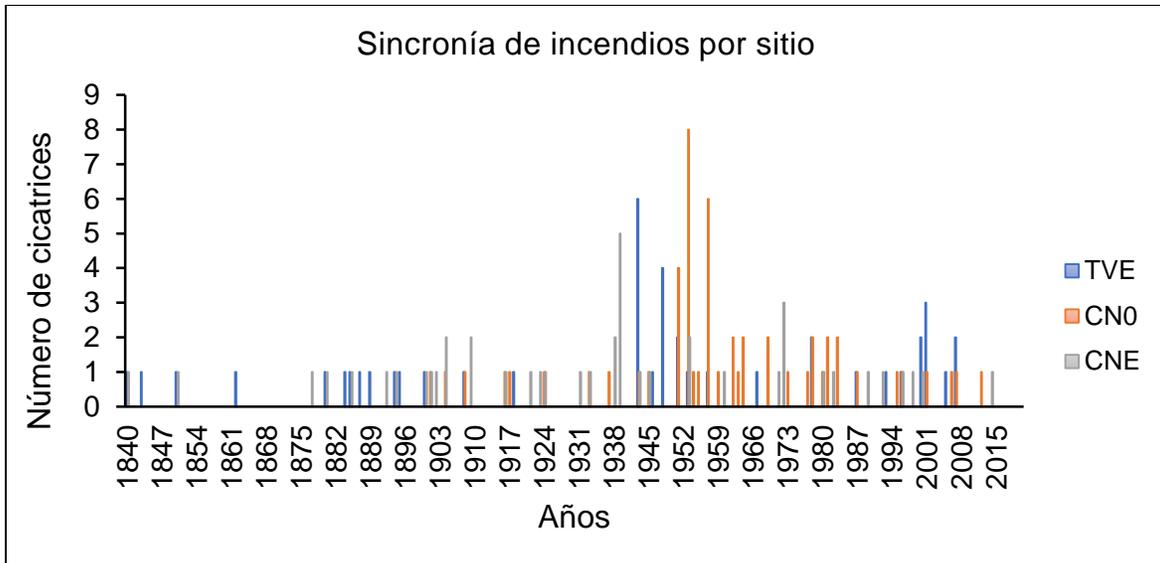


Figura 1.6. Sincronía de incendios por sitio, en bosques de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

El número mayor de incendios en TVE se presentó en los periodos 1880-1900, 1940-1960, y de 1990-2010. En CNO, los incendios ocurrieron principalmente de 1950-1990, mientras que, en CNE, los incendios son consistentes de 1900-1950 y de 1990-2000. La mayor cantidad de incendios en CNE y TVE comenzó a partir de la década de 1880, mientras que en CNO los incendios iniciaron en 1900 (Figura 1.7).

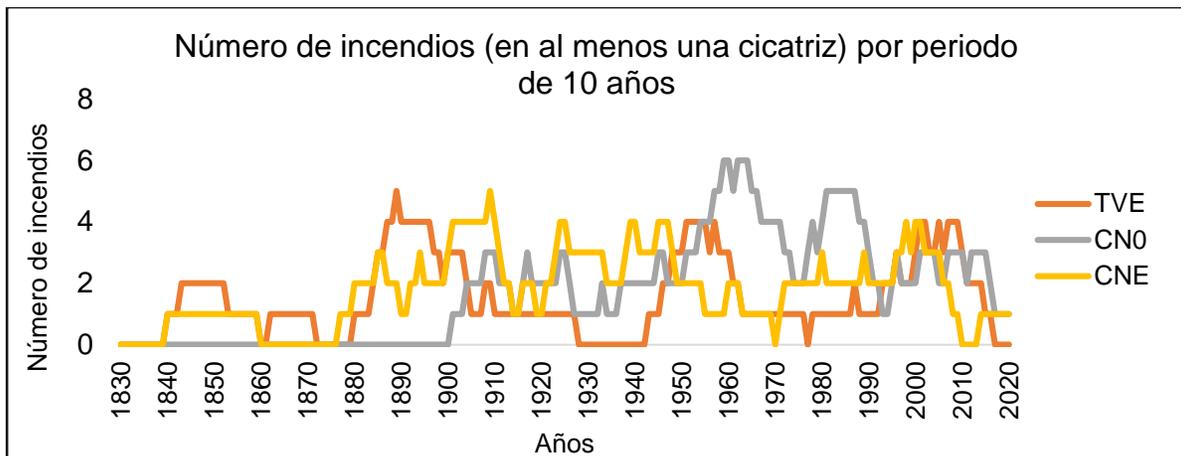


Figura 1.7. Número de incendios por periodo de 10 años por sitio, en bosques de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

La Figura 1.8 muestra el número de cicatrices por década, las líneas más altas en el gráfico representan mayor extensión de los incendios. En TVE, los incendios más extensos ocurrieron en la década de 1940-1960, en CNO se presentaron entre 1950-1970, y en CNE en la década de 1940-1950.

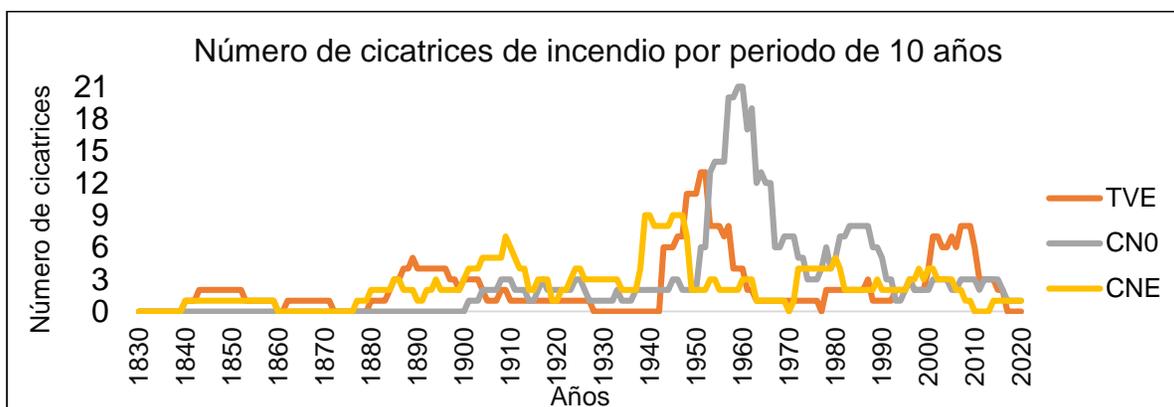
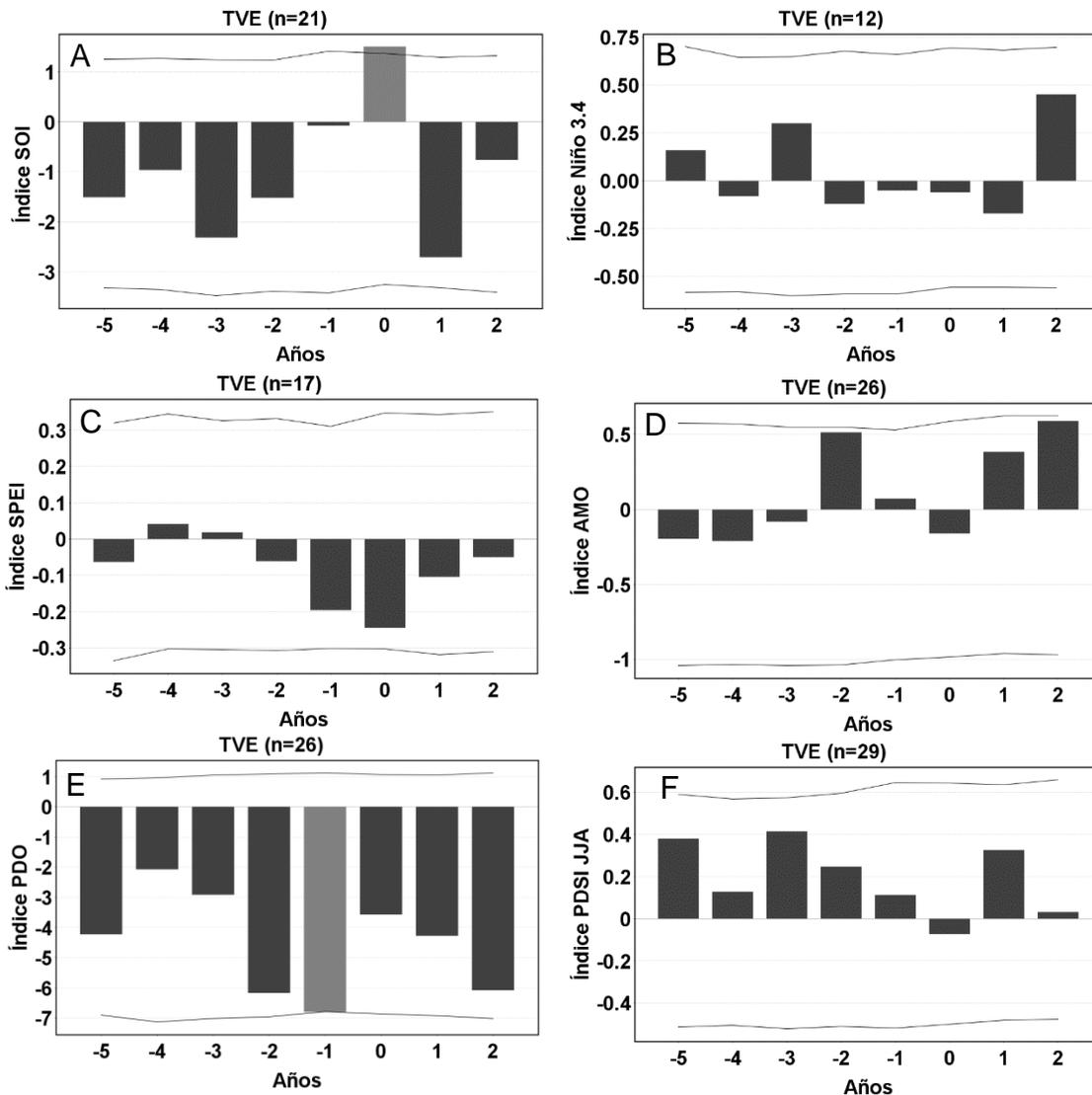


Figura 1.8. Número de cicatrices de incendio por periodo de 10 años en tres sitios, en bosques de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

1.5.4 Relación clima-incendios

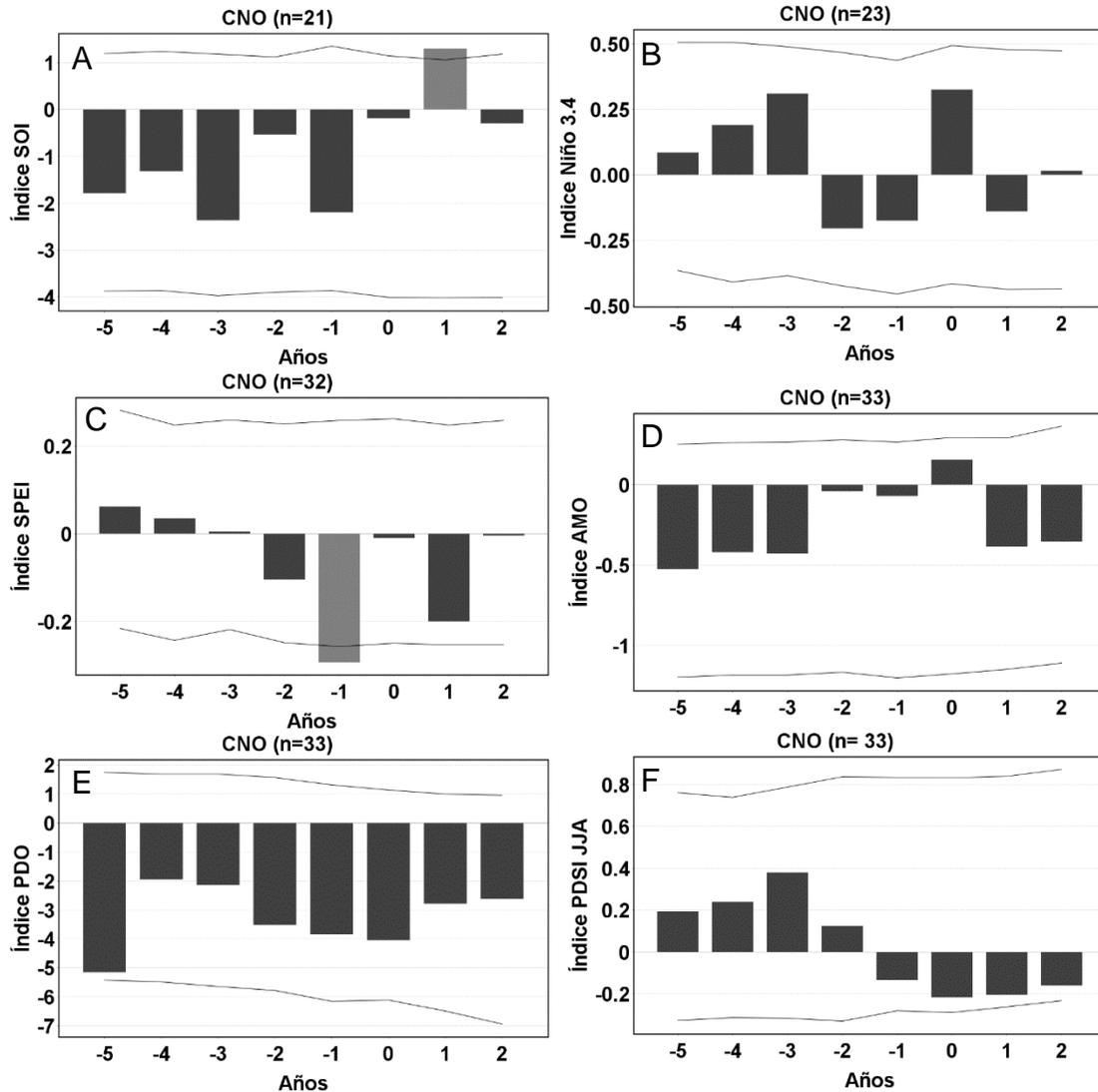
El análisis SEA indicó que los incendios reconstruidos para el bosque de *Pinus greggii* en el sitio TVE, ocurrieron de manera significativa ($p < 0.05$) durante un año seco, con valores positivos (La Niña) del índice SOI de invierno (diciembre, enero y febrero) (Figura 1.9 A). Esta relación se corrobora con la fase fría La Niña del índice Niño 3.4 de invierno, SPEI de invierno, AMO anual, PDO anual e índice PDSI (junio, julio, agosto) de verano, aunque estos no fueron significativos ($p > 0.05$) (Figura 1.9 B, C, D, E y F), excepto PDO anual, que fue significativo un año previo al incendio ($p < 0.05$) (Figura 1.9 E). Los índices Niño 3.4, AMO, y PDSI muestran valores positivos dos y tres años previos al incendio, asociados a condiciones húmedas, aunque no significativas (Figura 1.9 B, D, F).



(0 = año del incendio)

Figura 1.9. Análisis SEA para el bosque de *Pinus greggii*, en El Penitente (TVE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos y los números positivos representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.

El análisis SEA para el sitio CNO indica que los incendios ocurrieron con valores negativos del índice SOI de invierno, fase cálida del Niño 3.4 de invierno y fase cálida de AMO anual, que se asocian con lluvias por encima del promedio para el norte de México, aunque en este caso no fueron significativos ($p > 0.05$) (Figura 1.10 A, B y D). En contraste, el SPEI promedio de la estación invernal, PDO anual y PDSI de verano, muestran que los incendios se presentaron en años secos, aunque los valores no fueron significativos ($p > 0.05$) (Figura 1.10 C, E y F). El índice SPEI de invierno, indica que un año previo al incendio fue significativamente seco ($p < 0.05$) (Figura 1.10 C); los índices PDSI de verano y Niño 3.4 de invierno indican que existe una relación positiva de humedad por arriba del promedio tres años previos al incendio, si bien ésta no es significativa ($p > 0.05$) (Figura 1.10 B y F).



(0 = año del incendio)

Figura 1.10. Análisis SEA en el bosque de *Pinus greggii* en Cañón de las Norias (CNO), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos y los números positivos, representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.

El análisis SEA para el sitio CNE indica que los incendios se presentaron en años secos, con valores positivos del índice SOI de invierno, fase cálida del Niño 3.4 de invierno y fase cálida del índice AMO anual, con inviernos secos generados por la fase fría La Niña, aunque no significativos ($p > 0.05$) (Figura 1.11 A, B y D); esto además, se corrobora con

valores negativos de índices SPEI de invierno, PDO anual y PDSI de verano, aunque éstos no son significativos ($p > 0.05$) (Figura 1.11 C, E y F).

Para este sitio, se determinó que de 1 a 3 años previos al año del incendio dominaron valores negativos del índice SOI de invierno y positivos Niño 3.4 de invierno; sin embargo, valores positivos de PDSI de verano, indican una relación positiva con humedad por arriba del promedio, si bien esta relación no fue significativa ($p > 0.05$); además, valores negativos de PDO, indican sequías un año previo, aunque dicha relación no fue significativa ($p > 0.05$) (Figura 1.11 A y E).

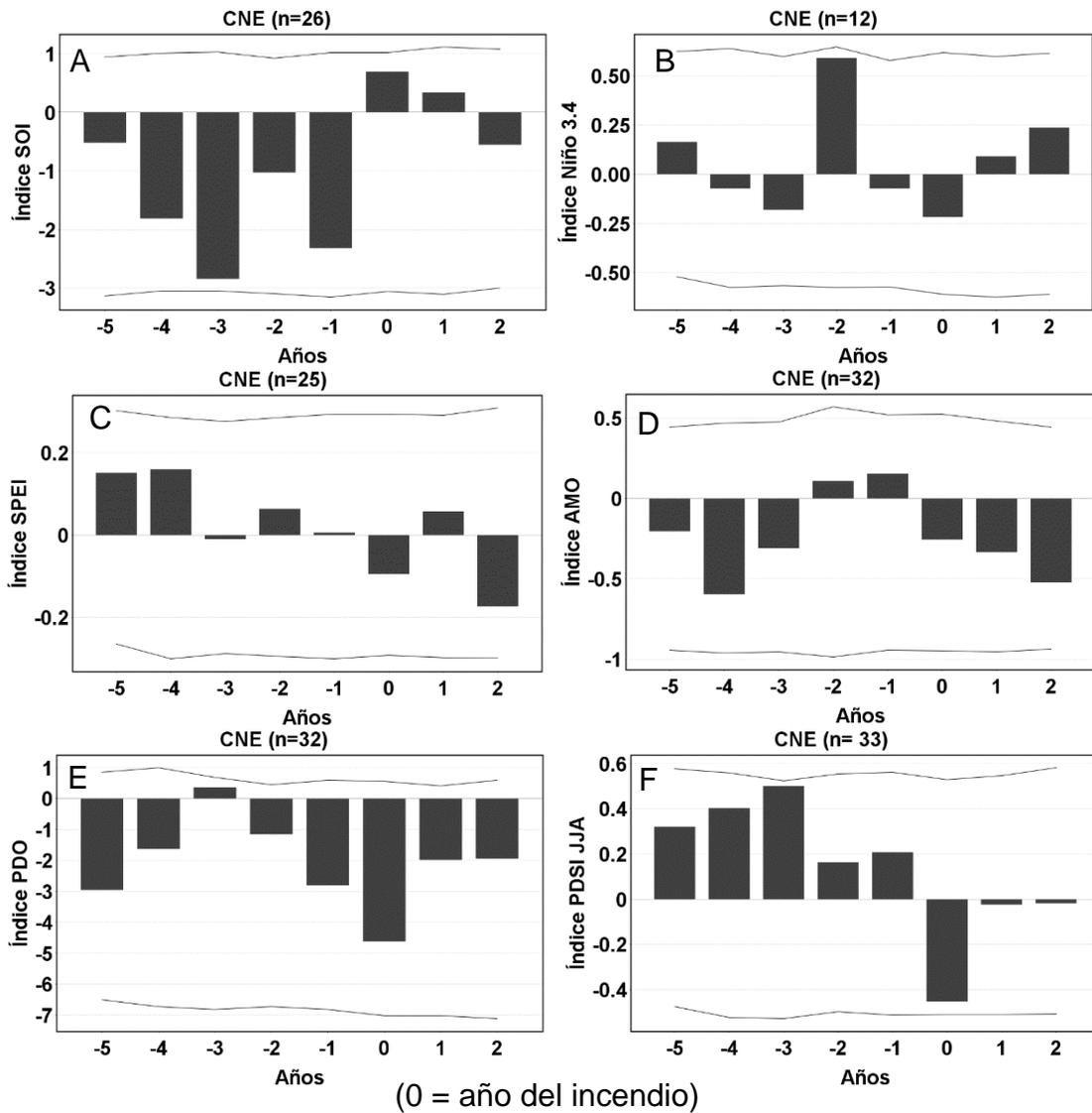
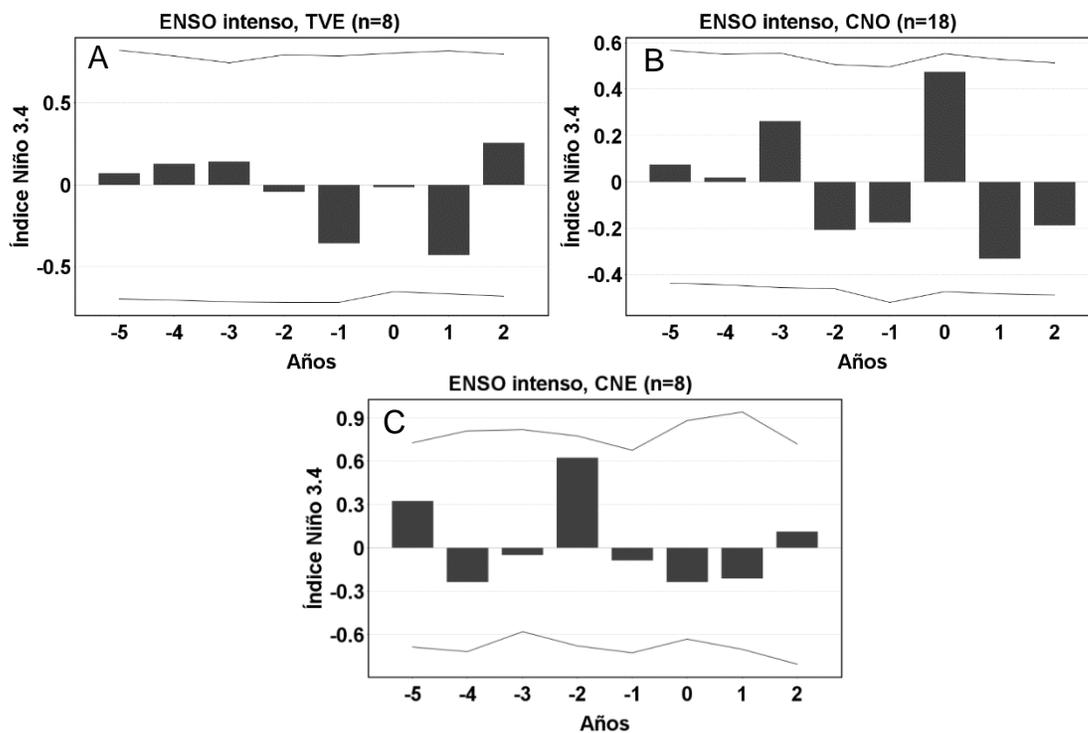


Figura 1.11. Análisis SEA para el bosque de *Pinus greggii*, en Cañón del Negro (CNE), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos, y números positivos representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.

1.5.4.1 Incendios y su relación con eventos El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

En los sitios TVE y CNE, la relación de eventos extremos de ENSO en el período invernal con el año del incendio no mostró significancia ($p > 0.05$); sin embargo, estos eventos ocurrieron durante la fase fría de La Niña (Figura 1. 12 A y C). En el sitio CNO, los incendios se presentaron en la fase cálida (El Niño), que indica humedad por arriba de la media para el norte de México ($p > 0.05$) (Figura 1. 12 B). En los tres sitios dominaron condiciones secas un año previo al incendio, aunque en el sitio CNE, se presentaron condiciones húmedas dos años previos al incendio, aunque no de manera significativa ($p > 0.05$) (Figura 1.12 C).



(0 = año del incendio)

Figura 1.12. Influencia de eventos intensos de ENSO ($\text{Niño } 3.4 \pm 0.5$) en los incendios ocurridos en los tres sitios de estudio: A) TVE, B) CNO y C) CNE con dominancia de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

1.5.4.2 Relación del clima con la ocurrencia de incendios regionales

Se encontró sincronía para 24 registros de incendios que se presentaron de manera simultánea en dos o más sitios de la Sierra de Zapalinamé. Los índices climáticos de circulación global (SOI de invierno, Niño 3.4 de invierno, AMO anual y PDO anual) e índices de sequía (SPEI de invierno y PDSI de verano) indican que los incendios ocurrieron en años secos, en los que la fase fría (La Niña) favoreció dicho comportamiento; no obstante, esta relación no fue significativa ($p > 0.05$) (Figura 1.13 A, B, C, D, E y F).

El índice SPEI de invierno se clasificó como seco un año previo al incendio ($p < 0.05$) (Figura 1.13 C); esto se corrobora con valores negativos del Niño 3.4 durante el invierno (un año previo al incendio) y PDO anual, aunque estas relaciones no fueron significativas ($p > 0.05$) (Figura 1.13 B, E y F).

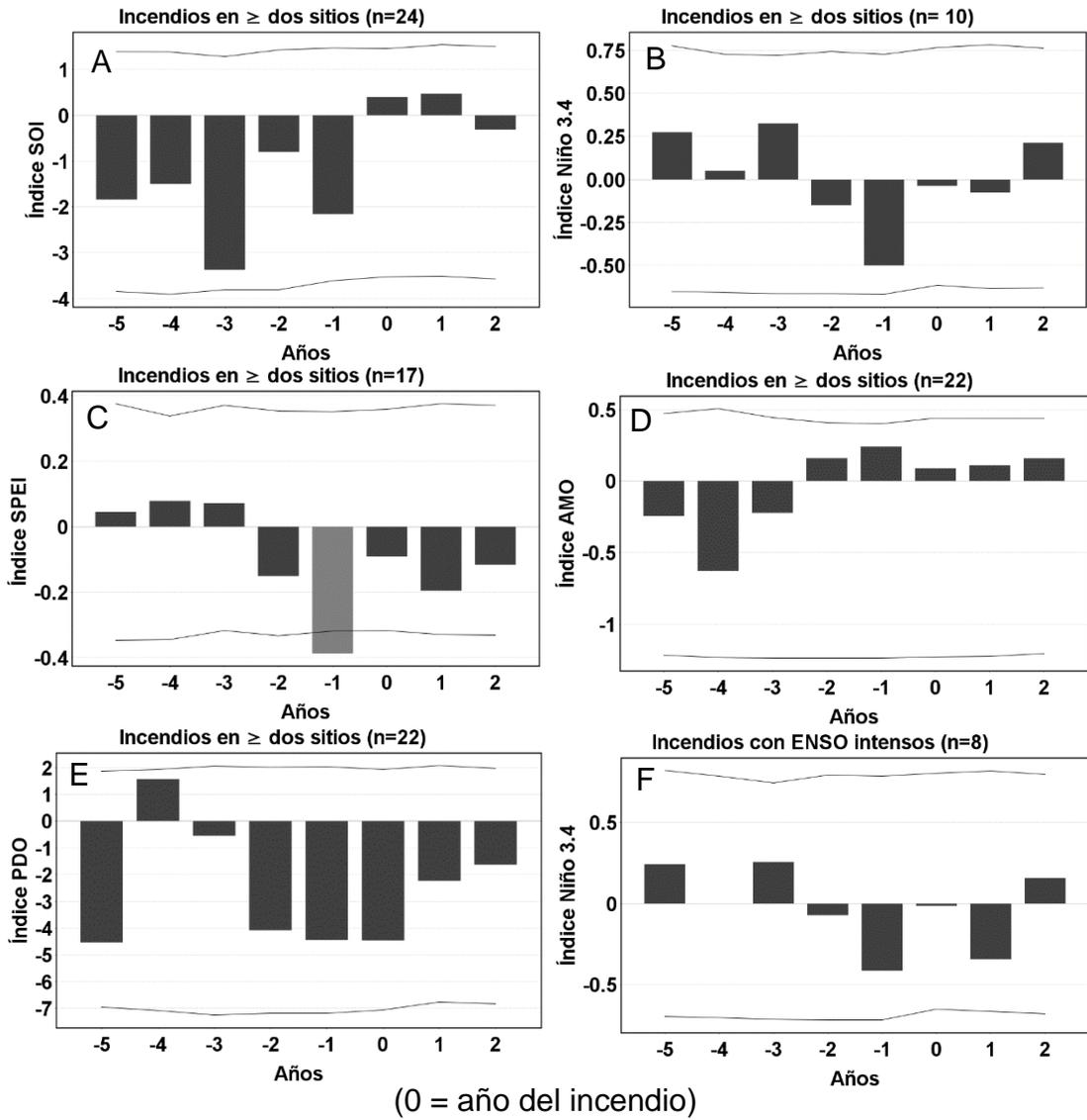


Figura 1.13. Análisis SEA con los índices SOI (A), Niño 3.4 (B), SPEI (C), AMO (D), PDO (E) y ENSO intensos (F) con 24 incendios que tienen sincronía en dos o más sitios en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Los números negativos en el eje X indican los años previos, y los números positivos representan años posteriores al incendio. Las líneas inferior y superior señalan el intervalo de confianza al 95%. Las barras que interceptan las líneas son significativas.

1.6 DISCUSIÓN

1.6.1 Régimen de incendios

Con base en el análisis de todas las cicatrices, se determinó que los incendios en los tres sitios se caracterizan por ser frecuentes, con valores de MFI de 5.96 años para TVE, 3.47 para CNO, y 5.27 en CNE, y con un WMPI de 4.76 (TVE), 3.05 (CNO) y 4.18 (CNE); a su vez, los intervalos medios de frecuencia y mediana de Weibull fueron inferiores a 10 años, resultados semejantes a lo reportado en Sierra Peña Nevada, Nuevo León, en bosques de *Pinus hartwegii* con MFI de 8.6-9.6 años (Yocom *et al.*, 2010) y Maderas del Carmen, Coahuila, con un MFI de 4.4-9 años (Poulos *et al.*, 2013).

Al utilizar el filtro del 25 % de las cicatrices para identificar incendios extensos, no se observaron cambios en los estadísticos con respecto al total de cicatrices; al respecto, Poulos *et al.* (2013) mencionan que la mayoría de incendios no cicatrizaron $\geq 25\%$ de los árboles en Maderas del Carmen, Coahuila, por lo que los incendios pequeños suelen ser frecuentes, característica que se encontró en los tres sitios analizados de la Sierra de Zapalinamé.

En las tres localidades analizadas, la mayoría de los incendios ocurrió en primavera, excepto en CNO donde ocurrieron en verano. La dominancia de incendios en primavera se explica porque en esta época se presentan las temperaturas más altas y humedad relativa más baja. Este resultado indica que la época de incendios en esta región es similar a la que se presenta en bosques de coníferas del municipio de Tepehuanes, Durango (Cerano-Paredes *et al.*, 2019) y del sureste de Coahuila (Yocom *et al.*, 2014), explicados también por temperaturas y disponibilidad de combustibles. En cambio, los

incendios ocurridos en verano en CNO son probablemente causados por actividades humanas (Yocom *et al.*, 2014), y aunque no se cuenta con información que sustente que la estacionalidad es debida a esta causa, existen asentamientos humanos en las partes bajas de los sitios, además de que CNE y CNO cuentan con caminos de acceso, por lo que es factible conjeturar su influencia.

Los periodos libres de incendios, esto es de 1919-1942 para TVE, de 1859-1900 para CNO y de 1784-1939 para CNE, podrían estar relacionados con la extracción de alrededor de 813 mil árboles en el periodo de 1883-1905, para durmientes de ferrocarril de los tramos Monterrey-Saltillo, Torreón-Saltillo y Saltillo-Concepción del Oro (Valdés *et al.*, 2017). Además, el pastoreo de ovejas y cabras, y la extracción de leña para uso comercial, posiblemente contribuyeron a la disminución de combustibles evitando la propagación del fuego (Heyerdahl *et al.*, 2001 y 2003; Sakulich & Taylor, 2007; Poulos *et al.*, 2013).

En otros sitios dentro de la Sierra Madre Oriental, al sureste de Coahuila, se ha documentado que la interrupción de los incendios ocurrió entre 1887-1962 (Yocom *et al.*, 2014), en Peña Nevada, Nuevo León, inició a partir de 1920 (Yocom *et al.*, 2010) y en Maderas del Carmen, Coahuila a partir de las décadas de 1930-1950 (Poulos *et al.*, 2013). Dicha interrupción se relacionó con actividades humanas, como el pastoreo de cabras y ovejas, y la creación de ejidos (Yocom *et al.*, 2010; Cortes-Montaña *et al.*, 2012; Poulos *et al.*, 2013; Yocom *et al.*, 2014 y 2017). Sin embargo, periodos libres de fuego en la Sierra de Zapalinamé antes de 1900, pueden atribuirse a la eliminación de cicatrices por incendios de alta severidad (Forrestel *et al.*, 2017) o al aprovechamiento de la madera quemada residual por pobladores de las comunidades cercanas.

En general, los incendios registrados en cada sitio presentaron baja sincronía, lo cual sugiere que la mayoría han sido pequeños en extensión; lo anterior se explica porque, dado que la propagación de los incendios está asociada con la humedad atmosférica que influye en la humedad de los combustibles, la propagación del fuego se limita (Farris *et al.*, 2010; Yocom & Fulé, 2012; Poulos *et al.*, 2013; Forrestel *et al.*, 2017).

1.6.2 Cambios en la frecuencia de incendios después de 1998

Los resultados sugieren que la disminución de la frecuencia de incendios en CNE, en parte se debe a las actividades humanas como el pastoreo de cabras, ovejas y de ganado bovino; además, la supresión de incendios de origen natural desde 1998 con la integración de la brigada comunitaria de combate de incendios que se localiza a 2.5 km del sitio, ha sido un factor determinante. Estas posibles causas son consistentes con estudios realizados en otros sitios de la Sierra Madre Oriental, aunque la disminución de la frecuencia inició a mitad del siglo XX (Yocom *et al.*, 2010; Poulos *et al.*, 2013).

Estas causas y la temporalidad de disminución de la frecuencia de incendios también han ocurrido en bosques de coníferas de la Sierra Madre Occidental (Durango y Chihuahua) (Heyerdahl & Alvarado, 2003), noroeste de Durango (Fulé & Covington, 1997), Sierra Mohinora, Chihuahua (Cerano-Paredes *et al.*, 2010) y Tepehuanes, Durango (Cerano-Paredes *et al.*, 2019).

En CNO la frecuencia se ha mantenido, aunque no se cuenta con evidencias de las posibles causas. El incremento de la frecuencia de incendios en TVE, posiblemente se debe a la variación natural del clima, como sucede en bosques de coníferas de la Sierra

Pan Duro, entre Sonora y Chihuahua (Meunier, Romme, et al., 2014), ya que TVE es un sitio con baja influencia humana debido a la falta de accesos y a su topografía abrupta.

1.6.3 Relación clima-incendios

Los incendios en cada sitio y a nivel región no se asociaron significativamente ($p > 0.05$) con patrones climáticos de circulación global e índices de sequía, excepto en el sitio TVE, donde los incendios ocurrieron con valores positivos del Índice SOI (fase Niña), que generan condiciones secas para invierno-primavera en el norte de México, similar a lo reportado por Fulé & Covington (1997) en bosques de coníferas del noroeste de Durango. Además, aunque no se encontró relación significativa entre los incendios de los sitios TVE, CNE y regionales, estos ocurrieron en la fase fría del Niño 3.4, lo que implica condiciones de sequía para el norte de México, donde además se presentaron valores negativos de PDO y AMO. Resultados similares se han reportado para incendios ocurridos a nivel regional en el norte de México (Molina-Pérez *et al.*, 2017; Yocom *et al.*, 2017), los cuales se han relacionado con condiciones invernales secas provocados por la fase fría de La Niña (Stahle *et al.*, 2012 y 2016). Sin embargo, los patrones climáticos de circulación global analizados, sugieren que los incendios en la Sierra de Zapalinamé se presentaron preferentemente en la fase neutra, en la cual las condiciones climáticas para esta región tienden a no ser tan extremas (Yocom & Fulé, 2012).

Un caso excepcional lo constituye el sitio CNO, donde valores negativos de SOI, positivos del Niño 3.4, positivos de AMO y eventos extremos de ENSO, no mostraron significancia con el año del incendio y se observó una tendencia a que estos ocurrieran en el verano, cuando las condiciones de humedad fueron más favorables (Cuadro 1.3). Este resultado

difiere del comportamiento general de los incendios, y de resultados previos de la influencia del clima en la presencia de incendios en las Sierras Madre Oriental y Occidental de México, donde los incendios ocurren en condiciones de sequía (Fulé & Covington, 1997; Cerano Paredes *et al.*, 2010; Yocom *et al.*, 2010, 2014 y 2017; Cerano-Paredes *et al.*, 2019). El comportamiento de los incendios en este sitio en particular, podría estar relacionado con la influencia de factores topográficos, debido a que el sitio se encuentra con dominancia en exposición norte, que recibe menor cantidad de insolación durante el día y por lo tanto favorece una menor evaporación (Schroeder & Buck, 1970; Rothermel, 1983); además, el sitio se encuentra en una cañada, rodeado por montañas que pudieron influir en este resultado; asimismo, la presencia de asentamientos humanos en la parte baja del sitio y con camino de acceso al rodal, sugiere que algunos de estos incendios pudieron haber sido provocados.

Meunier *et al.* (2014) también registraron un alto porcentaje de cicatrices de incendios en periodos húmedos durante el periodo de 1887-2003 en la Sierra San Luis en el norte de Sonora y Chihuahua. Esto también puede atribuirse a que las fases de La Niña y El Niño generaron condiciones secas en las últimas dos décadas del siglo XX y principios del XXI, las cuales pueden ser idóneas para la ocurrencia de incendios (Yocom *et al.*, 2010). Además, en los tres sitios de estudio e incendios a nivel región, dominaron condiciones secas un año previo al incendio, con valores negativos no significativos para TVE, valores negativos significativos de SPEI para CNO, y valores negativos no significativos para CNE; esto además se corrobora con la fase fría un año previo al incendio, durante eventos extremos de ENSO.

Sin embargo, en los tres sitios, dos a tres años previo al incendio, se observó una relación positiva, aunque no significativa, con la dominancia de condiciones húmedas asociadas con índices del Niño 3.4 de invierno, AMO anual y SOI de invierno, e índices de sequía (PDSI de verano). Al respecto, en un estudio realizado en la Sierra de San Luis, Sonora, se reporta que durante el periodo de 1887-2003, las condiciones de humedad por arriba del promedio antes del incendio podrían ser más importantes que condiciones de sequía en el año del incendio (Meunier *et al.*, 2014), debido a que la humedad propicia la producción de combustibles finos, que al secarse promueven la propagación del fuego (Baisan & Swetnam, 1990; Swetnam & Betancourt, 1998). En otros estudios también se ha reportado una relación positiva cuando dominan condiciones de humedad alta dos años previos al incendio (Baisan & Swetnam, 1990; Cerano-Paredes *et al.*, 2019). Por lo tanto, las condiciones climáticas antes del incendio en la Sierra de Zapalinamé, muestran una asociación con la ocurrencia de incendios, si bien ésta no siempre es significativa.

La falta de significancia derivada de la relación entre El Niño 3.4, eventos intensos del mismo fenómeno y la ocurrencia de incendios en los sitios de estudio, podría estar influenciada de actividades humanas (Yocom *et al.*, 2010 y 2014). En estudios dendroclimáticos para la Sierra de Zapalinamé, se ha reportado una baja influencia de índices de ENSO en la variabilidad climática interanual y multianual que ha caracterizado esta región, en particular posterior a 1914 (Villanueva *et al.*, 2009), así como una falta de asociación estadística entre la dominancia del clima y la presencia de incendios en el período de 1832-1978 en bosques mixtos del sureste de Coahuila (Yocom *et al.*, 2014) y de Peña Nevada, Nuevo León en el periodo 1830-1929 (Yocom *et al.*, 2010). Lo anterior apunta a que la relación de ENSO con los incendios de la zona no ha sido consistente a

través del tiempo, en parte quizás por las variaciones climáticas debidas al cambio climático que han enmascarado esta relación (Villanueva-Diaz *et al.*, 2009) o bien debido a la influencia humana (Yocom *et al.*, 2010; Poulos *et al.*, 2013; Yocom *et al.*, 2014).

Por otra parte, la influencia del huracán Hanna en 2020 en Coahuila favoreció la producción de combustibles finos, lo cual, seguido de condiciones secas (La Niña) del invierno 2020-2021 y descuidos humanos, pudo haber favorecido incendios de gran magnitud en el sureste de Coahuila en marzo y abril de 2021, aunque no con influencia directa del clima (SMN, 2021; NIFC, 2021). Los resultados de frecuencia, estacionalidad y su relación con el clima, fueron similares a los registrados en bosques de coníferas de la Sierra Madre Occidental, donde los incendios se presentan con una frecuencia menor a 10 años, y con mayor ocurrencia en primavera con los efectos de La Niña, así como relación positiva con condiciones de humedad dos años previos al incendio. A diferencia de los resultados de este estudio, en las sierras mencionadas se han presentado incendios relativamente extensos que cicatrizaron el 25 % de los árboles con una frecuencia que varía de 6-17 años (Fulé & Covington, 1997; Cerano Paredes *et al.*, 2010; Meunier *et al.*, 2014; Cerano-Paredes *et al.*, 2019).

Es posible que la frecuencia de incendios aumente en la Sierra de Zapalinamé debido a los cambios del clima; si la supresión activa de los incendios naturales continúa, estos podrían ocurrir con mayor extensión al crear un paisaje homogéneo (Covington & Moore, 1994; Fulé & Covington, 1997; Agee, 1998), con posibles efectos adversos para los bosques de *Pinus greggii* aun cuando la especie posee caracteres asociados con adaptación a incendios (e.g. conos serótinicos) (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2003). Por lo anterior, los gestores de recursos forestales de la Reserva Natural Estatal Sierra de

Zapalinamé, deben considerar la extensión y frecuencia de incendios dentro del régimen histórico, y realizar acciones que disminuyan las cargas de combustibles, para disminuir el riesgo de incendios catastróficos de alta severidad, y mantener los procesos naturales del bosque que conlleva beneficios ecológicos (Fulé *et al.*, 2005; Cerano-Paredes *et al.*, 2019).

Este trabajo muestra que la relación clima y régimen de incendios es compleja, por un lado, están los eventos climáticos globales y por otro, factores humanos asociados con el uso del suelo como pastoreo, recreación y en ocasiones, el cambio de uso de suelo. Sin embargo, a nivel general, los eventos circulatorios globales explican las tendencias, con una alternancia de periodos secos y húmedos que corresponden al régimen de incendios de un lugar. Además, los bosques presentan alternancia de periodos secos y húmedos por las estaciones del año. No obstante, el efecto favorable de los periodos húmedos está en función del almacenamiento de agua en el perfil del suelo y generalmente el beneficio no se extiende más allá de tres años. En cambio, los efectos negativos de un año seco, aún sin la presencia de incendios, se pueden prolongar hasta por 10 años (Castruita-Esparza *et al.*, 2019).

Se ha visto que después de un disturbio los bosques se recuperan en un lapso de cuatro años (Anderegg *et al.*, 2015) por lo que, mientras las frecuencias de incendios sean cercanas al tiempo de resiliencia del bosque, no habrá una recuperación total de la vegetación cuando ocurra otro incendio. Los resultados indican un lapso muy cercano entre la resiliencia promedio de un bosque y la frecuencia de incendios, por lo que, bajo estas condiciones, el ecosistema se irá degradando en forma progresiva si no hay un programa de gestión de incendios para la Sierra de Zapalinamé.

1.7 CONCLUSIONES

El análisis de los patrones de incendios en los tres sitios de estudio al incluir todas las cicatrices, indica que éstos han sido frecuentes y pequeños, con mayor ocurrencia en primavera, excepto en CNO donde ocurrieron en verano.

La ocurrencia de incendios para CNE y TVE se asoció a condiciones secas, mediante patrones climáticos de circulación global e índices de sequía; sin embargo, en TVE se relacionó de manera significativa con valores positivos del índice SOI de invierno, característicos de la fase fría de ENSO, pero que muestra baja influencia humana; así mismo, el sitio CNO se asoció con la fase cálida de ENSO, si bien la topografía y uso del suelo probablemente influyeron en la presencia de incendios. En los tres sitios se presentó una relación positiva de humedad por arriba del promedio dos años previos al incendio, y condiciones secas el año previo al incendio.

La frecuencia de incendios en las últimas dos décadas ha disminuido en CNE en parte atribuido a actividades humanas; se ha mantenido en CNO y ha aumentado en TVE, lo cual se asocia a variaciones climáticas.

1.8 LITERATURA CITADA

- Agee, J. K. (1993). Methods of evaluating forest fire history. *Journal of Northeast Forestry University*, 4(2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/BF02843067>
- Agee, J. K. (1998). The Landscape Ecology of Western Forest Fire Regimes. *Northwest Science*, 72(Special Issue), 24–34.
- Anderegg W. R., C. Schwalm, F. Biondi, J. J. Camarero, G. Koch, M. Litvak, K. Ogle, J.D.Shaw, E. Shevliakova, A.P. Williams, A. Wolf, E. Ziaco and S. Pacala. (2015). Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science* 349:528-532, <https://doi.org/10.1126/science.aab1833>
- Arizpe, A. H. (2016). Widespread Fire Years in Conifer Forests are Contingent on Both Winter and Monsoon Precipitation in the US-Mexico Sky Islands [The University of Arizona]. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/595985>
- Baisan, C. H., & Swetnam, T. W. (1990). Fire history on a desert mountain range: Rincon Mountain Wilderness, Arizona, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(10), 1559–1569. <https://doi.org/10.1139/x90-208>
- Brewer, P.W., Velásquez, M.E., Sutherland, E.K. & Falk, D.A. (2016). Fire History Analysis and Exploration System (FHAES) version 2.0.2 [computer software]. <http://www.fhaes.org>. DOI:10.5281/zenodo.34142.
- Brown, P. M., Heyerdahl, E. K., Kitchen, S. G., & Weber, M. H. (2008). Climate effects on historical fires (1630-1900) in Utah. *International Journal of Wildland Fire*, 17(1), 28–39. <https://doi.org/10.1071/WF07023>
- Castruita-Esparza L. U., L. C. R. Silva, A. Gómez-Guerrero, J. Villanueva-Díaz, A. Correa-Díaz and W. R. Horwath. (2019). Coping with extreme events: Growth and water-use efficiency of trees in western Mexico during the driest and wettest periods of the past one hundred sixty years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124:3419-3431, <https://doi.org/10.1029/2019JG005294>
- Cerano-Paredes, J., Iniguez, J. M., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Estrada-Arellano, J. R., Esquivel-Arriaga, G., Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., & Cardoza-Martínez, G. F. (2020). Using Tree-Rings to Reconstruct Fire History Information from Forested Areas. *Journal of Visualized Experiments : JoVE*, 164, 1–27. <https://doi.org/10.3791/61698>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Magaña-Rueda, V. O., Constante-García, V., Esquivel-Arriaga, G., & Valdez-Cepeda, R. D. (2019). Climatic influence on fire regime (1700 to 2008) in the Nazas watershed, Durango, Mexico. *Fire Ecology*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0020-x>
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., & Z. Fulé, P. (2010). Reconstrucción de

- incendios y su relación con el clima para la reserva Cerro el Mohinora, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 63–74. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.654>
- Cook, E. R (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*. No. 47. pp. 37-59.
- Cortes-Montaña, P.Z. Fulé, D.A. Falk, J. Villanueva-Díaz, L.L. Yocom. 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).
- Covington, W. W., & Moore, M. M. (1994). Southwestern ponderosa pine forest structure: Changes since Euro-American settlement. *Journal of Forestry*, 92(1), 39–47.
- CNA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe (0510), Estado de Coahuila. In Comisión Nacional del Agua. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102849/DR_0510.pdf
- Dieterich, J. H., & Swetnam, T. W. (1984). Dendrochronology of a fire-scarred ponderosa pine. *Forest Science*, 30(1), 238–247. <https://doi.org/10.1093/forestscience/30.1.238>
- Encina, J., Castellón, E., Quintanilla, J., Villaseñor, J., Ayala, C., & Arevalo, J. (2016). Floristic richness of the Sierra de Zapalinamé, Coahuila, Mexico. *Phytotaxa*, 283(1), 1–42. <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.283.1.1>
- Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nunez, and P.J. Trimble. (2001). The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S., *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2077-2080. Disponible en: <https://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>
- Falk, D. A., Heyerdahl, E. K., Brown, P. M., Farris, C., Fulé, P. Z., McKenzie, D., Swetnam, T. W., Taylor, A. H., & Van Horne, M. L. (2011). Multi-scale controls of historical forest-fire regimes: New insights from fire-scar networks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(8), 446–454. <https://doi.org/10.1890/100052>
- Farris, C. A., Baisan, C. H., Falk, D. A., Yool, S. R., & Swetnam, T. W. (2010). Spatial and temporal corroboration of a fire-scar-based fire history in a frequently burned ponderosa pine forest. *Ecological Applications*, 20(6), 1598–1614. <https://doi.org/10.1890/09-1535.1>
- Donahue, J. K., & Lopez Upton, J. (1999). A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in Mexico. *SIDA, Contributions to Botany*, 18(4), 1083–1093.
- Farjon, A. (2013). The IUCN red list of Threatened Species 2013. [En línea] Available at: <http://www.iucnredlist.org/details/63552/0> [Último acceso: 20 agosto 2019].
- Forrestel, A. B., Andrus, R. A., Fry, D. L., & Stephens, S. L. (2017). Fire history and forest structure along an elevational gradient in the southern cascade range, Oregon, USA. *Fire Ecology*, 13(1), 1–15. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1301001>

- Fulé, P. Z., & 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., Villanueva-Díaz, J., & Ramos-Gómez, M. (2005). Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(2), 320–330. <https://doi.org/10.1139/x04-173>
- González, A.S.X. 2017. Geografía, división territorial y fisiografía. En: *La Biodiversidad en Coahuila*. Estudio de Estado. Vol. 1. CONABIO/Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, México. 33-44.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). FHX2—software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research*, 57(1), 115–124.
- 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.
- Heinselman, M. L. (1973). Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quaternary Research*, 3(3), 329–382. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(73\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(73)90003-3)
- Heyerdahl, E. K., & Alvarado, E. (2003). *Influence of Climate and Land Use on Historical Surface Fires in Pine-Oak Forests, Sierra Madre Occidental, Mexico* (pp. 196–216). https://doi.org/10.1007/0-387-21710-X_7
- Heyerdahl, E. K., Brubaker, L. B., & Agee, J. K. (2001). Spatial controls of historical fire regimes: a multiscale example from the interior west, USA. *Ecology*, 82(3), 660–678. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0660:SCOHFR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0660:SCOHFR]2.0.CO;2)
- Holmes, R. L (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement, *Tree-Ring Bulletin*, no. 43, pp. 69-78.
- INEGI. (2000). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. *Conjunto de datos vectoriales de los tipos de clima de Coahuila*.
- INEGI. (2004). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Guías para interpretación de cartografía edafológica. México.
- INEGI. (2011). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Conjunto de datos vectoriales de subprovincias fisiográficas de Coahuila. México.
- Margolis, E. Q., Swetnam, T. W., & Allen, C. D. (2011). Historical stand-replacing fire in upper montane forests of the Madrean sky islands and Mogollon Plateau, southwestern USA. *Fire Ecology*, 7(3), 88–107. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0703088>
- Mendoza, H. J. M., & S.X. González A. (2017). Clima. En: *La biodiversidad en Coahuila. Estudio de Estado*. Saltillo: Quintanilla ediciones. Vol. 1. 45-5

- Meunier, J., Romme, W. H., & Brown, P. M. (2014). Climate and land-use effects on wildfire in northern Mexico, 1650-2010. *Forest Ecology and Management*, 325, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.048>
- NIFC. (2021). *North American Seasonal Fire Assessment and Outlook*. National Interagency Fire Center. Predictive Services. Disponible en: <https://www.nifc.gov/nicc/predictive/outlooks/outlooks.htm>
- NOAA. (2021a). Historical El Niño / La Niña episodes (1950-present). National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate Prediction Center Internet Team. 5830 University Research Court College Park, Maryland 20740. Disponible en: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- NOAA. (2021b). Pacific Decadal Oscillation (PDO). National Oceanic and Atmospheric Administration. National Centers for Environmental Information. Climate monitoring. Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>
- POE. (2017). Decreto por el cual se modifica la categoría del Área Natural Protegida con el carácter de Zona Sujeta a Conservación Ecológica, un Área de la Serranía conocida como Zapalinamé, para quedar como Reserva Natural Estatal. Periódico Oficial Del Estado de Coahuila de Zaragoza, Tomo CXXIV(82), 1–4.
- Poulos, H. M., Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Camp, A. E., & Gatewood, R. G. (2013). Human influences on fire regimes and forest structure in the Chihuahuan Desert Borderlands. *Forest Ecology and Management*, 298, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.014>
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2005). Distribución y Conservación de las Poblaciones Naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botanica Mexicana*, 72, 1–16.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Z., P., & Fulé. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(McPhaden 1999), 23–37. <https://doi.org/doi.org/10.1071/WF02040>
- Sakulich, J., & Taylor, A. H. (2007). Fire regimes and forest structure in a sky island mixed conifer forest, Guadalupe Mountains National Park, Texas, USA. *Forest Ecology and Management*, 241(1–3), 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.029>
- Savage, M., & Swetnam, T. W. (1990). Early 19th-Century Fire Decline Following Sheep Pasturing in a Navajo Ponderosa Pine Forest. *Ecology*, 71(6), 2374–2378. <https://doi.org/10.2307/1938649>
- SMN. (2021). *Estatus del Niño - Oscilación del Sur (ENOS)*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/estatus-del-nino>
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin,

- D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Sjezner, P., & Howard, I. M. (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. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>
- Stahle, D.W., R.D. Dárrigo, P.J. Krusic, M.K. Cleveland, E.R. Cook, R.J. Allan, J.E. Cole, R.B. Dunbar, M.D. Therrell, D.A. Guy. M.D. Moore, M.A. Stokes, B.T. Burns, J. Villanueva-Díaz y L.G. Thompson. (1998). Experimental dendro climatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(10):2137-2152.
- Stokes, M.A. y T.L. Smiley. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois. 73 p.
- Swetnam, T. W., & Betancourt, J. L. (1998). Mesoscale Disturbance and Ecological Response to Decadal Climatic Variability in the American Southwest. *Journal of Climate*, 11, 3128–3147. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8736-2_32
- Swetnam, T. and Baisan, C. (1996). Historical fire regime patterns in the southwestern United States since AD 1700. In: CD Allen (ed) *Fire Effects in Southwestern Forest: Proceedings of the 2nd La Mesa Fire Symposium*. pp. 11-32. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RM-GTR-286.
- Valdés, C. M., Terry, E. A., Villarreal, A. A., & Niño, D. A. (2017). *Historias de protección y depredación de los recursos naturales en el valle de Saltillo y la Sierra Zapalinamé* (2nd ed.). Universidad Autónoma de Coahuila.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Constante-García, V., Fulé, P. Z., & Cornejo-Oviedo, E. (2009). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para saltillo, Coahuila. *Madera Bosques*, 15(3), 45–64.
- Villanueva Díaz, J. y G.R. McPherson. (2002). Impacto del cambio de uso del suelo e incendios en la estructura de tres comunidades forestales. *Ciencia Forestal* 27 (91): 27 – 53.
- Yocom, L. L., & Fulé, P. Z. (2012). Human and climate influences on frequent fire in a high-elevation tropical forest. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1356–1364. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02216.x>
- Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E., Montaña, C. C., Drury, S. A., Falk, D. A., Meunier, J., Poulos, H. M., Skinner, C. N., Stephens, S. L., & Villanueva-Díaz, J. (2017). Climate drives fire synchrony but local factors control fire regime change in northern Mexico. *Ecosphere*, 8(3).

<https://doi.org/10.1002/ecs2.1709>

Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, J., Villanueva-Díaz, J., Falk, D. A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010). El Niño-Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, *91*(6), 1660–1671. <https://doi.org/10.1890/09-0845.1>

Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Falk, D. A., García-Domínguez, C., Cornejo-Oviedo, E., Brown, P. M., Villanueva-Díaz, J., Cerano, J., & Montaña, C. C. (2014). Fine-scale factors influence fire regimes in mixed-conifer forests on three high mountains in Mexico. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(7), 959–968. <https://doi.org/10.1071/WF13214>

Zúñiga-Vásquez, J. M., & Pompa-García, M. (2019). The occurrence of forest fires in Mexico presents an altitudinal tendency: a geospatial analysis. *Natural Hazards*, *96*(1), 213–224. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3537-z>

CAPÍTULO II. INCENDIOS Y ESTRUCTURA DEL BOSQUE DE *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* EN LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA

2.1 RESUMEN

El análisis estructural del bosque permite comprender los procesos naturales que intervienen en su desarrollo, lo cual es indispensable para la gestión de las poblaciones. Los objetivos fueron describir la estructura (vertical y horizontal) forestal en tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, y analizar cómo el clima e incendios influyen en el reclutamiento de árboles en el tiempo, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. Se tomaron datos de estructura arbórea y de edades, en tres rodales clasificados como copas pequeñas, medianas y grandes, en tres poblaciones. La historia de incendios se determinó mediante el análisis de cicatrices. El análisis de la estructura arbórea, y el de sincronía de incendios, reclutamientos y clima, sugiere que los bosques de *Pinus greggii* están adaptados a regímenes de incendios de severidad mixta, y que los incendios de copa y superficiales en rodales pequeños en extensión son parte de la historia natural del bosque. Los incendios de copa reemplazan rodales pequeños, lo que genera mayor reclutamiento producto de la apertura de conos y liberación de semillas, en conjunto con la ocurrencia de años húmedos. Además, las especies herbáceas y arbustivas ayudan a mantener el régimen natural de incendios, debido a que ayudan a crear o mantener una continuidad vertical de los combustibles que favorece la propagación de incendios pequeños de copa. La diversidad estructural que genera este régimen de incendios sugiere que los bosques de *Pinus greggii* pueden ser resistentes a cambios climáticos, aun cuando mantiene poblaciones pequeñas.

Palabras claves: serotinidad, historia de incendios, severidad mixta, reclutamiento, clima

FIRES AND FOREST STRUCTURE OF *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* IN THE SIERRA ZAPALINAMÉ, COAHUILA

2.2 ABSTRACT

The structural analysis of forests allows to understand the natural processes involved on its development, which is essential for better management practices. The objectives of this work were to describe the stand structure (vertical and horizontal) in three populations of *Pinus greggii* var. *greggii*, and to analyze how climate and fire temporally influenced forest recruitment in the Sierra de Zapalinamé, Coahuila, Mexico. Tree structure and age data were collected in three stands classified as small, medium and large crowns in three *Pinus greggii* populations. Fire history was determined by scar analysis. The analysis of tree structure, fire synchrony, recruitment and climate suggest that *Pinus greggii* forests are adapted to fire regimes of mixed severity, and that crown and surface fires in small stands are part of the natural history of the forest. Crown fires replace small stands, which generates greater recruitment due to cone opening and seed release, in conjunction with favorable moisture conditions. In addition, herbaceous and shrub species help maintaining the natural fire regime because contribute to create or maintain a vertical continuity of fuels that favors the spread of small crown fires. The structural diversity generated by this fire regime suggests that *Pinus greggii* forests can be resistant to climatic changes, even when maintaining small tree populations.

Key words: serotinity, fire history, mixed severity, recruitment, climate.

2.3 INTRODUCCIÓN

Pinus greggii se considera una especie dependiente del fuego debido a la serotinidad de sus conos, ya que estos permanecen en el árbol sin abrir por varios años y con el calor del fuego se abren y liberan las semillas, característica que permite el reclutamiento después de incendios, siempre y cuando existan las condiciones ecológicas apropiadas (Keeley & Fotheringham, 2000; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2003; Lamont *et al.*, 2020). Esto indica una estrecha relación con los incendios de origen natural, por lo que si éstos se presentan fuera de su régimen natural, el reclutamiento podría limitarse (Keeley & Fotheringham, 2000).

Los bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* se distribuyen en la Sierra Madre Oriental en el noreste de México, la especie se considera endémica de México y forma pequeños rodales puros, aislados y fragmentados (Donahue & Lopez Upton, 1999; Farjon, 2013). No se encuentra bajo algún estatus de conservación/protección por la normatividad mexicana, pero se encuentra en la lista roja de la UICN en categoría de casi amenazada debido a la fragmentación de sus poblaciones (Farjon, 2013).

Las interacciones de especies serótinas como *Pinus greggii*, con incendios dentro de un régimen natural favorecen la conservación del material genético, y en ausencia de fuego o incendios frecuentes, se promueve la no serotinidad (Buma *et al.*, 2013; Lamont *et al.*, 2020). En otras especies vegetales, los incendios estimulan y escarifican las semillas en reservorios del suelo o estimulan el rebrote mediante rizomas (Agee, 1993; Keeley & Fotheringham, 2000).

Los incendios forestales son uno de los principales agentes de perturbación natural que influyen en la estructura y composición de los ecosistemas forestales, y los efectos dependen de la frecuencia e intensidad en que ocurren (Agee, 1993; Franklin *et al.*, 2002), además mantienen la salud y función de ecosistemas considerados dependientes del fuego (Attiwill, 1994), debido a que en algunos bosques mantienen doseles abiertos con incendios frecuentes de baja intensidad, el cual hace el bosque continúe proporcionando hábitat para la fauna silvestre, captura de carbono, retención de humedad y cobertura al suelo (Covington & Moore, 1994). La diversidad de estructuras en un bosque es resultado de complejas interacciones entre topografía, suelo, clima, historia de incendios y otras perturbaciones (*i.e.* plagas, nevadas, sequías) (North *et al.*, 2009; Hessburg *et al.*, 2015; Ng *et al.*, 2020; Berkey *et al.*, 2021).

Aunque no consideran las interacciones anteriores, existen dos hipótesis que tratan de explicar el desarrollo de la estructura del bosque a partir del análisis del régimen de incendios: 1) incendios frecuentes y superficiales de baja severidad, que dan origen a bosques abiertos con árboles grandes en diámetro (Covington & Moore, 1994) y ; 2) bosques con estructura de edad uniforme que al convertirse en arbolado maduro, los incendios reemplazan rodales completos dada su homogeneidad (Oliver, 1980; Margolis *et al.*, 2011).

La pérdida de heterogeneidad o de diversidad de estructuras a nivel de rodales debido a la supresión de incendios de origen natural o cambios de uso del suelo, disminuye la resiliencia de los bosques frente a perturbaciones como incendios, plagas, nevadas y sequías (Hessburg *et al.*, 2005; Stephens *et al.*, 2008; Hessburg *et al.*, 2019; Berkey *et al.*, 2021). Cuando se tiene un solo piso o estructura, la homogeneidad de esta permite

que una perturbación afecte de forma severa, en contraste, cuando existen diversas estructuras, una perturbación podría afectar a una estructura (e.g. plántulas, brinzales), por tanto, el bosque con diferentes piso o estructuras podría ser más resistente a perturbaciones derivadas al cambio climático.

También, la estructura de edades y diámetros de los bosques permite inferir de forma indirecta la frecuencia y severidad de perturbaciones (Villanueva-Díaz & McPherson, 2002). Uno de los desafíos para la gestión de los bosques de *Pinus greggii* en el estado de Coahuila, es comprender su estructura, en relación al tamaño (clases diamétricas) y edades, y cómo está influenciada por el clima e incendios.

Las variaciones climáticas representan un factor adicional, ya que, por el reciente aumento de incendios de mayor extensión y severidad, algunos bosques de pinos podrían ser reemplazados por vegetación arbustiva, encinos u otras especies que rebrotan y que son resistentes a los cambios del clima e incendios severos (Falk, 2013; Owen *et al.*, 2017).

Además, si los incendios de origen natural se suprimen, tanto la estructura como la composición de la vegetación pueden verse alteradas; por ejemplo, se ha documentado que suprimir incendios favorece el establecimiento de especies invasoras y que crea homogeneidad a nivel paisaje que mantienen condiciones de continuidad horizontal y vertical de los combustibles, lo que puede conllevar la creación de escenarios de futuros incendios de alta severidad (Heinselman, 1973; Covington & Moore, 1994; Agee, 1998); además, en el caso de ecosistemas dominados por pinos, la acumulación de acículas en el suelo puede limitar el proceso de regeneración natural (Stein & Kimberling, 2003).

Así, la gestión de los bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* requiere comprender la dinámica de los regímenes de incendios a los que están adaptados y su relación con cambios en la estructura poblacional, análisis que a la fecha no ha sido explorado de manera amplia. En este capítulo se describe la estructura de tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, y se analiza la relación entre la estructura poblacional con los incendios y la variabilidad climática, con el fin de obtener algunas de las bases para la toma de decisiones en la gestión de conservación de dichas poblaciones.

Los objetivos principales fueron: 1) Describir la variabilidad estructural de tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii* con respecto a sus clases diamétricas y la diversidad del sotobosque y; 2) analizar cómo la variabilidad climática y los incendios han influido en el reclutamiento de *Pinus greggii* var. *greggii* a lo largo del tiempo. Las hipótesis planteadas fueron: 1) el reclutamiento ocurre después de incendios y está asociada con la presencia de conos seróticos y condiciones de humedad alta; y 2) la estructura de las poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii* de la Sierra de Zapalinamé, está influenciada por un régimen de incendios superficial con baja severidad.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Área de estudio

Se encuentra dentro en la Reserva Natural Estatal Sierra Zapalinamé en los Municipios de Saltillo y Arteaga, en el sureste del Estado de Coahuila (POE, 2017). Forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental y subprovincia fisiográfica Gran Sierra Plegada, representada por sierras con pliegues y bajadas con poco declive en las partes bajas de las sierras (González, 2017; INEGI, 2011).

El clima de la subprovincia Gran Sierra Plegada es templado subhúmedo (Cx) con lluvias en verano y en general lluvias escasas todo el año, con precipitación media anual de 490 mm, y temperatura media anual entre 12 y 18°C; las partes más altas se caracterizan por presentar clima semifrío sub húmedo (C(E)x) con temperatura media anual entre 5 y 12°C (INEGI, 2000; García, 2004; Mendoza y González, 2017). El suelo es de tipo litosol caracterizado por tener una profundidad menor a 10 cm, con presencia de rocas, tepetate o caliche (INEGI, 2004).

Los bosques de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé forman rodales puros, aunque *Pinus arizonica* Engelm. puede asociarse en menor densidad, además de especies de porte arbustivo del género *Juniperus* y *Quercus* (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

Se seleccionaron tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, que se denominaron: 1) Cañón del Negro (CNE), Saltillo, 2) Cañón de las Norias (CNO), Arteaga, y 3) El Penitente (TVE), Saltillo (Figura 2.1). Las coordenadas de cada población son las siguientes. 1) 25°15'34.80" latitud Norte y 100°56'24.76" longitud Oeste; 2) 25°16'22.86" latitud Norte y

100°51'48.68" longitud Oeste; y 3) 25°20'29.83" latitud Norte y 100°54'47.94" longitud Oeste, respectivamente. En estas poblaciones se recopiló información para caracterizar la estructura de los estratos arbóreo, herbáceo y arbustivo; además, se obtuvieron núcleos de crecimiento con taladro de Pressler y secciones transversales para determinar edades, con la metodología que se describe en la sección 2.2.3.

2.4.2 Delimitación de rodales

De manera general, un incendio puede ocurrir en manchones que se queman ya sea de manera superficial o de copa, manchones con mezcla de ambas condiciones, y áreas que no se queman pero que forman parte de un mosaico a escala de paisaje, y que están relacionadas con la severidad del incendio (Margolis *et al.*, 2011). Dado que el reclutamiento después de incendios asume el establecimiento de cohortes, esto se toma como evidencia para delimitar rodales, por lo que las edades se usan de referencia para confirmar las cohortes (Heinselman, 1973; Margolis *et al.*, 2011).

En este estudio, en cada población se delimitaron tres rodales mediante imágenes de satélite (Google Earth Pro®, 2019) y recorridos de campo, con base en rasgos estructurales como el tamaño de las copas (Heinselman, 1973; Margolis *et al.*, 2011). En estos rodales se colectó información para: 1) caracterizar la estructura del bosque; 2) determinar las edades del arbolado, y; 3) analizar la dinámica y el reclutamiento por medio de cicatrices de incendios (Margolis *et al.*, 2011). Los rodales delimitados se clasificaron como: 1) copas pequeñas, 2) copas medianas y 3) copas grandes.

Por medio del programa QGIS 3.6.0-1®, en cada rodal se distribuyeron de forma aleatoria tres sitios de muestreo, para un total de nueve sitios por población (Figura 2.1). En el cuadro 2.1 se presentan las características de los rodales por población.

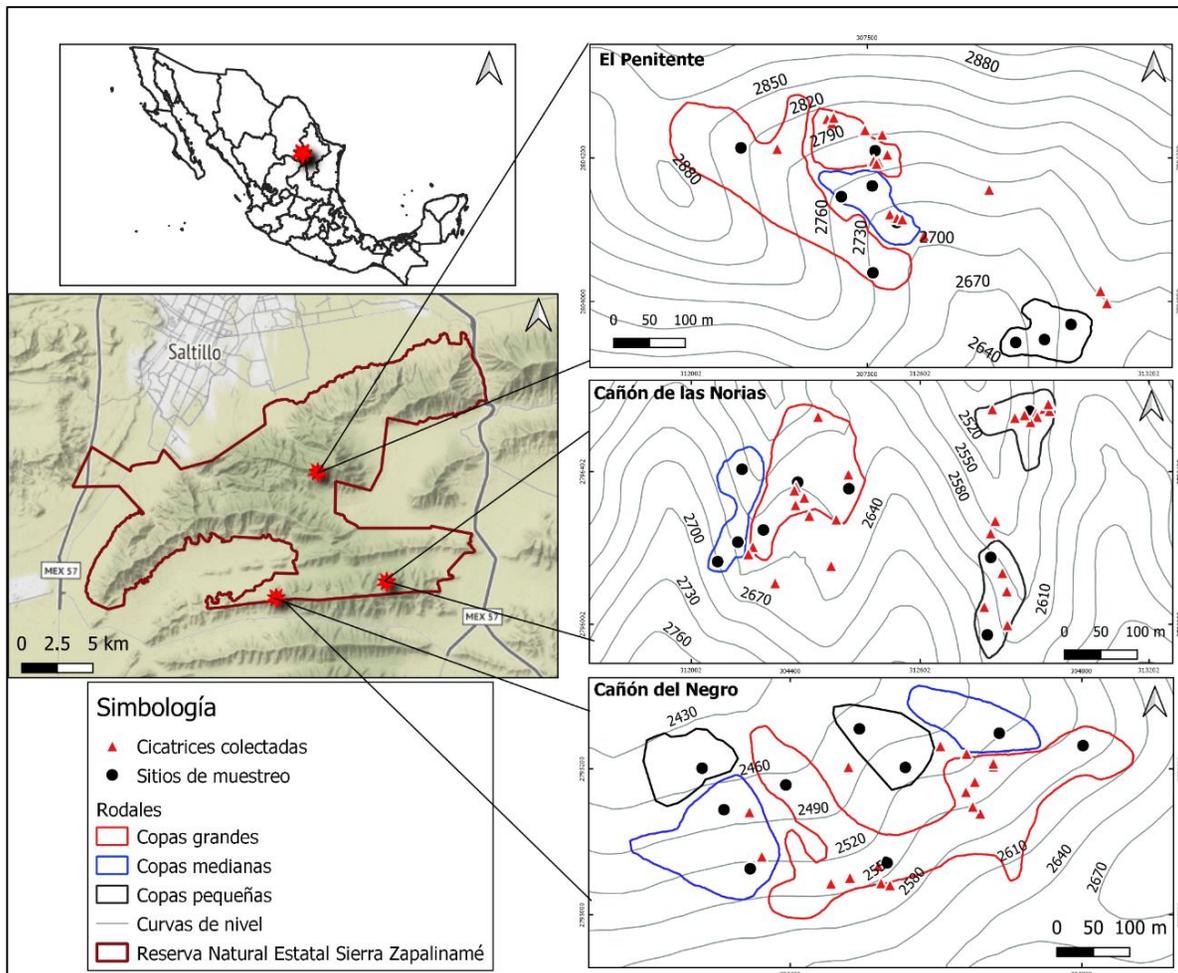


Figura 2.1. Ubicación de las áreas de estudio en tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Reserva Natural Estatal Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Se muestra la delimitación de rodales por población, sitios de muestreo y ubicación de las colectas de cicatrices de incendios.

Cuadro 2.1. Características físicas de los rodales y poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Población	Rodal	Exposición	Elevación	Pendiente promedio (%)	Superficie (ha)
TVE	Copas grandes (CG)	E-SE	2777	58	0.69
	Copas medianas (CM)	SE	2746	50	3.8
	Copas pequeñas (CP)	NO-O	2694	55	0.74
CNO	Copas grandes (CG)	N	2615	31	2.1
	Copas medianas (CM)	N-E	2633	56	6.91
	Copas pequeñas (CP)	NE-NO	2590	57	4.79
CNE	Copas grandes (CG)	NO	2522	46	5.28
	Copas medianas (CM)	NO-NE	2512	39	2.96
	Copas pequeñas (CP)	NO	2480	33	1.87

TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro.

2.4.3 Muestreo en campo

La información necesaria para caracterizar la estructura de los rodales se recopiló en septiembre de 2019. En el Cuadro 2.2 se presenta información de los estratos evaluados, variables medidas, y el tamaño de las parcelas de muestreo. El esquema de muestreo se basó en la metodología de Mueller-Dombois & Ellenberg (1974), el cual se presenta en la Figura 2.2. La primera parcela (100 m²) se ubicó dentro del sitio de muestreo de 1000 m², con rumbo aleatorio, mientras que las otras dos fueron a 120° a partir de la primera parcela de 100 m² (Figura 2.2).

El diámetro normal (DN, cm) se midió con cinta diamétrica, la altura total (AT, m) con hipsómetro Haga®, y los diámetros de copa con cintas métricas. La altura y cobertura de las especies arbustivas y herbáceas se midieron con cintas métricas. De las especies no identificadas en campo, se colectaron muestras con flores y/o frutos para su posterior herborización e identificación taxonómica; la identificación se realizó en el laboratorio de

recursos naturales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. En total, por población se colectó información de nueve parcelas de 1000 m² para árboles, 27 parcelas de 100 m² para arbustos y brinzales, y 27 parcelas de 2 m² para herbáceas y plántulas.

Cuadro 2.2. Características de los estratos y variables medidas en las parcelas de muestreo, en rodales de *Pinus greggii* var. *greggii*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Estrato	Variables	Tamaño de parcela
Árboles (>2.5 cm DN a 1.3m)	Altura total (m), diámetro de copa (m), Diámetro Normal (cm)	1000 m ²
Brinzales (0.3 m altura y < 2.5cm DN)	Número de individuos	100 m ²
Plántulas (0-0.3m de altura)	Número de individuos	2 m ²
Arbustivo	Número de individuos, altura (cm) y cobertura promedio por especie (cm)	100 m ²
Herbáceo	Número de individuos, altura (cm) y cobertura promedio por especie (cm)	2 m ²

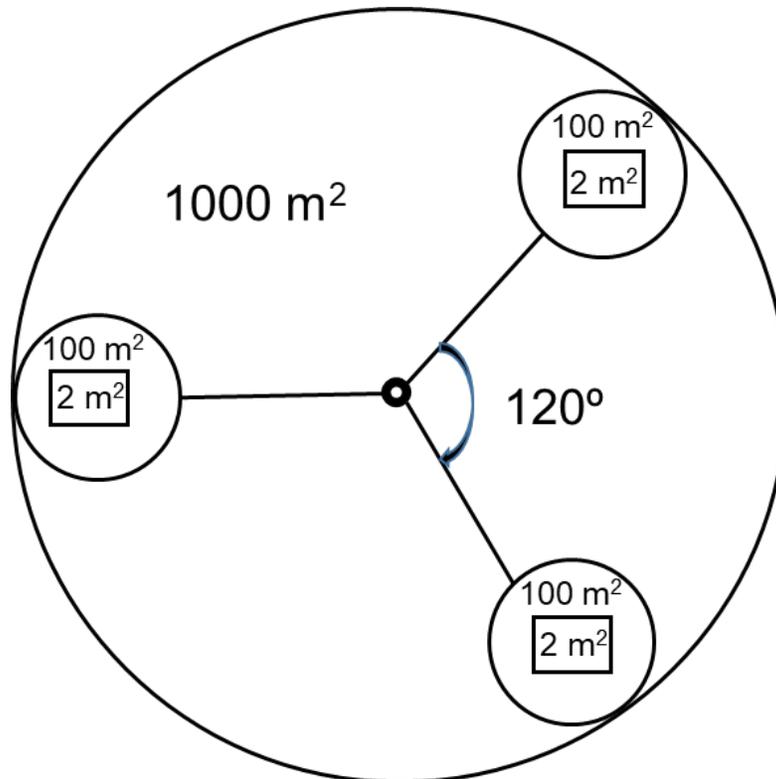


Figura 2.2. Esquema de los sitios de muestreo para árboles, brinzales, plántulas, especies arbustivas y herbáceas, en rodales de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Para analizar los periodos de establecimiento de los árboles (*i.e.* reclutamiento), y su relación con los incendios y variabilidad climática, primero se obtuvo la estructura de edades por clases diamétricas (CD) (1-5, 5-10 y >10 cm de DN, en intervalos de 5 cm), dentro de parcelas circulares de 1000 m² (Figura 2.2) y se colectaron muestras de madera de los árboles. Para las CD de 1-5 y de 5-10 cm de DN, se seleccionaron tres individuos de cada CD, de los cuales se obtuvieron tres secciones transversales de sus troncos con sierras manuales, a nivel del suelo, para estimar su edad. Para CD > 10 cm de DN se colectaron, con un taladro de Pressler, tres núcleos de crecimiento por cada CD, en su mayoría a 0.3 m sobre la superficie del suelo (Boyden *et al.*, 2005; Margolis *et al.*, 2011). En los casos en los que no fue posible obtener la muestra a 0.3 m del suelo,

ésta se obtuvo lo más cerca a dicho punto. El número de muestras obtenidas y analizadas por población, se presenta en el Cuadro 2.3

Cuadro 2.3. Muestras obtenidas por población, para el análisis de estructura de edades en los rodales

Población	Secciones transversales (1-5; 5-10cm DN)	Núcleos de crecimiento	Total
TVE	39	95	134
CNO	35	90	125
CNE	50	87	137

TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro.

2.4.4 Métodos de laboratorio

Las secciones transversales y núcleos de crecimiento se analizaron en el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Gómez Palacio, Durango. Las muestras transversales se pulieron con una secuencia de lijas de grano grueso a fino, con calibres de 60 al 1200, y los núcleos de crecimiento se montaron en secciones de madera para su posterior pulido. Para visualizar los anillos de crecimiento se utilizó un estereoscopio Olympus® de 10x de aumento, el cual facilita la datación de los anillos en el año exacto de su formación con el principio del fechado cruzado, que permite datar los crecimientos anuales mediante la similitud de patrones de crecimiento (Stokes & Smiley, 1968). Las series de cada muestra fueron cofechadas (Holmes, 1983) y estandarizadas (Cook, 1987), acorde a métodos bien documentados e incluidos en la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL).

La edad de los árboles se estimó sumando el número de anillos de las secciones transversales o núcleos de crecimiento, el número de anillos faltantes para llegar al centro del árbol obtenido mediante una plantilla de círculos concéntricos, y el número de años que el árbol necesita para alcanzar la altura de muestreo (Applequist, 1958; Villanueva Díaz *et al.*, 2010).

2.4.5 Análisis de datos

Se estimó la densidad de árboles, brinzales y plántulas, para luego construir gráficos de distribución por clases diamétricas, en intervalos 5 cm por rodal (*i.e.* para CD de 5 cm = 2.5-5.5 cm de DN y para 10 cm = 7.5-12.5). Se utilizó la prueba de Kruskal Wallis para determinar diferencias estadísticas en el número de árboles entre rodales por población (Villafranca *et al.*, 2012); se usó la prueba de suma de rangos de Wilcoxon como *post hoc* para determinar de forma estadística los rodales con medianas diferentes, con 0.05 de significancia (Wackerly *et al.*, 2010). La misma prueba estadística se utilizó para determinar diferencias en diámetro de copa (DC) y área basal (AB) entre rodales por población, lo anterior debido a que no cumplieron con el supuesto de normalidad ($p < 0.05$), con la prueba de Shapiro Wilks. Se construyeron gráficos de cajas y alambres para identificar la distribución de los datos de densidad de árboles y las diferencias entre rodales, y mediante el coeficiente de correlación de Pearson, la relación de densidad (individuos por ha^{-1}) con el diámetro de copa promedio (cm).

Se realizó un análisis de sincronía, con base en la historia de incendios, periodos de reclutamiento de *Pinus greggii* y la variabilidad climática (Meunier *et al.*, 2014; Iniguez *et al.*, 2016). Se utilizó como proxy del clima una cronología de anillo total de *Pinus greggii*

desarrollada para cada sitio de estudio, en la Sierra de Zapalinamé. Las cicatrices de incendios se analizaron con técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes & Smiley, 1968; Baisan & Swetnam, 1990), utilizando el número de cicatrices y edades de los árboles, agrupados en clases de 10 años, ya que este intervalo podría cubrir los años que requieren los árboles para alcanzar la altura a la cual fueron muestreados (en su mayoría a 0.3 m) (Margolis *et al.*, 2011). Para los datos de especies arbustivas y herbáceas, se realizó un análisis de conglomerados jerárquicos con el método de Ward's y distancias euclidianas, la cual minimiza la suma de cuadrados del error dentro de cada conglomerado (Zeltermann, 2015; Palacio *et al.*, 2020) con el programa BlueSky Statistics 6.20®. El análisis se realizó a nivel de rodal con el propósito de determinar grupos con rodales que comparten semejanza de especies asociadas al bosque de *Pinus greggii*, utilizando para esto la abundancia relativa por especie, la cual es resultado de dividir el número de individuos de cada especie entre el número de individuos totales de todas las especies del rodal.

Por último, se estimó el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), ya que es uno de los índices de mayor uso en la caracterización de la diversidad de la vegetación; este índice incorpora información de abundancia relativa y riqueza de especies (Magurran, 2004). Además, estima la uniformidad de la distribución de los individuos entre las especies, entre mayor sea el índice más uniforme será la abundancia relativa (Gotelli, 2008).

$$H' = - \sum P_i \ln(P_i)$$

Dónde: \ln = logaritmo natural, $P_i = n_i/N_i$, se refiere a la abundancia relativa de la i -ésima especie, n_i = número de individuos de la i -ésima especie y N_i = número de individuos totales de la muestra.

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Estructura del bosque de *Pinus greggii* var. *greggii*

La prueba de Kruskal Wallis indicó que no existen diferencias en el número total promedio de árboles entre rodales en TVE ($p>0.05$) y CNO ($p>0.05$); en CNE hubo diferencias significativas ($p<0.05$) entre los rodales de CP y CG ($p<0.05$). Sin embargo, aun cuando no existen diferencias estadísticas significativas entre rodales dentro de poblaciones, la densidad es diferente entre rodales (Cuadro 2.4).

La figura 2.3, muestra la distribución de la densidad por hectárea por rodal, el cual sugiere que las medianas son diferentes entre rodales, en las tres poblaciones. La falta de significancia estadística con la prueba de Kruskal Wallis para las poblaciones de TVE y CNO, podrían asociarse con el bajo número de unidades de muestreo por rodal ($n=3$).

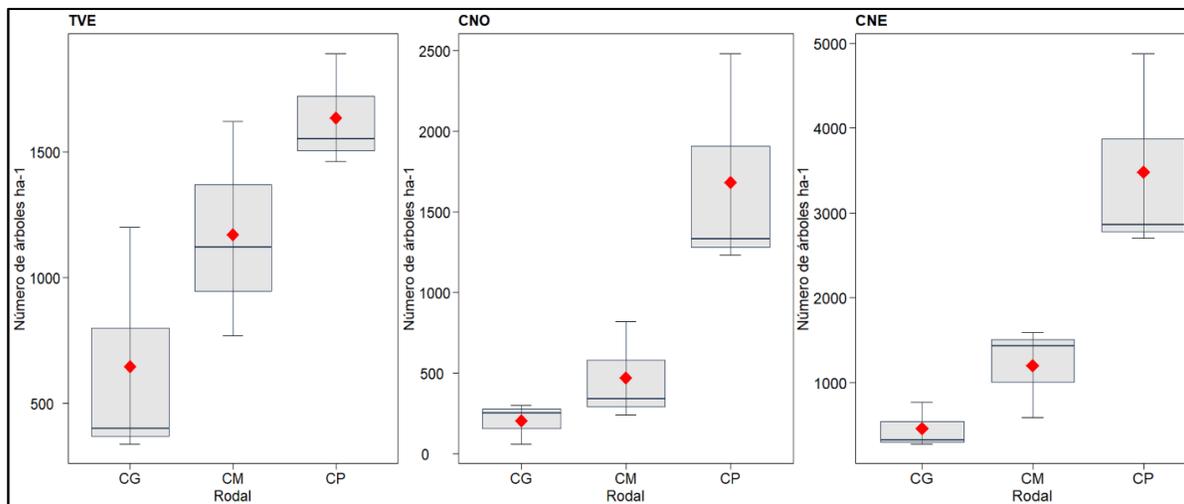


Figura 2.3. Distribución del número de árboles por ha⁻¹ por rodal, en tres poblaciones de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las marcas de color rojo indican el valor promedio. TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro; CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

La densidad promedio de brinzales fue mayor en los rodales de CP que en las otras poblaciones; CNE registró mayor densidad con 667 brinzales ha^{-1} , y la población con menor densidad promedio fue CNO con 144 brinzales ha^{-1} . El rodal de CP de la población CNO registró mayor densidad promedio de plántulas con 2,778 individuos ha^{-1} ; en los rodales de CG no se registraron plántulas en ninguna de las tres poblaciones. Los valores de densidad de plántulas podrían estar sobreestimados, debido a que se contabilizaron en parcelas de muestreo de 2 m^2 .

La prueba de Kruskal Wallis indicó que el diámetro de copa es estadísticamente diferente entre rodales en las tres poblaciones ($p < 0.05$). En TVE, el diámetro de copa de los rodales de CP es diferente con respecto a CM y CG ($p < 0.05$); también de CM con respecto a CG ($p < 0.05$). En CNO, las diferencias se presentan entre los rodales CP y CM ($p < 0.05$), entre CP y CG ($p < 0.05$), y entre CG y CM ($p < 0.05$). Por último, en CNE, los diámetros de copa de rodales de CP son diferentes de forma significativa ($p < 0.05$) con respecto a CM y CG, y rodales CM y CG son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Los resultados anteriores se confirman en la Figura 2.4, la cual sugiere que las medianas son diferentes entre rodales.

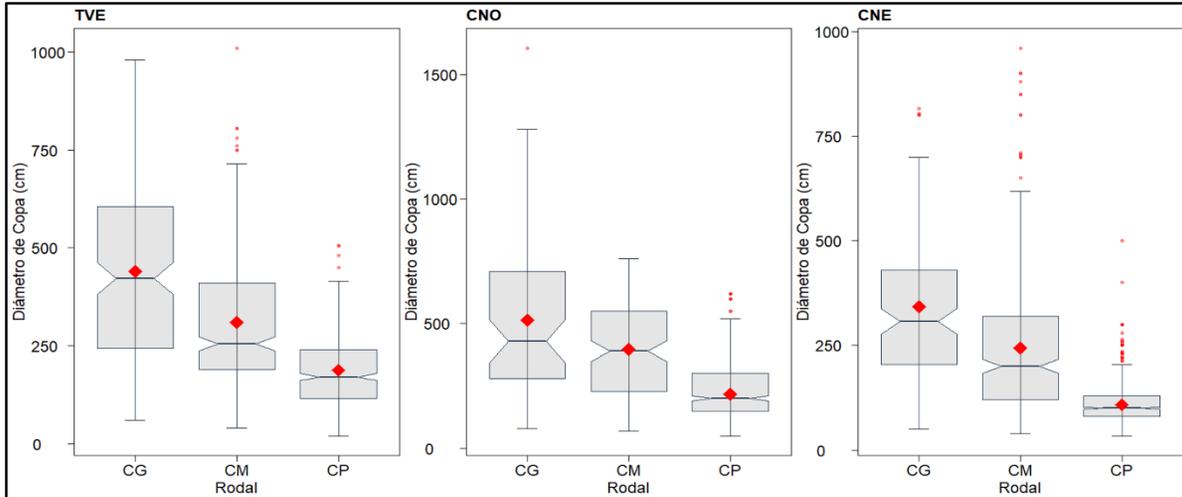


Figura 2.4. Distribución de los diámetros de copa (cm) por rodal, en tres poblaciones de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Las marcas de color rojo indican el valor promedio. TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro; CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

El coeficiente de correlación de Pearson ($r = -0.88$), indica que el diámetro de copa está relacionado con la densidad de árboles, por lo que cuando las copas de los árboles son grandes el número de árboles disminuye, y viceversa (Figura 2.5 y Cuadro 2.4).

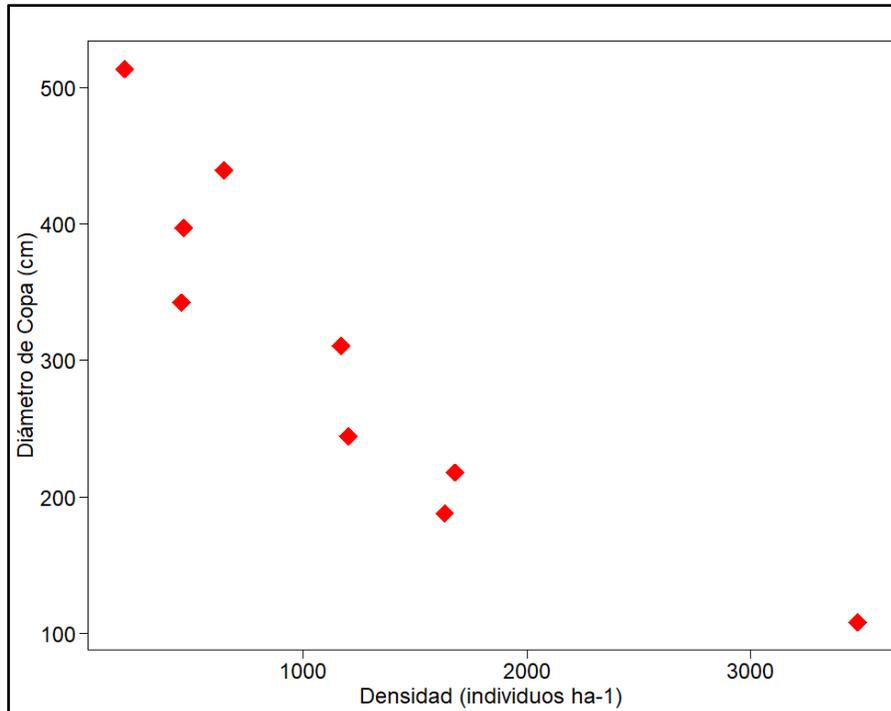


Figura 2.5. Distribución de diámetros de copa en relación con la densidad arbórea (individuos ha⁻¹) en bosques de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

El área basal fue estadísticamente diferente entre rodales de las tres poblaciones ($p < 0.05$). En TVE, los rodales de CP fueron diferentes de CM y CG ($p < 0.05$). En CNO, los rodales de CP fueron diferentes de CM ($p < 0.05$) y de CG ($p < 0.05$). En CNE, los tres rodales son diferentes, los de CP respecto a CM y CG ($p < 0.05$), y CM con CG ($p < 0.05$).

Cuadro 2.4. Características estructurales de rodales en tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii*, Sierra de Zapalinamé, Coahuila

Población	Rodal	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Brinzales ha ¹	Plántulas ha ¹	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Diámetro de copa promedio (cm)
TVE	CG	647±480	11±33	0	20.4±7.8	439±221
	CM	1170±427	0	0	31.9±12	310±165
	CP	1633±227	278±323	1111±2205	6.3±1.5	188±91
CNO	CG	203±127	22±44	0	12±2.6	513±328
	CM	467±310	22±44	1111±3333	12.6±3.5	397±182
	CP	1680±695	144±167	2778±4410	12.6±3	218±123
CNE	CG	457±272	56±101	0	10.2±2.8	342±169
	CM	1203±537	122±148	1111±2205	11.3±1.5	244±174
	CP	3480±1215	667±430	556±1667	10±0.5	108±46

TVE= El Penitente; CNO= Cañón de las Norias; CNE= Cañón del Negro; CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

Los rodales de CG, en las tres poblaciones, registraron bajas densidades en clases de diámetros de hasta de 65 cm en CNO, 45 cm en TVE y 35 cm en CNE, y densidades mayores en clases de 5-25 cm; en general, los rodales de CG presentaron densidades más bajas que los rodales de CM y CP (Figura 2.6 y Cuadro 2.4). Los rodales de CG en CNE no registraron diámetros grandes (por arriba de 35 cm de DN) comparados con rodales de CG de TVE y CNO, lo que en parte puede ser resultado de aprovechamientos derivados de la operación de un aserradero y el uso de productos de madera en minas subterráneas ubicadas en el mismo ejido, a inicios del siglo XX.

Los rodales de CM en TVE y CNO están dominados por árboles ubicados en clases de diámetro de 10 a 25 cm, con densidades bajas de árboles de 5 cm de DN, excepto en CNE en donde dominan los árboles de 5 y 10 cm de DN. Esto sugiere que los árboles de CM se encuentran en una etapa intermedia entre los rodales de CP y CG, y que, en el futuro con la presencia de incendios superficiales estos rodales podrían pasar a ser de CG.

Los rodales de CP en las tres poblaciones están dominados por árboles de las clases de diámetro de 5 y 10 cm (Figura 2.6) y la alta densidad hace que las copas de los árboles sean pequeñas por efecto de la competencia (Figura 2.5).

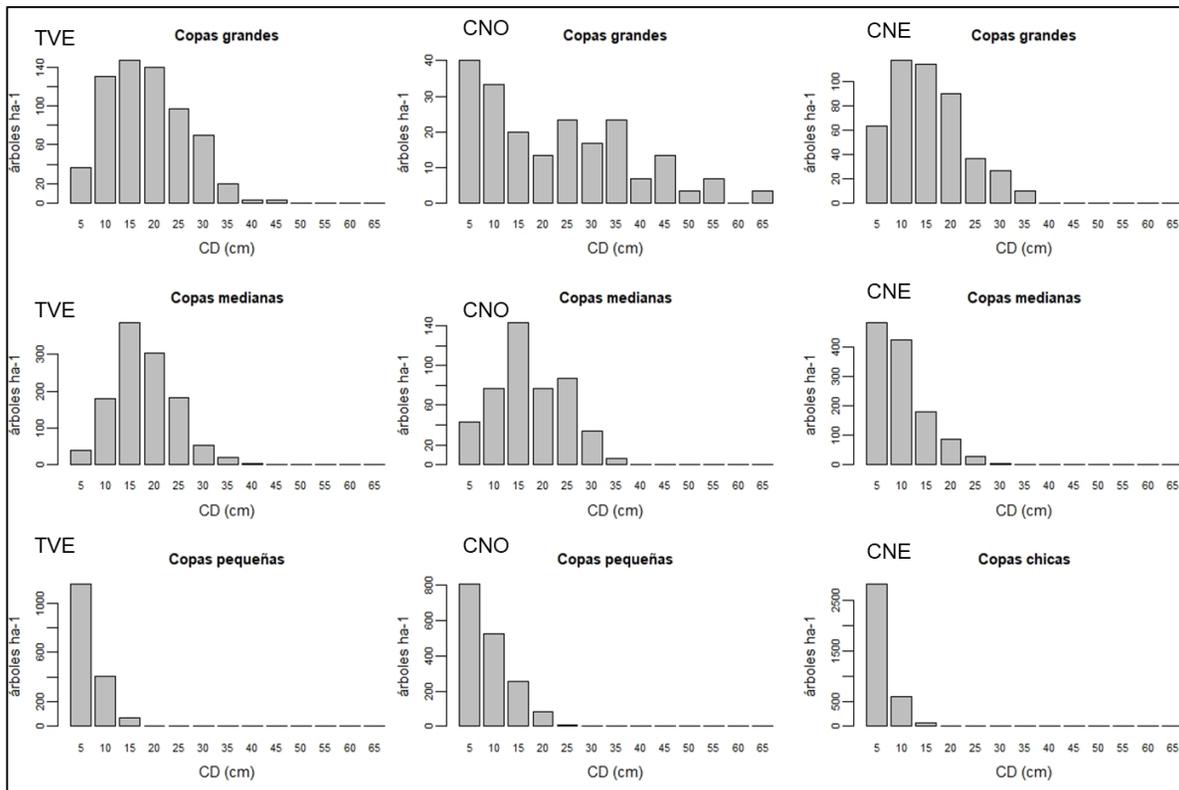


Figura 2.6. Distribución de árboles por clases diamétricas (CD) por población y rodal. TVE (El Penitente), CNO (Cañón de las Norias) y CNE (Cañón del Negro). Notar que las escalas en el eje Y son diferentes.

2.5.2 Sincronía de incendios, reclutamiento y variabilidad climática

El análisis de sincronía muestra la dinámica de periodos de reclutamiento del bosque de *Pinus greggii*, en relación con la historia de incendios y la variabilidad climática de cada población. Las barras más altas del número de cicatrices por cada 10 años indican las décadas con incendios relativamente extensos (Figuras 2.7, 2.8 y 2.9).

En TVE, los incendios reconstruidos con técnicas dendrocronológicas comenzaron en el período 1840-2000, y los árboles se establecieron en el periodo de 1940-1990, en menor

cantidad en 1910 y en mayor número en los años 1950-1970, siendo el pico más alto en 1960 (Figura 2.7 B).

El número de cicatrices por cada 10 años, indica que en 1940 se presentaron incendios relativamente extensos, que el mayor reclutamiento inició en 1950 bajo condiciones secas, aunque el pico más alto de éste ocurrió en condiciones de humedad por arriba del promedio en la década de 1960 (Figuras 2.7 A, B y C). Esto sugiere que el reclutamiento se produce después de incendios relativamente extensos en periodos de humedad por arriba del promedio, aunque también pueden presentarse reclutamientos en menor cantidad en periodos secos.

Los resultados también sugieren que los árboles se establecieron en periodos de pocos incendios o incendios pequeños, lo que favoreció su establecimiento (Figura 2.7 A y B). Además, la falta de o el bajo número de reclutamientos antes de 1940, podría ser consecuencia de que incendios de 1940 eliminaron a la mayoría de los árboles, es decir, reemplazaron a los tres rodales delimitados en este estudio (copas pequeñas, medianas y grandes) (Figuras 2.7 A y B).

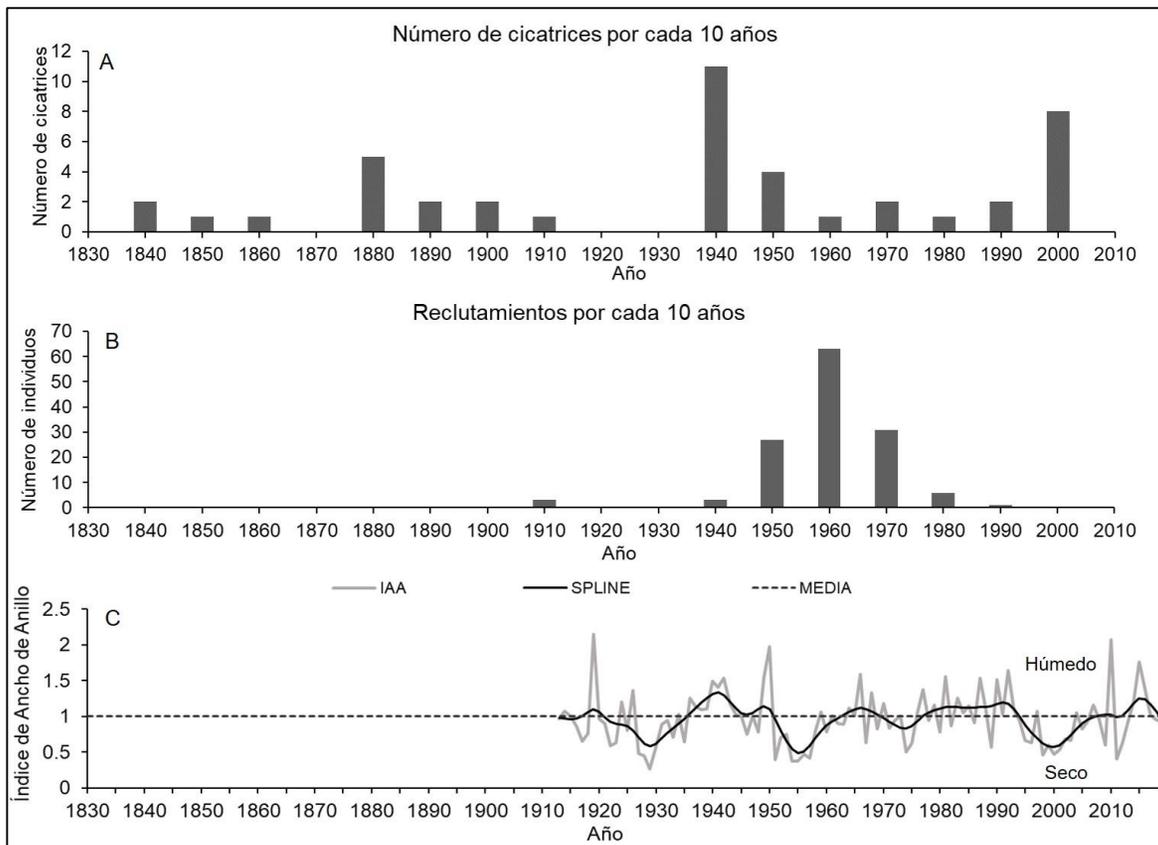


Figura 2.7. Sincronía de estructura de edades (B), historia de incendios (A) y variabilidad climática (C), en El Penitente (TVE), Sierra de Zapalinamé. Como proxy del clima se utilizó una cronología de anillo total de *Pinus greggii* del mismo sitio.

En CNO, los incendios reconstruidos comenzaron en el periodo de 1900-2010, y los árboles se establecieron en el periodo de 1850-1980 y en el 2000, el mayor número de árboles se estableció entre 1950-1970, y el pico más alto de reclutamiento ocurrió en 1960 (Figura 2.8 B). La Figura 2.8 A muestra que en 1950 se presentaron incendios extensos, y que el mayor reclutamiento ocurrió en 1960 con periodos de humedad por arriba del promedio, aunque también se presentaron reclutamientos en periodos secos (*i.e.* 1950) (Figura 2.8 B y C). Además, se observa que la mayor cantidad de árboles se estableció en periodos de pocos incendios o de incendios pequeños (Figura 2.8 A y B).

La baja cantidad de reclutamientos entre 1850-1940 podría deberse a que incendios ocurridos en 1950 eliminaron a la mayoría de árboles, por lo que los árboles

sobrevivientes forman ahora los rodales de copas grandes. Las cicatrices de incendios colectadas de árboles vivos son evidencias que los incendios han sido superficiales, y que el reclutamiento de 1950 y 1960 podría ser producto de la liberación de semillas resultado de incendios ocurridos en la década de 1950 en rodales de copas medianas y pequeñas (Figura 2.8 A y B). En las décadas de 1970 y 1980 se presentaron condiciones de humedad por arriba del promedio, y los reclutamientos fueron bajos, posiblemente debido a la baja cantidad de semilla liberada por efecto de incendios pequeños de baja intensidad (Figura 2.8 A, B y C).

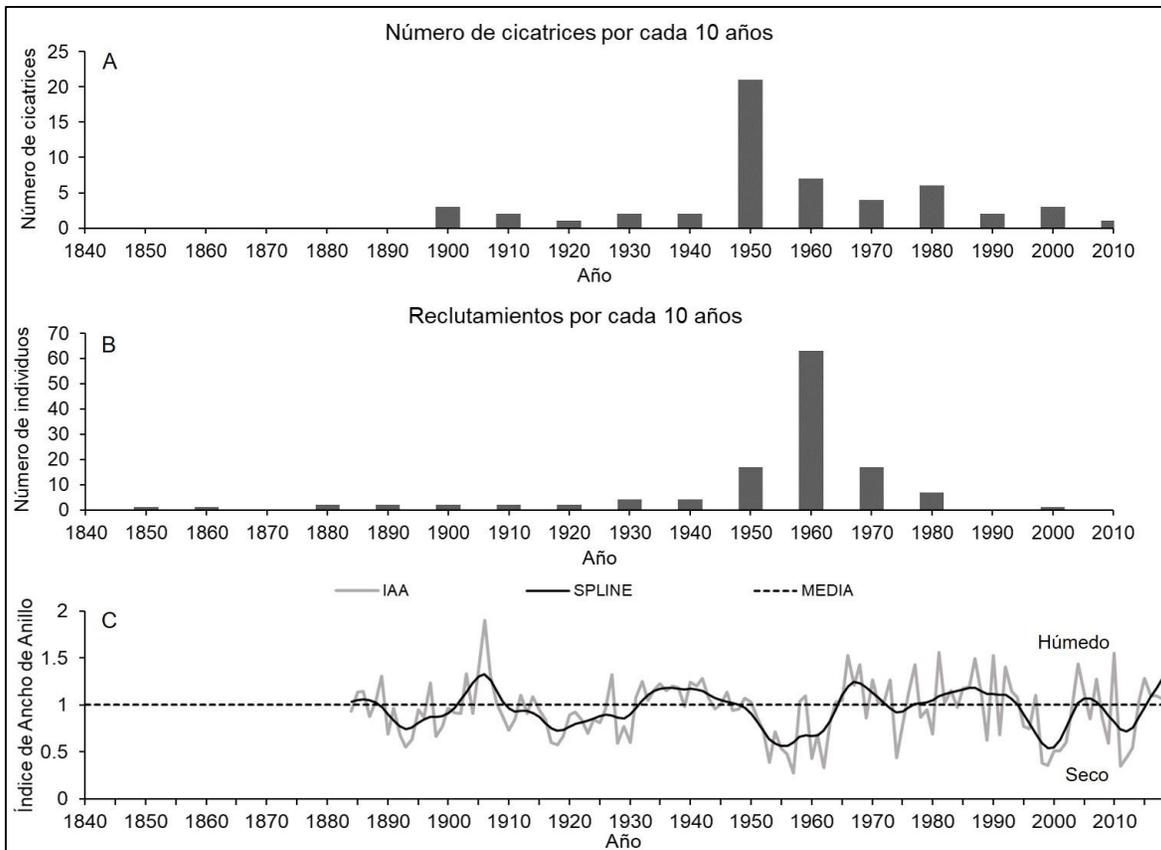


Figura 2.8. Sincronía de estructura de edades (B), historia de incendios (A) y variabilidad climática (C), en Cañón de las Norias (CNO), Sierra de Zapalinamé, Coahuila. Como proxy del clima se utilizó una cronología de anillo total de *Pinus greggii* del mismo sitio.

En CNE, los incendios reconstruidos iniciaron en el periodo de 1840-2010, los árboles se establecieron en 1820, y de 1840-1980, presentándose los picos más altos de reclutamiento en 1900 y 1940 (Figura 2.9 B). Los incendios, relativamente extensos, se presentaron en las décadas de 1900 y 1930, lo que sugiere que los árboles se establecieron en la misma década y una década después de ocurridos tales incendios; los reclutamientos se asociaron también a condiciones de humedad por arriba del promedio (Figura 2.9 A, B y C).

Es importante destacar que los árboles de clases diamétricas pequeñas (1-5 y 5-10 cm) registraron edades de hasta 174 años (Figura 2.9 B), lo cual evidencia que son individuos suprimidos por efecto de la competencia, y que la especie tiene la capacidad de adaptarse a condiciones extremas con recursos limitados. En general, los reclutamientos en las distintas clases de edad se presentaron con periodos de humedad y sequía, con pocos incendios o muy localizados (Figura 2.9 A, B y C). Además, no se registró reclutamiento en el período 1990-2010, lo que podría estar relacionado a la ocurrencia de incendios pequeños, supresión activa de incendios naturales y falta de liberación de semilla o pastoreo intensivo, aunado a periodos de sequía, que se extendió en el mismo período (1990-2010).

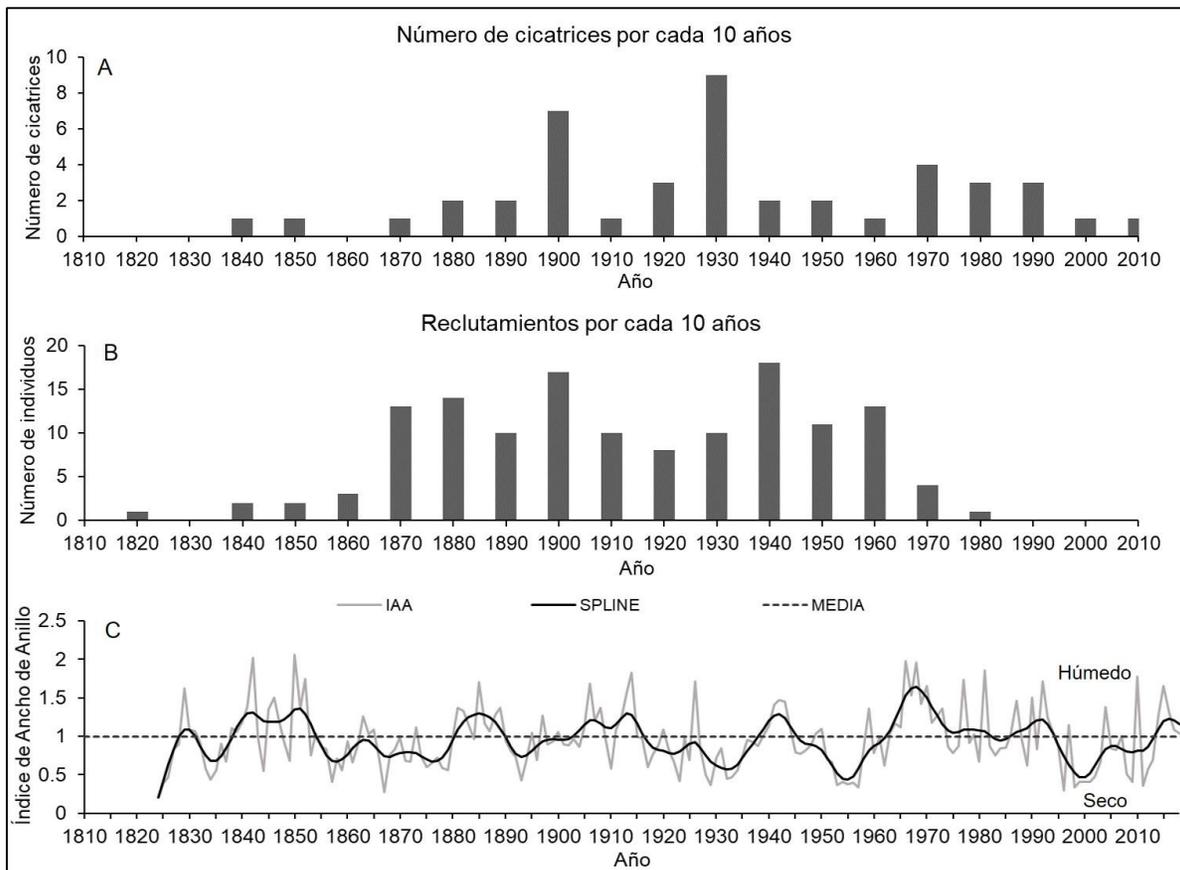


Figura 2.9. Sincronía de estructura de edades (B), historia de incendios (A) y variabilidad climática (C), en Cañón del Negro (CNE), Sierra de Zapalinamé. Como proxy del clima se utilizó una cronología de ancho de anillos de *Pinus greggii* del mismo sitio.

2.5.3 Riqueza de especies herbáceas y arbustivas

Se encontró mayor riqueza de especies arbustivas en rodales de CG, CM y CP del sitio CNE (29, 29 y 24, respectivamente), seguido por TVE y CNO, con excepción de los rodales de CP (Cuadro 2.5). La mayor riqueza de especies herbáceas se registró en rodales de CM en TVE, CG en CNO y CG en CNE (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Riqueza de especies y familias de arbustos y herbáceas, e índice de diversidad de Shannon-Wiener por rodal, en bosques de *Pinus greggii*, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Población	Estrato	Riqueza de Especies			Riqueza de Familias			Índice de Shannon		
		CG	CM	CP	CG	CM	CP	CG	CM	CP
TVE	Arbustivo	28	26	22	14	12	11	2.29	2.07	2.65
TVE	Herbáceo	16	20	13	9	10	7	2.07	2.08	2.04
CNO	Arbustivo	24	26	27	11	12	13	2.56	2.45	2.66
CNO	Herbáceo	20	16	18	9	7	8	2.53	1.97	2.17
CNE	Arbustivo	29	29	24	11	11	10	2.77	2.77	2.69
CNE	Herbáceo	17	16	14	13	12	9	1.99	2.35	2.10

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

El análisis de conglomerados con el método de Ward's y distancias euclidianas, indica que existen grupos similares en cuanto a riqueza de especies y abundancia relativa entre rodales, en los estratos arbustivo y herbáceo. Éstos se describen con los dendrogramas de cada estrato (Figura 2.10 y 2.11).

Al realizar un corte en el valor de similitud en 0.35, el estrato arbustivo se integra por tres grupos: 1) Grupo 1, rodales de CG_TVE y CM_TVE; 2) Grupo 2, rodales de CG_CNO, CM_CNO y CP_CNO; y 3) Grupo 3, rodales de CP_TVE, CG_CNE, CM_CNE y de CP_CNE (Figura 2.10). Cada grupo sugiere que existe semejanza en la riqueza de especies arbustivas y abundancia relativa en rodales de cada población, excepto el rodal de CP de TVE que se ubica más cercano en riqueza a los rodales del sitio CNE.

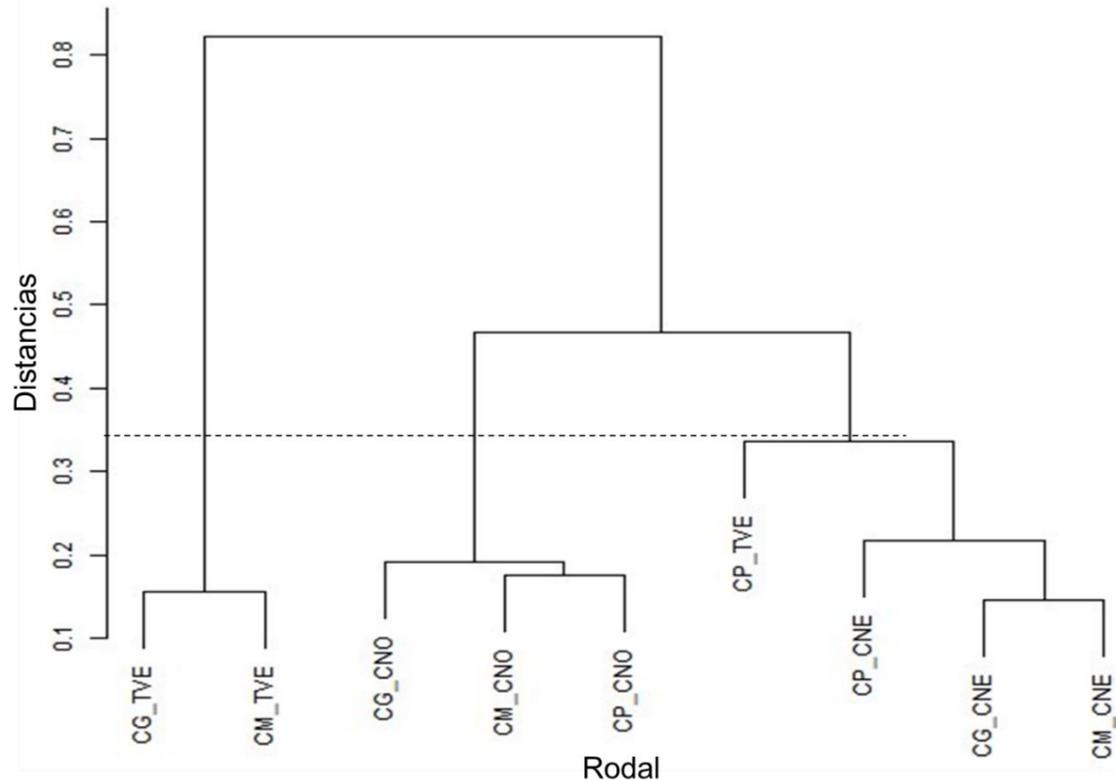


Figura 2.10. Dendrograma de similitud de especies arbustivas por rodal del bosque de *Pinus greggii*. Rodales (CP= Copas pequeñas, CM= Copas medianas, CG= Copas grandes), población (TVE= El Penitente, CNO= Cañón de las Norias, CNE= Cañón del Negro). Los valores en el eje Y indican distancias, entre menor sea el valor indica menor distancias entre grupos o rodales, por tanto, mayor similitud.

Por otra parte, al hacer una línea de corte al 0.55 de valor de similitud, el estrato herbáceo se integra por tres grupos: 1) Grupo 1, con rodales de CG_CNO, CM_TVE y CP_TVE; 2) Grupo 2, integrado por rodales de CM_CNE y CP_CNE; y 3) Grupo 3 rodales de CM_CNO, CP_CNO, CG_TVE y CG_CNE (Figura 2.11). Esto indica que en cada grupo existe semejanza en la riqueza de especies y en abundancia relativa.

Los rodales de CM y CP de CNE, y CNO y TVE presentan patrones similares de agrupación, aunque pertenezcan a distintos grupos. Por lo tanto, estos rodales pueden presentar valores similares de riqueza de especies y de abundancia relativa; de igual forma, se aprecia similitud en rodales de CG de CNE y TVE. Los grupos identificados en

el análisis de conglomerados para especies arbustivas y herbáceas podrían estar relacionados con la cantidad de luz que se filtra a través del dosel, aunque en este análisis no fue posible comprobar el grado de esta relación.

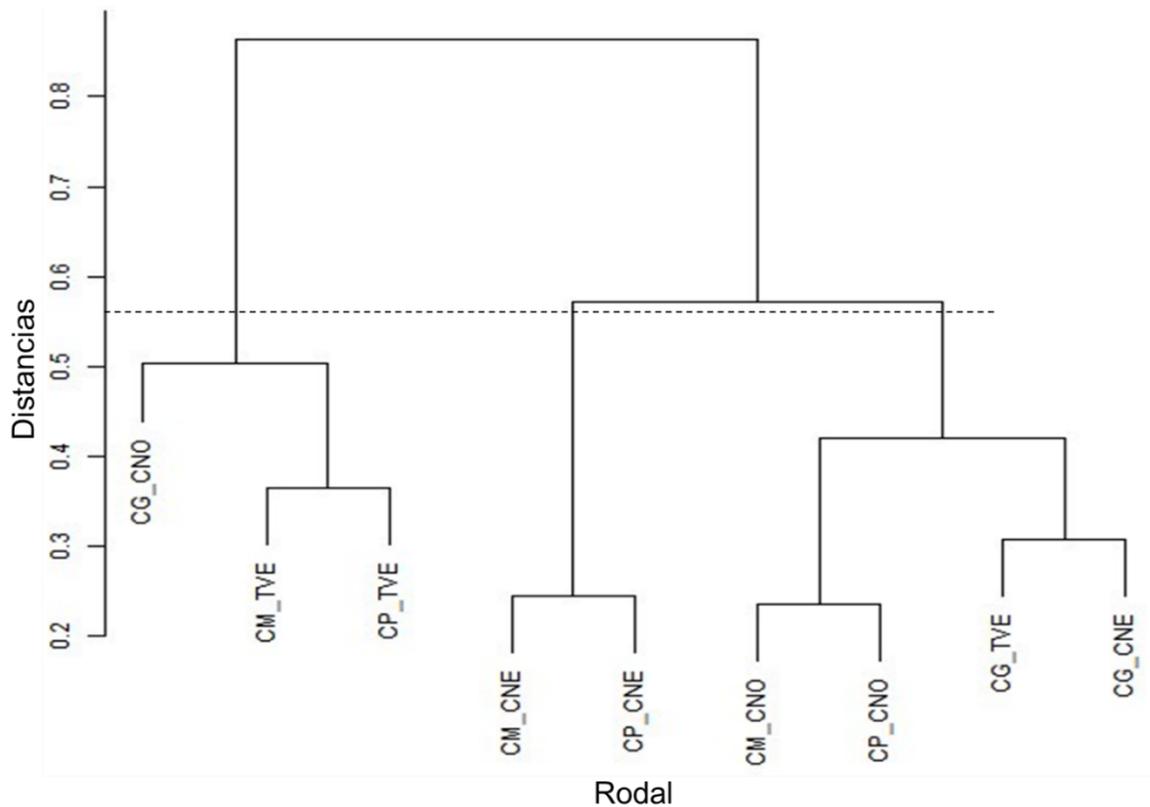


Figura 2.11. Dendrograma de similitud de especies herbáceas por rodal del bosque de *Pinus greggii*. Rodales (CP= Copas pequeñas, CM= Copas medianas, CG= Copas grandes), población (TVE= El Penitente, CNO= Cañón de las Norias, CNE= Cañón del Negro). Los valores en el eje Y indican distancias, entre menor sea el valor indica menor distancia entre grupos o rodales, por tanto, mayor similitud.

La especie arbustiva más abundante en TVE fue *Quercus pringlei*, con 5,833 individuos·ha⁻¹ en rodales de CG y 4,944 individuos ha⁻¹ en CM, mientras que en rodales de CP fue *Poliomintha longiflora* con 2,411 individuos ha⁻¹ (Apéndice 2.1). En el estrato herbáceo, la más abundante fue *Carex schiedeana* con 40,000 individuos ha⁻¹ en los rodales de CG, mientras que en los rodales de CM y CP fue *Brachypodium mexicanum* con 40,555 individuos ha⁻¹ y 47,222.22 individuos ha⁻¹, respectivamente (Apéndice 2. 2).

La especie arbustiva más abundante en el CNO fue *Quercus hypoxantha* en el rodal de CG con 2,611 individuos ha⁻¹, *Litsea parvifolia* con 5,822 individuos ha⁻¹ en rodales de CM y 3,566 individuos ha⁻¹ en rodales de CP (Apéndice 2.3). En el estrato herbáceo, *Muhlenbergia emersleyi* fue la más abundante en rodales de CG, con 50,000 individuos ha⁻¹, mientras que *Carex schiedeana* lo fue en rodales de CM con 59,444 individuos ha⁻¹, y 56,111 individuos ha⁻¹ en rodales de CP (Apéndice 2.4).

En CNE, *Litsea parvifolia* fue la arbustiva más abundante en rodales de CG con 3,166 individuos ha⁻¹, y 3,533 individuos ha⁻¹ en rodales de CP, mientras que en rodales de CM fue *Chrysactinia truncata* con 3,500 individuos ha⁻¹ (Apéndice 2.5). En el estrato herbáceo, *Carex schiedeana* fue la más abundante, con 40,555.56 individuos ha⁻¹ en rodales de CG, 29,444.44 individuos ha⁻¹ en CM y 20,000 individuos ha⁻¹ en CP (Apéndice 2.6).

2.6 DISCUSIÓN

2.6.1 Estructura del bosque de *Pinus greggii* var. *greggii*

La serotinidad de conos de especies de pinos, está relacionada con régimen de incendios de copa (He *et al.*, 2012), y el reclutamiento posterior a este tipo incendios es alto, con edades uniformes y rápido crecimiento inicial (Lotan, 1976; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2003; Forrestel *et al.*, 2017; Lamont *et al.*, 2020). Así, los incendios naturales han desempeñado un papel fundamental en la estructura actual de las poblaciones de *Pinus greggii* en la Sierra de Zapalinamé, donde las altas densidades con diámetros pequeños (< 25 cm de DN) en rodales de copas pequeñas (0.7-4.7 ha) y medianas (2.9 - 6.9 ha) son producto de incendios mixtos, con sectores de alta severidad (incendio de copa).

Al respecto, Ávila (2005) reporta en Sierra de Arteaga, Coahuila densidades de 400 árboles por ha⁻¹ para *Pinus greggii* (individuos < 25 cm de DN) en sitios con evidencias de incendios, comparados con densidades de 1633-3480 árboles por hectárea (> 2.5 cm de DN) en rodales de copas pequeñas de poblaciones de estudio en la Sierra de Zapalinamé (Cuadro 2.4).

Lo anterior podría deberse a que las características adaptativas de esta especie se centran en una producción abundante de semillas que son liberadas con las altas temperaturas del incendio (Enright *et al.*, 1998). Así, el régimen de incendios que caracteriza a los rodales de copas pequeñas deriva de incendios de copa de alta severidad, los cuales reemplazan a rodales pequeños (Oliver, 1980; Margolis *et al.*, 2011; Halofsky *et al.*, 2011), mientras que, en rodales de copas medianas, incendios de

moderada severidad pueden eliminar parte de los árboles, abrir el dosel y permitir que los árboles remanentes lleguen a tener copas grandes.

En rodales de copas grandes (0.6-5.2 ha) se registró menor densidad del arbolado con respecto a los rodales de copas medianas y pequeñas en los tres sitios de estudio. Se sabe que la corteza de los árboles maduros de esta especie tiende a ser gruesa (Martínez, 1948; Farjon *et al.*, 1997), lo que permite que el cambium se proteja del efecto de agentes externos como el fuego, y que en general estos rodales se asocian con incendios de baja intensidad o superficiales (Brando *et al.*, 2012; He *et al.*, 2012). Este régimen de incendios superficiales favorece la presencia de bosques abiertos con poca densidad de árboles y de copas grandes (Covington & Moore, 1994; Yocom & Fulé, 2012), situación que coincide con los resultados obtenidos en los tres sitios de estudio (Figura 2.6).

En el sitio CNE no se registraron árboles con diámetros grandes en relación a los otros dos sitios, lo que posiblemente se debe a que, a inicios del siglo XX, se realizaron aprovechamientos para abastecer a un aserradero ubicado a 2.5 km del sitio, así como para uso en la minería; de igual manera, la calidad del sitio puede influir en el desarrollo del arbolado, en el que sitios de pobre fertilidad conducen a la presencia de árboles con diámetros pequeños. La relación entre la presencia de rodales con árboles de copas grandes con incendios superficiales, también se corroboró con la colecta de cicatrices de incendios de árboles vivos, la cual muestra que los incendios dañaron, pero no mataron a los árboles.

Las evidencias de la estructura de diámetros en rodales de copas grandes y pequeñas, y su relación con los incendios de copa y superficiales, sugieren que los incendios en bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* en la Sierra de Zapalinamé, se caracterizan por presentar un régimen de incendios de severidad mixta (Fulé *et al.*, 2003; Halofsky *et al.*, 2011). La heterogeneidad estructural creada por este régimen de incendios influye en la resiliencia de estos bosques a perturbaciones naturales (Hessburg *et al.*, 2005; Berkey *et al.*, 2021). En contraste, la supresión activa de incendios de origen natural representa una amenaza para estas poblaciones, debido a la creación de paisajes homogéneos con poca o nula variabilidad estructural (Covington & Moore, 1994; Hessburg *et al.*, 2005).

A su vez, el grado de serotinidad está en función del régimen de incendios (Lotan, 1976; Myers, 1992), por lo que los bosques de *Pinus* con conos serótinicos evolucionaron con incendios intensos (He *et al.*, 2012); así, si existe continuidad de un activo régimen de incendios en bosques de *Pinus greggii*, el material genético se conservaría; sin embargo, con los cambios del clima, algunos conos se abren con las altas temperaturas ocurridas en el periodo primavera-verano, por lo que las plantas establecidas y derivadas de este proceso, podrían no heredar las características de serotinidad al no ser estimuladas por el calor del fuego (Lamont *et al.*, 2020). Entonces, los esfuerzos de reforestación de los gestores del área protegida Sierra de Zapalinamé podrían ser no efectivos, y en su caso, se debería dar prioridad a procesos naturales como los incendios que mantienen diversidad de estructuras y resiliencia ante los cambios climáticos; además las quemadas prescritas de baja intensidad de forma experimental, podrían ayudar para cumplir objetivos ecológicos, y conservar nutrientes del suelo, como el nitrógeno (N) en el mediano plazo.

Los resultados de este estudio acerca de las altas densidades arbóreas en rodales de copas pequeñas, son semejantes a trabajos relacionados de especies como *Pinus contorta* Douglas ex Loudon, en Oregón (Lotan, 1976; Forrestel *et al.*, 2017); *Pinus banksiana* Lamb. en Minnesota (Heinselman, 1973); *Pinus attenuata* Lemmon, en California (Fry *et al.*, 2012), y *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en México (Farjon *et al.*, 1997; Lamont *et al.*, 2020), las cuales también están adaptadas a incendios de copa, que reemplazan rodales y presentan alta capacidad de regenerarse después de este tipo de incendios.

2.6.2 Sincronía de incendios, reclutamiento y variabilidad climática

El reclutamiento más numeroso de *Pinus greggii* en los sitios analizados, ocurrió en la década de 1960, si bien en CNE los picos más altos fueron en 1900 y 1940, donde el clima representó un papel importante en el establecimiento de los árboles bajo condiciones de humedad favorable (Figuras 2.7, 2.8 y 2.9). Eventos semejantes se han reportado en bosques de coníferas al norte de Sonora (Meunier *et al.* 2014) y en bosques de *Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson del suroeste de EEUU (Brown & Wu, 2005; Brown, 2006; Iniguez *et al.*, 2016), donde se indica, que las condiciones de mayor humedad son importantes en los periodos de mayor reclutamiento.

En el sitio de CNE, los reclutamientos coincidieron con la presencia de episodios secos y húmedos, resultados similares a lo reportado para la Sierra San Luis al norte de Sonora (Meunier *et al.*, 2014) y para bosques de *P. ponderosa* de Colorado, EEUU en condiciones secas asociadas con incendios de severidad moderada-alta (Sherriff & Veblen, 2006; Schoennagel *et al.*, 2011). En CNE los reclutamientos fueron continuos

con edades desiguales favorecidas por incendios superficiales (Fry *et al.*, 2012; Yocom & Fulé, 2012), donde solo algunos conos alcanzan a abrir y dan paso a la presencia de un nuevo reclutamiento (Fry *et al.*, 2012). En los tres sitios de estudio, el mayor reclutamiento se asoció con la presencia de incendios escasos y/o pequeños, resultados que son concordantes con lo reportado por Meunier *et al.* (2014) para el norte de Sonora, y para bosques de coníferas en el noroeste de Chihuahua (Cortes-Montaña *et al.*, 2012) y suroeste de EEUU (Iniguez *et al.*, 2016), autores que concluyen que esto permite que árboles jóvenes desarrollen características resistentes al fuego.

Es posible que el reclutamiento episódico registrado en esta montaña haya ocurrido después de incendios que dejaron parches de alta severidad, derivado de incendios de copa; esto es, coincidieron con incendios que reemplazaron pequeños rodales (0.7 - 6.9 ha), como en el caso del sitio de TVE, donde el mayor reclutamiento ocurrió después de incendios ocurridos en las décadas de 1940 y 1950 en el sitio CNO, y posterior a los incendios de 1900 y 1930 en CNE. Las interacciones de reclutamientos con incendios de copa son similares a lo reportado en otros bosques de *Pinus* con conos serótinos, donde es común la ocurrencia de incendios de reemplazo (Heinselman, 1973; Lotan, 1976; Fry *et al.*, 2012; He *et al.*, 2012; Forrestel *et al.*, 2017); las evidencias en el tamaño de los rodales de copas pequeñas del bosque de *Pinus greggii* analizado, sugieren que los incendios de copa ocurren en superficies pequeñas.

Yocom *et al.* (2010) reportaron evidencias de incendios que reemplazaron rodales pequeños en bosques de coníferas de Peña Nevada, Nuevo León, los cuales dieron oportunidad a episodios de mayor reclutamiento. Esta relación se observa con mayor claridad en los sitios TVE y CNO, donde los incendios relativamente extensos o de copa,

en la década de 1940 y 1950 respectivamente, eliminaron el mayor número de árboles, motivo por el que se registró una baja proporción de árboles vivos previos a las décadas antes señaladas (Figuras 2.7 A y B y 2.8 A y B). De lo anterior se concluye que existe una interacción entre la variabilidad del clima y la presencia de incendios, que conduce al reclutamiento en este tipo de bosques (Meunier *et al.*, 2014; Iniguez *et al.*, 2016).

2.6.3 Riqueza de especies herbáceas y arbustivas

Los resultados del análisis de conglomerados sugieren que existe semejanza en la riqueza y abundancia relativa de especies arbustivas dentro de cada población, debido a que se maximiza la similitud en cada grupo (Cuadro 2.5 y Figura 2.10). En contraste, las herbáceas en rodales de CG del sitio CNO son similares con rodales de CP y CM del sitio TVE. En los tres grupos, los rodales de CP y CM presentan similitud en cada población, probablemente debida a la influencia de disponibilidad de luz (Peet, 1978; Menges *et al.*, 2008). Las especies herbáceas y arbustivas asociadas al bosque de *Pinus greggii* realizan un papel importante en la germinación y sobrevivencia de esta especie después de un incendio, ya que pueden proveer de un microhábitat, que favorece el establecimiento y crecimiento de la especie en sus primeras etapas de desarrollo, como ocurre con otro tipo de especies forestales (McKee *et al.*, 2007; Puhlick *et al.*, 2012).

Las especies con conos serótinicos, se caracterizan por la persistencia de ramas secas en la parte baja del fuste, como es el caso de *Pinus greggii* (He *et al.*, 2012); esta característica favorece una continuidad vertical de los combustibles, con el crecimiento de hierbas y arbustos facilitan que el fuego alcance las copas de los árboles. Esto hace que se mantenga el régimen natural de incendios que reemplazan rodales pequeños,

algo que se ha reportado para *Pinus attenuata* en EEUU. (Fry *et al.*, 2012); dicha relación de continuidad dosel-combustibles en el piso forestal, se confirma con alturas máximas de 2.1 - 3.3 m del estrato arbustivo en el sitio de TVE; de 2.8 – 3.5 m en CNO; y de 2.8 – 4 m en el sitio de CNE.

Sin embargo, las especies arbustivas identificadas en las poblaciones analizadas, en su mayoría se reproducen por rebrotes, la cual es una estrategia de adaptación a perturbaciones como incendios (Pausas & Keeley, 2009). Por ejemplo, en rodales de CG y CP del sitio CNE, y en rodales de CM y CP en el CNO, *Litsea parvifolia* fue la especie más abundante, mientras que *Quercus hypoxantha* fue el de mayor abundancia en rodales de CG en CNO. En rodales de CG y CM del sitio TVE se registró a *Quercus pringlei* con la mayor abundancia, mientras que el estrato arbustivo de rodales de CP fue dominado por *Poliomintha longiflora*. Todas las especies mencionadas poseen la capacidad de rebrotar después de incendios.

La severidad de un incendio modifica la estructura y diversidad de especies herbáceas y arbustivas (Moreno & Oechel, 1991), y existen registros de mayor cobertura de arbustos después de incendios de alta severidad que se asocian con características reproductivas de las especies (Crotteau *et al.*, 2013) y con procesos sucesionales. Sin embargo, la diversidad actual de especies del sotobosque en los sitios analizados puede estar influenciada también por la cobertura del dosel, aunque la metodología este trabajo no permite valorar esta relación.

2.7 CONCLUSIONES

La estructura arbórea, tanto de tamaños como de edades, sugiere que los bosques de *Pinus greggii* están influidos por un régimen de incendios de severidad mixta, con incendios de copa y superficiales en rodales pequeños en extensión. Además, indica que los incendios de copa generan mayor reclutamiento, debido a la apertura del dosel aunado a la liberación de semillas por el proceso de apertura de conos y liberación de semillas; lo cual también requiere de condiciones favorables de humedad en el suelo.

Las especies de crecimiento herbáceo y arbustivo son un componente fundamental para mantener el régimen natural de incendios, el cual crea la continuidad vertical de los combustibles y permite incendios de copa en áreas relativamente pequeñas; sin embargo, la estructura de edades no se analizó por rodales sino a nivel de paisaje en cada población de estudio, lo cual podría limitar la interpretación de los resultados.

Debido a la relación de *P. greggii* con los incendios naturales, es probable hasta cierto límite, dejar que el fuego haga su papel natural cuando la fuente de ignición sea natural, excepto cuando existan vidas humanas amenazadas e infraestructura. Además, de una estrategia de quemas prescritas que permita manejar la estructura de los rodales de acuerdo a un objetivo específico. Por ejemplo, visualizar estructuras de acuerdo al servicio ambiental principal, como producción de agua, recreación, producción de madera, protección al suelo.

2.8 LITERATURA CITADA

- Agee J., K. (1993). *Fire Ecology of Pacific Northwest Forests*. Washington D.C. Island Press.
- Appelquist, M. B. (1958). A simple pith locator for use with off-center increment cores. *Journal of Forestry*, 56(2), 141.
- Attiwill, P. M. (1994). The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management*, 63(2–3), 247–300. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)90114-7)
- Ávila, M. C. (2005). Descripción de 11 poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* en el Sureste de Coahuila [Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/891/58839s.pdf?sequence=1>
- Berkey, J. K., Belote, R. T., Maher, C. T., & Larson, A. J. (2021). Structural diversity and development in active fire regime mixed-conifer forests. *Forest Ecology and Management*, 479, 118548. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118548>
- Baisan, C. H., & Swetnam, T. W. (1990). Fire history on a desert mountain range: Rincon Mountain Wilderness, Arizona, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(10), 1559–1569. <https://doi.org/10.1139/x90-208>
- Boyden, S., Binkley, D., & Shepperd, W. (2005). Spatial and temporal patterns in structure, regeneration, and mortality of an old-growth ponderosa pine forest in the Colorado Front Range. *Forest Ecology and Management*, 219(1), 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.041>
- Brown, P. M. (2006). Climate effects on fire regimes and tree recruitment in Black Hills ponderosa pine forests. *Ecology*, 87(10), 2500–2510. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2500:CEOFRA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2500:CEOFRA]2.0.CO;2)
- Brown, P. M., & Wu, R. (2005). Climate and disturbance forcing of episodic tree recruitment in a southwestern ponderosa pine landscape. *Ecology*, 86(11), 3030–3038. <https://doi.org/10.1890/05-0034>
- Buma, B., Brown, C. D., Donato, D. C., Fontaine, J. B., & Johnstone, J. F. (2013). The impacts of changing disturbance regimes on serotinous plant populations and communities. *BioScience*, 63(11), 866–876. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.11.5>
- CNA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe (0510), Estado de Coahuila. In Comisión Nacional del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102849/DR_0510.pdf

- Cook, E. R (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*. No. 47. pp. 37-59.
- Cortes-Montaña, P.Z. Fulé, D.A. Falk, J. Villanueva-Díaz, L.L. Yocom. 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).
- Covington, W. W., & Moore, M. M. (1994). Southwestern ponderosa pine forest structure: Changes since Euro-American settlement. *Journal of Forestry*, 92(1), 39–47.
- Crotteau, J. S., Morgan Varner, J., & Ritchie, M. W. (2013). Post-fire regeneration across a fire severity gradient in the southern Cascades. *Forest Ecology and Management* (Vol. 287, pp. 103–112). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.022>
- Donahue, J. K., & Lopez Upton, J. (1999). A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in Mexico. *SIDA, Contributions to Botany*, 18(4), 1083–1093.
- Enright, N. J., Marsula, R., Lamont, B. B., & Wissel, C. (1998). The ecological significance of canopy seed storage in fire-prone environments: A model for resprouting shrubs. *Journal of Ecology*, 86(6), 960–973. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1998.00311.x>
- Farjon, A. (2013). The IUCN red list of Threatened Species 2013. [En línea] Available at: <http://www.iucnredlist.org/details/63552/0> [Último acceso: 20 Agosto 2018].
- Farjon, A., Rosa, J. A. P. de la, & Styles, B. T. (1997). Guía de campo de los pinos de México y América Central. In The Royal Botanic Gardens, Kew.
- Falk, D.A. (2013). Are Madrean Ecosystems Approaching Tipping Points? Anticipating Interactions of Landscape Disturbance and Climate Change. *Merging Science and Management in a Rapidly Changing World: Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago III*, 40–47.
- Fry, D. L., Dawson, J., & Stephens, S. L. (2012). Age and structure of mature knobcone pine forests in the Northern California coast range, USA. *Fire Ecology*, 8(1), 49–62. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0801049>
- Fulé, P. Z., Crouse, J. E., Heinlein, T. A., Moore, M. M., Covington, W. W., & Verkamp, G. (2003). Mixed-severity fire regime in a high-elevation forest of Grand Canyon, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 18(5), 465–486. <https://doi.org/10.1023/A:1026012118011>
- Forrestel, A. B., Andrus, R. A., Fry, D. L., & Stephens, S. L. (2017). Fire history and forest structure along an elevational gradient in the southern cascade range, Oregon, USA. *Fire Ecology*, 13(1), 1–15. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1301001>
- Franklin, J. F., Spies, T. A., Pelt, R. Van, Carey, A. B., Thornburgh, D. A., Berg, D. R., Lindenmayer, D. B., Harmon, M. E., Keeton, W. S., Shaw, D. C., Bible, K., & Chen, J. (2002). Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with

- silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management*, 155(1–3), 399–423. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00575-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00575-8)
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. In *Instituto de Geografía-UNAM* (5a ed.).
- González, A.S.X. 2017. *Geografía, división territorial y fisiografía. En: La Biodiversidad en Coahuila. Estudio de Estado*. Vol. 1. CONABIO/Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, México. 33-44.
- Gotelli, J. N. (2008). *A primer of ecology* (Fourth). Sinauer Associates, Inc. Fourth edition. Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc.
- Halofsky, J. E., Donato, D. C., Hibbs, D. E., Campbell, J. L., Cannon, M. D., Fontaine, J. B., Thompson, J. R., Anthony, R. G., Bormann, B. T., Kayes, L. J., Law, B. E., Peterson, D. L., & Spies, T. A. (2011). Mixed-severity fire regimes: Lessons and hypotheses from the Klamath-Siskiyou Ecoregion. *Ecosphere*, 2(4), 1–19. <https://doi.org/10.1890/ES10-00184.1>
- Heinselman, M. L. (1973). Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quaternary Research*, 3(3), 329–382. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(73\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(73)90003-3)
- He, T., Pausas, J. G., Belcher, C. M., Schwilk, D. W., & Lamont, B. B. (2012). Fire-adapted traits of *Pinus* arose in the fiery Cretaceous. *New Phytologist*, 194(3), 751–759. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04079.x>
- Hessburg, P. F., Agee, J. K., & Jerry, F. (2005). Dry forests and wildland fires of the inland Northwest USA: Contrastanting the landscape ecology of the pre-settlement and modern eras. *Forest Ecology and Management*, 211, 117–139. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.01>
- Hessburg, P. F., Churchill, D. J., Larson, A. J., Haugo, R. D., Miller, C., Spies, T. A., North, M. P., Povak, N. A., Belote, R. T., Singleton, P. H., Gaines, W. L., Keane, R. E., Aplet, G. H., Stephens, S. L., Morgan, P., Bisson, P. A., Rieman, B. E., Salter, R. B., & Reeves, G. H. (2015). Restoring fire-prone Inland Pacific landscapes: seven core principles. *Landscape Ecology*, 30(10), 1805–1835. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0218-0>
- Hessburg, P. F., Miller, C. L., Parks, S. A., Povak, N. A., Taylor, A. H., Higuera, P. E., Prichard, S. J., North, M. P., Collins, B. M., Hurteau, M. D., Larson, A. J., Allen, C. D., Stephens, S. L., Rivera-Huerta, H., Stevens-Rumann, C. S., Daniels, L. D., Gedalof, Z., Gray, R. W., Kane, V. R., ... Salter, R. B. (2019). Climate, Environment, and Disturbance History Govern Resilience of Western North American Forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7(July), 1–27. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00239>
- Holmes, R. L (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement, *Tree-Ring Bulletin*, no. 43, pp. 69-78.

- INEGI. (2000). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. *Conjunto de datos vectoriales de los tipos de clima de Coahuila*.
- INEGI. (2004). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Guías para interpretación de cartografía edafológica. México.
- INEGI. (2011). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Conjunto de datos vectoriales de subprovincias fisiográficas de Coahuila.
- Iniguez, J. M., Swetnam, T. W., & Baisan, C. H. (2016). Fire history and moisture influences on historical forest age structure in the sky islands of southern Arizona, USA. *Journal of Biogeography*, 43(1), 85–95. <https://doi.org/10.1111/jbi.12626>
- Lamont, B. B., Pausas, J. G., He, T., Witkowski, E. T. F., & Hanley, M. E. (2020). Fire as a Selective Agent for both Serotiny and Nonserotiny Over Space and Time. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 39(2), 140–172. <https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1768465>
- Lotan, J. E. (1976). Cone serotiny - fire relationships in lodgepole pine. In: tall timbers fire ecology conference proceeding 14, tall timbers research center, Tallahassee, FL. *Quinney Natural Resources Research Library, S.J. and Jessie E.*, 14, 267–278. <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=barkbeetles>
- Magurran, A. E. (2004). Measuring Biological Diversity. *Blackwell Science*, 29(2), 285–286. <https://doi.org/10.2989/16085910409503825>
- Margolis, E. Q., Swetnam, T. W., & Allen, C. D. (2011). Historical stand-replacing fire in upper montane forests of the Madrean sky islands and Mogollon Plateau, southwestern USA. *Fire Ecology*, 7(3), 88–107. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0703088>
- Martínez M. (1948). Los pinos mexicanos. Editorial Botas. 2° edición. México. D. F. México. 361 p.
- McKee, K. L., Rooth, J. E., & Feller, I. C. (2007). Mangrove recruitment after forest disturbance is facilitated by herbaceous species in the Caribbean. *Ecological Applications*, 17(6), 1678–1693. <https://doi.org/10.1890/06-1614.1>
- Menges, E. S., Craddock, A., Salo, J., Zinthefer, R., & Weekley, C. W. (2008). Gap ecology in Florida scrub: Species occurrence, diversity and gap properties. *Journal of Vegetation Science*, 19(4), 503–514. <https://doi.org/10.3170/2008-8-18399>
- Meunier, J., Brown, P. M., & Romme, W. H. (2014). Tree recruitment in relation to climate and fire in northern Mexico. *Ecology*, 95(1), 197–209. <https://doi.org/10.1890/13-0032.1>
- Moreno, J. M., & Oechel, W. C. (1991). Fire Intensity Effects on Germination of Shrubs and Herbs in Southern California Chaparral. *Ecology*, 72(6), 1993–2004.

<https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1941554>

- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims Methods of Vegetation Ecology* (I. John Wiley & Sons (ed.)).
- Myers R. L. (1992). Sand and high pine. In “Ecosystems of Florida”. (Eds RL Myers and JJ Ewel) pp. 150-193. (University of Central Florida Press: Orlando).
- North, M., Stine, P., O’Hara, K., Zielinski, W., & Stephens, S. (2009). An Ecosystem Management Strategy for Sierran Mixed- Conifer Forests. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-220. Albany, CA: In U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- Owen, S. M., Sieg, C. H., Sánchez Meador, A. J., Fulé, P. Z., Iniguez, J. M., Baggett, L. S., Fornwalt, P. J., & Battaglia, M. A. (2017). Spatial patterns of ponderosa pine regeneration in high-severity burn patches. *Forest Ecology and Management*, 405(July), 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.005>
- Palacio, F. X., Apodaca, M. J., & Crisci, J. V. (2020). *Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R* (Vazquez Mazzini (ed.); 1a ed.).
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>
- Peet, R. k. (1978). Forest vegetation of the Colorado Front Range: Patterns os species diversity. *Plant Ecology*, 37, 65–78.
- POE. (2017). Decreto por el cual se modifica la categoría del Área Natural Protegida con el carácter de Zona Sujeta a Conservación Ecológica, un Área de la Serranía conocida como Zapalinamé, para quedar como Reserva Natural Estatal. *Periódico Oficial Del Estado de Coahuila de Zaragoza, Tomo CXXIV(82)*, 1–4.
- Puhlick, J. J., Laughlin, D. C., & Moore, M. M. (2012). Factors influencing ponderosa pine regeneration in the southwestern USA. *Forest Ecology and Management*, 264, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.002>
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2005). Distribución y Conservación de las Poblaciones Naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botanica Mexicana*, 72, 1–16.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Z., P., & Fulé. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(McPhaden 1999), 23–37. <https://doi.org/doi.org/10.1071/WF02040>
- Schoennagel, T., Sherriff, R. L., & Veblen, T. T. (2011). Fire history and tree recruitment in the Colorado Front Range upper montane zone: Implications for forest restoration. *Ecological Applications*, 21(6), 2210–2222. <https://doi.org/10.1890/10-1222.1>

- Sherriff, R. L., & Veblen, T. T. (2006). Ecological effects of changes in fire regimes in *Pinus ponderosa* ecosystems in the Colorado Front Range. *Journal of Vegetation Science*, 17(6), 705. [https://doi.org/10.1658/1100-9233\(2006\)17\[705:eeocif\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1658/1100-9233(2006)17[705:eeocif]2.0.co;2)
- Stephens, S. L., Fry, D. L., & Franco-Vizcaíno, E. (2008). Wildfire and spatial patterns in forests in Northwestern Mexico: United States wishes it had similar fire problems. *Ecology and Society*, 13(2). <https://doi.org/10.5751/ES-02380-130210>
- Stein, S. J., & Kimberling, D. N. (2003). Germination, establishment, and mortality of naturally seeded Southwestern ponderosa pine. *Western Journal of Applied Forestry*, 18(2), 109–114. <https://doi.org/10.1093/wjaf/18.2.109>
- Stevens-Rumann, C. S., & Morgan, P. (2019). Tree regeneration following wildfires in the western US: a review. *Fire Ecology*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0032-1>
- Stokes, M.A. & T.L. Smiley. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois. 73 p.
- Keeley, J. E., & Fotheringham, C. J. (2000). Role of fire in regeneration from seed. In *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities* (2a ed., Issue January, pp. 311–330). <https://doi.org/10.1079/9780851994321.0311>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Constante-García, V., Fulé, P. Z., & Cornejo-Oviedo, E. (2009). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para saltillo, Coahuila. *Madera Bosques*, 15(3), 45–64.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D. ., Constante García, V., Vázquez Salem, L., Estrada Ávalos, J., & Benavides Solorio, J. de D. (2010). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 7–29.
- Villanueva Díaz, J. y G.R. McPherson. (2002). Impacto del cambio de uso del suelo e incendios en la estructura de tres comunidades forestales. *Ciencia Forestal* 27 (91): 27 – 53.
- Villafranca, M. H., Bustillos, C. W. G., García, L. S., & Hernández, Y. G. (2012). Diferentes métodos estadísticos para el análisis de variables discretas. Una aplicación en las ciencias agrícolas y técnicas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(1), 58–62.
- Wackerly, D. D., Mendenhall III, W., & Scheaffer, R. L. (2010). *Estadística Matemática con Aplicaciones* (7th ed.).
- Yocom, L. L., & Fulé, P. Z. (2012). Human and climate influences on frequent fire in a high-elevation tropical forest. *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1356–1364. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02216.x>

Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, J., Villanueva-Diaz, J., Falk, D. A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010). El Niño-Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, *91*(6), 1660–1671. <https://doi.org/10.1890/09-0845.1>

Zelterman, D. (2015). Applied Multivariate Statistics with R. In *Statistics for Biology and Health*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14093-3>

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados de la presente investigación sugieren que los bosques de *Pinus greggii* var. *greggii* están adaptados a un régimen de severidad mixta, donde los incendios de copa y superficiales en rodales pequeños son parte de la historia natural. También, con base en la estructura arbórea y de edades, se deduce que los incendios de copa pequeños generan mayor reclutamiento, asociados con la apertura de conos y liberación de semillas, y con condiciones favorables de humedad. Las especies herbáceas y arbustivas favorecen la continuidad vertical de los combustibles, lo que permite que incendios alcancen las copas de los árboles y generen el calor suficiente para la liberación de semillas. La diversidad de estructuras (rodales de copas pequeñas, medianas y grandes) que crea el régimen de incendios de severidad mixta, sugiere que los bosques de *Pinus greggii* pueden ser resistentes a las perturbaciones derivadas del cambio climático. La reconstrucción del régimen histórico de incendios indica que éstos han sido pequeños y frecuentes (3.4-5.9 años), con mayor ocurrencia en primavera, excepto en el sitio de CNO que ocurrieron en verano. No hubo relación significativa de los incendios con patrones climáticos, pero sí con la fase de La Niña. Además, el clima, la topografía y uso del suelo controlan el régimen de incendios, excepto en el sitio TVE en donde el análisis mostró que el clima ha sido más importante en la ocurrencia de incendios. La frecuencia de incendios en las últimas dos décadas ha disminuido en CNE, atribuible en parte a actividades humanas, se ha mantenido en CNO y ha aumentado en TVE, lo que se asocia a variaciones climáticas. Además, se presentó una relación positiva de humedad por arriba del promedio dos años previos al incendio, y condiciones secas el año previo al incendio.

APÉNDICES

Apéndice 1.1. Listado florístico de especies arbustivas, densidad por hectárea e índice de diversidad de Shannon-Wiener para El Penitente, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Familia	Especies	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Anacardiaceae	<i>Rhus virens</i>	Lindh. ex A. Gray	44	33	211	0.02	0.01	0.06
	<i>Agave gentryi</i>	B. Ullrich	2544	1478	156	0.29	0.24	0.05
	<i>Agave montana</i>	Villarreal	33	144	22	0.01	0.05	0.01
Asparagaceae	<i>Dasylirion cedrosanum</i>	Trel.	856	811	2133	0.16	0.17	0.28
	<i>Nolina cespitifera</i>	Trel.	0	56	0	0	0.02	0
	<i>Yucca carnerosana</i>	(Trel.) McKelvey	456	311	78	0.1	0.09	0.03
	<i>Ageratina calaminthifolia</i>	(Kunth) RM King y H. Rob.	0	0	422	0	0	0.1
	<i>Ageratina saltillensis</i>	(BL Rob.) RM King y H. Rob.	1533	3022	756	0.22	0.33	0.15
	<i>Ageratina scorodonioides</i>	(A. Gray) RM King y H. Rob.	0	11	0	0	0.01	0
Asteraceae	<i>Chrysactinia mexicana</i>	A. Gray	389	89	556	0.09	0.03	0.12
	<i>Chrysactinia truncata</i>	S. Watson	0	0	389	0	0	0.1
	<i>Stevia porphyrea</i>	McVaugh	22	0	0	0.01	0	0
	<i>Verbesina daviesiae</i>	B.L. Turner	0	0	122	0	0	0.04
Cactaceae	<i>Opuntia</i> sp.		11	0	0	0.01	0	0
	<i>Turbnicarpus beguinii</i>	(N.P. Taylor) Mosco & Zanov.	22	0	0	0.01	0	0
Celastraceae	<i>Mortonia greggii</i>	A. Gray	33	0	778	0.01	0	0.16
Cupressaceae	<i>Juniperus flaccida</i>	Schtdl.	11	11	0	0.01	0.01	0
Ericaceae	<i>Arbutus xalapensis</i>	Kunth	211	122	167	0.06	0.04	0.05
	<i>Arctostaphylos pungens</i>	Kunth	22	67	700	0.01	0.03	0.14
	<i>Quercus greggii</i>	(A. DC.) Trel.	0	0	1189	0	0	0.2
	<i>Quercus hypoxantha</i>	Trel.	467	311	433	0.1	0.09	0.1
Fagaceae	<i>Quercus microphylla</i>	Née	0	33	0	0	0.01	0
	<i>Quercus pringlei</i>	Seemen	5833	4944	1844	0.37	0.37	0.26
	<i>Quercus saltillensis</i>	Trel.	67	211	0	0.02	0.06	0
	<i>Quercus striatula</i>	Trel.	267	0	0	0.07	0	0
Garryaceae	<i>Garrya glaberrima</i>	Wangerin	789	122	0	0.15	0.04	0
	<i>Garrya ovata</i>	Benth.	233	0	56	0.06	0	0.02
Hydrangeaceae	<i>Fendlerella lasiopetala</i>	Standl.	11	11	0	0.01	0.01	0
	<i>Poliomintha longiflora</i>	A. Gray	344	111	2411	0.08	0.04	0.3
Lamiaceae	<i>Salvia greggii</i>	A. Gray	289	100	89	0.07	0.04	0.03
	<i>Salvia regla</i>	Cav.	178	122	0	0.05	0.04	0
Lauraceae	<i>Litsea parvifolia</i>	(Hemsl.) Mez	22	111	467	0.01	0.04	0.11
Rhamnaceae	<i>Ceanothus caeruleus</i>	Lag.	0	33	0	0	0.01	0
	<i>Ceanothus greggii</i>	A. Gray	211	300	678	0.06	0.08	0.14

Familia	Especies	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
	<i>Cercocarpus montanus</i>	Raf.	856	1044	1056	0.16	0.2	0.19
Rosaceae	<i>Lindleya mespiloides</i>	Kunth	422	0	0	0.1	0	0
	<i>Purshia plicata</i>	(D. Don) Henrickson	0	11	0	0	0.01	0
Total			16178	13622	14711	2.29	2.07	2.65

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

Apéndice 1.2. Listado florístico de especies herbáceas, densidad por hectárea e índice de diversidad de Shannon-Wiener para El Penitente, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Familia	Especies	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
	<i>Arracacia ternata</i>	Mathias & Constance	0	0	21667	0	0	0.25
Apiaceae	<i>Donnellsmithia ternata</i>	(S. Watson) Mathias & Constance	0	556	0	0	0.03	0
	<i>Eryngium gramineum</i>	F. Delaroche	4444	2778	556	0.12	0.09	0.02
	<i>Baccharis potosina</i>	A. Gray	22222	556	0	0.3	0.03	0
	<i>Chaptalia nutans</i>	(L.) Pol.	0	0	3889	0	0	0.08
	<i>Cirsium texanum</i>	Buckley	2222	1111	0	0.07	0.05	0
Asteraceae	<i>Dyssodia pinnata</i>	(Cav.) B.L. Rob.	0	556	0	0	0.03	0
	<i>Helianthella mexicana</i>	A. Gray	1667	556	35000	0.06	0.03	0.32
	<i>Hieracium crepidispermum</i>	Fr.	1667	0	0	0.06	0	0
	<i>Verbesina coahuilensis</i>	A. Gray ex S. Watson	556	0	17222	0.02	0	0.22
	<i>Verbesina hypomalaca</i>	B.L. Rob. & Greenm.	0	21667	5000	0	0.32	0.1
Caryophyllaceae	<i>Arenaria lanuginosa</i>	(Michx.) Rohrb.	8333	4444	0	0.18	0.13	0
Cyperaceae	<i>Carex schiedeana</i>	Kunze	40000	0	13333	0.36	0	0.19
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia brachycera</i>	Engelm.	6667	9444	1111	0.15	0.21	0.03
	<i>Euphorbia serrula</i>	Engelm.	0	556	556	0	0.03	0.02
Lamiaceae	<i>Hedeoma costata</i>	A. Gray	556	2222	0	0.02	0.08	0
	<i>Salvia glechomifolia</i>	Kunth	5556	3333	0	0.14	0.1	0
Linaceae	<i>Linum rupestre</i>	(A. Gray) Engelm. ex A. Gray	0	0	556	0	0	0.02
Lythraceae	<i>Cuphea cyanea</i>	DC.	0	556	0	0	0.03	0
Orchidaceae	<i>Malaxis hintonii</i>	Todzia	0	5556	0	0	0.15	0
Oxalidaceae	<i>Oxalis</i> sp.		556	0	0	0.02	0	0
	<i>Brachypodium mexicanum</i>	(Roem. & Schult.) Link	22778	40556	47222	0.31	0.37	0.35
	<i>Bromus</i> sp.		0	556	0	0	0.03	0
Poaceae	<i>Muhlenbergia dubia</i>	E. Fourn.	0	2778	0	0	0.09	0
	<i>Peyritschia deyeuxioides</i>	(Kunth) Finot	10556	13333	10000	0.2	0.25	0.16
	<i>Schizachyrium sanguineum</i>	(Retz.) Alston	1111	0	0	0.04	0	0
Polygalaceae	<i>Polygala lindheimeri</i>	A. Gray	0	0	23889	0	0	0.27

Familia	Especies	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Polygonaceae	<i>Eriogonum atrorubens</i>	Engelm.	556	1111	0	0.02	0.05	0
Rubiaceae	<i>Bouvardia ternifolia</i>	(Cav.) Schltld.	0	556	0	0	0.03	0
Total			12944	11277	18000	2.07	2.08	2.04
			4	8	0			

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

Apéndice 1.3. Listado florístico de especies arbustivas, densidad por hectárea e índice de diversidad de Shannon-Wiener para Cañón de las Norias, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Anacardiaceae	<i>Rhus aromatica</i>	Aiton	0	378	289	0	0.07	0.06
	<i>Rhus virens</i>	Lindh. ex A. Gray	100	533	256	0.03	0.09	0.06
Asparagaceae	<i>Agave gentryi</i>	B. Ullrich	44	56	311	0.02	0.01	0.07
	<i>Dasyllirion cedrosanum</i>	Trel.	178	956	1767	0.05	0.14	0.22
	<i>Nolina cespitifera</i>	Trel.	656	1144	889	0.14	0.15	0.15
	<i>Yucca carnerosana</i>	(Trel.) McKelvey	611	1044	689	0.13	0.14	0.12
Asteraceae	<i>Ageratina calophylla</i>	(Greene) Molinari & Mayta	0	89	233	0	0.02	0.06
	<i>Ageratina nesomii</i>	B.L. Turner	22	0	100	0.01	0	0.03
	<i>Ageratina saltillensis</i>	(BL Rob.) RM King y H. Rob.	1389	1267	1378	0.22	0.16	0.19
	<i>Chrysactinia mexicana</i>	A. Gray	0	967	1078	0	0.14	0.17
	<i>Zaluzania megacephala</i>	Sch. Bip.	156	0	0	0.05	0	0
	<i>Zinnia juniperifolia</i>	(DC.) A. Gray	0	0	100	0	0	0.03
Caprifoliaceae	<i>Lonicera pilosa</i>	(Kunth) Spreng.	0	0	56	0	0	0.02
Cupressaceae	<i>Juniperus deppeana</i>	Steud.	67	22	33	0.02	0.01	0.01
Ericaceae	<i>Arbutus xalapensis</i>	Kunth	367	67	67	0.09	0.02	0.02
	<i>Arctostaphylos pungens</i>	Kunth	11	244	522	0.01	0.05	0.1
Fagaceae	<i>Quercus hypoxantha</i>	Trel.	2611	1667	2256	0.31	0.19	0.26
	<i>Quercus microphylla</i>	Née	322	0	0	0.08	0	0
	<i>Quercus pringlei</i>	Seemen	1867	4456	1389	0.26	0.32	0.19
	<i>Quercus saltillensis</i>	Trel.	222	367	0	0.06	0.07	0
	<i>Quercus striatula</i>	Trel.	944	0	0	0.18	0	0
Garryaceae	<i>Garrya ovata</i>	Benth.	1056	700	456	0.19	0.11	0.09
Lamiaceae	<i>Poliomintha longiflora</i>	A. Gray	0	522	1222	0	0.09	0.18
	<i>Salvia greggii</i>	A. Gray	78	211	144	0.03	0.04	0.04
	<i>Salvia regla</i>	Cav.	333	44	11	0.09	0.01	0
Lauraceae	<i>Litsea parvifolia</i>	(Hemsl.) Mez	2589	5822	3567	0.31	0.35	0.32
Rhamnaceae	<i>Ceanothus greggii</i>	A. Gray	489	1156	1456	0.11	0.15	0.2

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
	<i>Rhamnus microphylla</i>	Humb. & Bonpl. ex Schult.	67	56	56	0.02	0.01	0.02
Rosaceae	<i>Cercocarpus montanus</i>	Raf.	422	444	122	0.1	0.08	0.03
	<i>Lindleya mespiloides</i>	Kunth	0	11	0	0	0	0
	<i>Prunus serotina</i>	Ehrh.	133	0	0	0.04	0	0
	<i>Purshia plicata</i>	(D. Don) Henrickson	0	11	22	0	0	0.01
Rubiaceae	<i>Bouvardia ternifolia</i>	(Cav.) Schtdl.	0	11	22	0	0	0.01
Total			14733	22244	18489	2.56	2.45	2.66

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

Apéndice 1.4. Listado florístico de especies herbáceas, densidad por hectárea e índice de diversidad de Shannon-Wiener para Cañón de las Norias, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Apiaceae	<i>Donnellsmithia ternata</i>	(S. Watson) Mathias & Constance	5556	1111	5556	0.1	0.03	0.1
	<i>Eryngium gramineum</i>	F. Delaroché	8333	2778	8333	0.13	0.07	0.13
Asteraceae	<i>Aster carerosanus</i>	S. Watson	5000	0	0	0.09	0	0
	<i>Baccharis potosina</i>	A. Gray	0	8889	1111	0	0.16	0.03
	<i>Helianthella mexicana</i>	A. Gray	7778	0	0	0.13	0	0
	<i>Senecio coahuilensis</i>	Greenm.	1111	0	2222	0.03	0	0.05
	<i>Stevia ovata</i>	Willd.	1667	0	2222	0.04	0	0.05
	<i>Tagetes lucida</i>	Cav.	6111	0	0	0.11	0	0
	<i>Verbesina coahuilensis</i>	A. Gray ex S. Watson	0	0	4444	0	0	0.08
	<i>Verbesina longipes</i>	Hemsl.	17778	33333	32222	0.22	0.33	0.29
Caryophyllaceae	<i>Arenaria lanuginosa</i>	(Michx.) Rohrb.	556	0	0	0.02	0	0
Cyperaceae	<i>Carex schiedeana</i>	Kunze	5556	59444	56111	0.1	0.37	0.35
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia brachycera</i>	Engelm.	5000	3333	5556	0.09	0.08	0.1
	<i>Tragia ramosa</i>	Torr.	0	0	1111	0	0	0.03
Lamiaceae	<i>Hedeoma costata</i>	A. Gray	5000	2222	17222	0.09	0.06	0.2
	<i>Salvia glechomifolia</i>	Kunth	18889	556	6667	0.23	0.02	0.11
	<i>Salvia prunelloides</i>	Kunth	0	1667	0	0	0.05	0
Linaceae	<i>Linum rupestre</i>	(A. Gray) Engelm. ex A. Gray	0	0	556	0	0	0.02
Orobanchaceae	<i>Castilleja scorzonifolia</i>	Kunth	2222	1111	0	0.05	0.03	0
	<i>Seymeria scabra</i>	A. Gray	0	556	0	0	0.02	0
Poaceae	<i>Bouteloua uniflora</i>	Vasey	9444	0	0	0.15	0	0
	<i>Brachypodium mexicanum</i>	(Roem. & Schult.) Link	9444	6111	1667	0.15	0.12	0.04
	<i>Muhlenbergia emersleyi</i>	Vasey	50000	10556	2778	0.35	0.18	0.06

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
	<i>Peyritschia deyeuxioides</i>	(Kunth) Finot	20000	18333	17778	0.23	0.25	0.21
	<i>Piptochaetium fimbriatum</i>	(Kunth) Hitchc.	16667	1111	0	0.21	0.03	0
	<i>Schizachyrium sanguineum</i>	(Retz.) Alston	0	10000	45556	0	0.17	0.33
Polygalaceae	<i>Polygala lindheimeri</i>	A. Gray	0	0	556	0	0	0.02
Polygonaceae	<i>Eriogonum atrorubens</i>	Engelm.	556	0	0	0.02	0	0
Total			19666	16111	21166	2.53	1.97	2.17
			7	1	7			

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

Apéndice 1.5. Listado florístico de especies arbustivas, densidad por hectárea e índice de diversidad de Shannon-Wiener para Cañón del Negro, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
	<i>Rhus aromatica</i>	Aiton	367	544	600	0.08	0.1	0.1
	<i>Rhus microphylla</i>	Engelm.	56	111	0	0.02	0.03	0
Anacardiaceae	<i>Rhus virens</i>	Lindh. ex A. Gray	122	556	367	0.03	0.1	0.07
	<i>Dasyllirion cedrosanum</i>	Trel.	44	111	144	0.02	0.03	0.03
	<i>Nolina cespitifera</i>	Trel.	744	1744	1556	0.13	0.21	0.18
	<i>Yucca carnerosana</i>	(Trel.) McKelvey	11	11	0	0	0	0
	<i>Ageratina calaminthifolia</i>	(Kunth) RM King y H. Rob.	344	33	0	0.08	0.01	0
	<i>Ageratina calophylla</i>	(Greene) Molinari & Mayta	33	0	0	0.01	0	0
	<i>Ageratina saltillensis</i>	(BL Rob.) RM King y H. Rob.	800	956	844	0.14	0.15	0.12
	<i>Aztecaster matudae</i>	(Rzed.) G.L. Nesom	11	0	0	0	0	0
Asteraceae	<i>Chrysactinia mexicana</i>	A. Gray	233	267	1300	0.06	0.06	0.16
	<i>Chrysactinia truncata</i>	S. Watson	1733	3500	744	0.23	0.3	0.11
	<i>Verbesina daviesiae</i>	B.L. Turner	311	389	78	0.07	0.08	0.02
	<i>Zinnia acerosa</i>	(DC.) A. Gray	0	0	111	0	0	0.03
	<i>Zinnia juniperifolia</i>	(DC.) A. Gray	0	33	444	0	0.01	0.08
Caprifoliaceae	<i>Lonicera pilosa</i>	(Kunth) Spreng.	378	778	56	0.08	0.13	0.01
Cupressaceae	<i>Juniperus flaccida</i>	Schltld.	0	56	0	0	0.02	0
Ericaceae	<i>Arbutus xalapensis</i>	Kunth	244	111	0	0.06	0.03	0
	<i>Arctostaphylos pungens</i>	Kunth	89	367	1756	0.03	0.07	0.2
	<i>Quercus greggii</i>	(A. DC.) Trel.	2178	1367	1733	0.26	0.18	0.2
Fagaceae	<i>Quercus hypoxantha</i>	Trel.	0	33	0	0	0.01	0
	<i>Quercus pringlei</i>	Seemen	1933	644	944	0.24	0.11	0.13
Garryaceae	<i>Garrya ovata</i>	Benth.	656	1044	1922	0.12	0.15	0.21
Hydrangeaceae	<i>Philadelphus microphyllus</i>	A. Gray	11	0	0	0	0	0

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Lamiaceae	<i>Poliomintha longiflora</i>	A. Gray	1144	989	3622	0.18	0.15	0.29
	<i>Salvia greggii</i>	A. Gray	367	33	144	0.08	0.01	0.03
	<i>Salvia regla</i>	Cav.	344	56	44	0.08	0.02	0.01
Lauraceae	<i>Litsea parvifolia</i>	(Hemsl.) Mez	3167	3089	3533	0.31	0.29	0.29
Rhamnaceae	<i>Ceanothus greggii</i>	A. Gray	600	1289	1067	0.12	0.18	0.14
	<i>Rhamnus microphylla</i>	Humb. & Bonpl. ex Schult.	178	489	289	0.05	0.09	0.06
Rosaceae	<i>Cercocarpus montanus</i>	Raf.	444	378	200	0.09	0.07	0.04
	<i>Lindleya mespiloides</i>	Kunth	244	333	711	0.06	0.07	0.11
	<i>Purshia plicata</i>	(D. Don) Henrickson	667	733	233	0.12	0.12	0.05
Total			17456	20044	22444	2.77	2.77	2.69

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas

Apéndice 1.6. Listado florístico de especies herbáceas, densidad por hectárea e índice de diversidad de Shannon-Wiener para Cañón del Negro, Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Amaryllidaceae	<i>Allium kunthii</i>	G. Don	3889	0	0	0.14	0	0
Apiaceae	<i>Arracacia ternata</i>	Mathias & Constance	2778	21111	1944 4	0.11	0.3	0.33
	<i>Donnellsmithia ternata</i>	(S. Watson) Mathias & Constance	556	0	0	0.03	0	0
Asteraceae	<i>Baccharis potosina</i>	A. Gray	6667	0	5556	0.2	0	0.17
	<i>Brickellia grandiflora</i>	(Hook.) Nutt.	8333	10000	5556	0.23	0.2	0.17
	<i>Helianthella mexicana</i>	A. Gray	0	0	2222	0	0	0.09
	<i>Hieracium crepidispermum</i>	Fr.	556	1111	0	0.03	0.04	0
Boraginaceae	<i>Lithospermum viride</i>	Greene	3333	0	0	0.13	0	0
Caryophyllaceae	<i>Arenaria lanuginosa</i>	(Michx.) Rohrb.	1111	2778	556	0.06	0.08	0.03
Cyperaceae	<i>Carex schiedeana</i>	Kunze	40556	29444	2000 0	0.35	0.34	0.34
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia brachycera</i>	Engelm.	4444	13889	1111	0.15	0.24	0.06
Fabaceae	<i>Cologania angustifolia</i>	Kunth	556	0	0	0.03	0	0
Lamiaceae	<i>Hedeoma costata</i>	A. Gray	0	5556	5556	0	0.14	0.17
	<i>Salvia glechomifolia</i>	Kunth	5000	0	0	0.17	0	0
	<i>Salvia greggii</i>	A. Gray	0	5556	0	0	0.14	0
	<i>Salvia prunelloides</i>	Kunth	1111	4444	556	0.06	0.12	0.03
	<i>Scutellaria potosina</i>	Brandegge	0	3333	1722 2	0	0.1	0.32
Linaceae	<i>Linum rupestre</i>	(A. Gray) Engelm. ex A. Gray	2222	4444	0	0.09	0.12	0
Melanthiaceae	<i>Schoenocaulon texanum</i>	Scheele	2222	4444	0	0.09	0.12	0

Familia	Especie	Autor	Densidad (Individuos ha ⁻¹)			Índice de Shannon		
			CG	CM	CP	CG	CM	CP
Orchidaceae	<i>Malaxis hintonii</i>	Todzia	0	0	1111	0	0	0.06
Orobanchaceae	<i>Castilleja scorzonerifolia</i>	Kunth	0	2222	0	0	0.07	0
Poaceae	<i>Aristida purpurea</i>	Nutt.	0	0	556	0	0	0.03
	<i>Muhlenbergia glauca</i>	(Nees) B.D. Jacks.	1667	0	0	0.08	0	0
	<i>Piptochaetium fimbriatum</i>	(Kunth) Hitchc.	0	16667	4444	0	0.27	0.15
Polygalaceae	<i>Polygala barbeyana</i>	Chodat	0	1111	0	0	0.04	0
	<i>Polygala lindheimeri</i>	A. Gray	556	0	3889	0.03	0	0.14
Rubiaceae	<i>Hedyotis nigricans</i>	(Lam.) Fosberg	0	1667	0	0	0.06	0
Total			85556	12777	8777	1.99	2.35	2.1

CG= copas grandes, CM= copas medianas, CP= copas pequeñas