



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

EFECTOS DEL FUEGO EN ARBOLADO DE ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO

DULCE MARIA AVENDAÑO HERNÁNDEZ

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

MAESTRÍA TECNOLÓGICA EN
MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesina titulada: **“EFECTOS DEL FUEGO EN ARBOLADO DE ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA DEL AREA DE PROTECCION DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO.”** realizada por la estudiante: **Dulce María Avendaño Hernández** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA
EN MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ

ASESOR

DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO

ASESOR

DR. VALENTÍN JOSÉ REYES HERNÁNDEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2022

EFFECTOS DEL FUEGO EN ARBOLADO DE ECOSISTEMAS DE ALTA MONTAÑA DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO

Dulce María Avendaño Hernández, M.T.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Los incendios forestales son efectos naturales presentes en los ecosistemas forestales del Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, diversos factores han ocasionado la modificación de la frecuencia con que se presentan, del régimen, de la severidad y de la intensidad del fuego generando efectos positivos y negativos en el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl; algunos son incremento de la regeneración natural, reducción en el crecimiento de los árboles así como aumento en la mortalidad. A nivel nacional diversas instituciones realizan un gran esfuerzo por determinar el efecto que tiene el fuego en la supervivencia de diversas especies como *P. hartwegii*, *Alnus firmifolia* Fernald, y *Buddleja cordata* Kunth. En este trabajo se evaluó la probabilidad de mortalidad de *P. hartwegii*, *Alnus firmifolia* y *Buddleja cordata*, a partir de un área afectada por incendios en febrero de 2021, seleccionando los sitios de acuerdo a la severidad de afectación, resultando cuatro tipos de severidades: baja, media, alta y extrema.

Los resultados mostraron que la mortalidad de *Buddleja cordata* está influenciada por la altura de cicatriz del fuego sobre el tronco, porcentaje de soflamado negro, porcentaje de soflamado de copa verde, altura de soflamado negro y altura total, influenciada mayormente por el porcentaje de copa dañada; sin embargo, a pesar de haberse quemado la totalidad de la copa la especie tiene una gran capacidad de rebrote, se obtuvieron seis modelos logísticos. Para el caso de *Alnus firmifolia* se obtuvieron tres modelos logísticos, la probabilidad de mortalidad de esta especie está influenciada por el diámetro normal con corteza, la altura de soflamado negro y el porcentaje de soflamado verde mostrando una alta capacidad de rebrote.

La mortalidad de *Pinus hartwegii* se ve influenciada por el diámetro normal con corteza y la altura total, esto debido a que a mayor diámetro mayor es la protección al cambium y a mayor altura menor es la probabilidad de que el fuego alcance la copa, se obtuvieron dos modelos logísticos.

Palabras clave: incendio forestal, régimen del fuego, severidad del fuego, intensidad del fuego, mortalidad, rebrote.

FOREST FIRES EFFECTS ON HIGH MOUNTAIN WOODLANDS INSIDE NEVADO DE TOLUCA FLORA AND FAUNA PROTECTION AREA

Dulce María Avendaño Hernández, M.T.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

Forest fires are habitual events observed in forest ecosystems all over the Flora and Fauna Protection Area (FFPA) "Nevado de Toluca", there are many factors that causes variations over its frequency, regime, severity, and intensity detected, which generates positive and negative effects on *Pinus hartwegii* Lindl forests, some of them are increasing natural regeneration, decrease in three's growth and rising mortality rates. There are currently various institutions all over the country making a huge effort to figure out the effect that fire has over survival rates along species such as *P. hartwegii*, *Alnus firmifolia* Fernald, and *Buddleja cordata* Kunth. In this paper we've evaluated the probability of mortality for *P. hartwegii*, *Alnus firmifolia* and *Buddleja cordata* linked within an area affected by fire on February 2021, selecting sites based on the severity of affectation by fire, stablishing four stages: low, medium, high and extreme.

Results showed that mortality for *Buddleja cordata* is related to the height of the fire scar around the log, black smothered percentage, and total height, just as the three tops damage percentage, however, despite the three tops being totally burned out, this species observes remarkable regrowth capacity, obtaining six different logistical models. Talking about *Alnus firmifolia*, we got three logistical models, this species mortality rate is related to log diameter, bark included, green and black smothered percentage, being highly capable for regrowth.

Mortality for *Pinus hartwegii* is linked to bark included log diameter and total height, considering the bigger the diameter, the better protection for vascular cambium and the higher the height, the lower the probability for fire to reach the three tops, two logistical models were obtained.

Keywords: Forest fire, fire regime, fire severity, fire intensity, mortality, regrowth

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido estar aquí, por amarme y nunca soltarme.

A mi familia, Guadalupe López García, Daniela López Avendaño, Valeria Hernández Juárez, Roberto S. Avendaño Rendón y Roberto Jair Avendaño Hernández, por el gran apoyo que siempre me han brindado.

A la Dra. Gloria Fermina Tavera Alonso, por su valioso apoyo e impulso para realizar mis estudios de maestría, y por darme ese voto de confianza.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), por la oportunidad brindada para poder realizar mis estudios de Maestría.

Al M.C. Mario Fermín Castañeda Rojas, por su apoyo, que fue fundamental para poder mezclar varias actividades.

Al Biólogo Marco Antonio Castro Martínez por su apoyo para la conclusión de este trabajo.

A la Dirección del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, Área de Protección de Flora y Fauna Ciénegas del Lerma y Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, por ser mis maestras en el camino de mi formación profesional.

A mi consejo particular, Dr. Alejandro Velázquez Martínez, Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, y Dr. Valentín José Reyes Hernández; por su asesoría, paciencia y apoyo para la elaboración del presente trabajo.

Un especial agradecimiento al Doctor Dante Arturo Rodríguez Trejo, por aceptarme como su tesista en un tema tan importante en el cual es uno de los mejores, así como al Doctor Alejandro Velázquez Martínez por impulsarme a terminar este proyecto y titularme.

Al Doctor Daniel Vega Nieva y al Maestro Adrián Israel Silva Cardoza, por su valioso apoyo y asesoría para la toma de datos, y por los cursos impartidos.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría, pero sobre todo por abrir esta ventana de oportunidad para las personas que estamos trabajando.

Al Postgrado Forestal y Maestría Tecnológica en Manejo Sustentable de Bosques por abrir esta ventana de oportunidad.

A los comisariados de los Ejidos San Juan de las Huertas C. Salvador Jiménez y de Bienes Comunes de Tlacotepec C. Roberto Oran por permitir que sus núcleos agrarios sean una fuente de estudio y aprendizaje.

A los Ing. Desiderio Torres Vázquez, Lic. Fabian Ramón García, Ing. José Manuel Sánchez Sánchez, y al C. De Jesús Alvarado Rosas, quienes me apoyaron en la toma de datos para poder realizar el presente estudio.

Agradezco a todos los que de alguna manera contribuyeron en la realización de este trabajo y de mi formación.

DEDICATORIA

Con todo mi amor a ti que me has enseñado el amor, a ti que sin saberlo eres mi fuerza, a ti que me enseñaste lo maravilloso de la vida, a ti que me inspiras, a ti que aunque eres pequeña me comprendes y me apoyas, a ti que te has quedado sola en algunos momentos, a ti el ser que más amo en la vida, a ti que me enseñó que se puede amar sin condiciones, a ti que sin saberlo luchas todos los días conmigo, a ti ejemplo de fortaleza, de sabiduría, de lucha, a ti Daniela López Avendaño, la mejor hija del mundo.

A ti que hemos caminado juntos en esta vida desde hace varios años, que hemos seguido juntos los caminos profesionales, personales y familiares, que me has apoyado en mi desarrollo profesional y personal, que has comprendido lo importante que es para mí estudiar, que siempre has estado impulsándome a seguir y terminar este trabajo, que has formado parte de las grandes lecciones de la vida, a ti Guadalupe López García.

A mis padres Valeria Hernández Juárez y Roberto S. Avendaño Rendon, por darme la vida, por su amor, por su apoyo, por su confianza, por su comprensión, por enseñarme a luchar por mis sueños, por darme las alas para volar y por enseñarme a usarlas, por estar ahí todos los días y en todo momento, por hacer de mi la mujer que ahora soy, por ser ejemplo de perseverancia, de lucha, de honradez, de honestidad, de valor, de amor incondicional, de crecimiento, por todo lo que me han dado.

A ti que nacimos en la misma cuna, la mejor que Dios nos dio, a ti que nuestros caminos iniciaron en el mismo punto, a ti que me escuchas y me apoyas, a ti que entiendes mi locura, a ti que me hiciste superar mis miedos, y mis límites, a ti que sin saberlo me impulsas, a ti que me cuidaste de niña, a ti Roberto Jair Avendaño Hernández, mi hermano.

A todas aquellas niñas soñadoras, que están en cualquier lugar del mundo.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA.....	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE CUADROS	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
III. REVISION DE LITERATURA.....	5
3.1 El fuego.....	5
3.1.1 Regímenes del fuego.....	5
3.1.2 Comportamiento del Fuego	6
3.1.3 Comportamiento del fuego en el APFF Nevado de Toluca.....	7
3.1.4 Severidad del fuego	8
3.1.5 Ecología del fuego	9
3.1.6 Ecología del fuego en los bosques de coníferas	10
3.2 Incendios forestales	11
3.2.1 Efectos de los incendios forestales.....	12
3.2.2 Los incendios forestales y el manejo del fuego en el APFF Nevado de Toluca.....	13
3.3 Efectos del fuego en la mortalidad del arbolado	15
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
4.1 Descripción del área de estudio.....	17
4.1.1 Localización	17
4.1.2 Aspectos físicos	18
4.2. Muestreo en campo para la evaluación de la mortalidad.....	23
4.2.1 Severidad ocasionada por el fuego a la vegetación.....	26
4.3 Cálculos para evaluar la probabilidad de mortalidad del arbolado.....	27

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1. Cálculo de la probabilidad de mortalidad del arbolado afectado por incendio ...	30
5.1.1 Modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de <i>Buddleja</i> <i>cordata</i>	30
5.1.2 Modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de <i>Alnus firmifolia</i>	37
5.1.3 Modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de <i>Pinus hartwegii</i>	42
VI. CONCLUSIONES	47
VII. LITERATURA CITADA	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	18
Figura 2. Incendio ocurrido en Bienes Comunales de Tlacotepec, Municipio de Toluca, ubicado dentro del APFF Nevado de Toluca con clave 21NTL01 ...	24
Figura 3. Incendio ocurrido en el APFF Nevado de Toluca, con clave 21NTL02.	25
Figura 4. Soflamado en la copa y en el fuste	27
Figura 5. a) Zona afectada por incendios con severidad alta, con presencia de <i>Buddleja cordata</i> . b) Sitio con presencia de <i>Buddleja cordata</i> , afectado por incendio de severidad extrema	32
Figura 6. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura de soflamado sobre el tronco (Modelo 1).	33
Figura 7. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función del porcentaje del soflamado letal de copa (Modelo 2).	33
Figura 8. Probabilidad de mortalidad del fuste original de tepozán (con rebrotación posterior), en función del porcentaje verde de copa (Modelo 3).....	34
Figura 9. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura total y altura de soflamado negro (HSNE) (Modelo 4).	34
Figura 10. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura total y del porcentaje de soflamado negro (SNE) (Modelo 5).	35
Figura 11. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura total y del porcentaje de soflamado verde (SVE) (Modelo 6).....	35
Figura 12. Afectación de incendio a arbolado de <i>Alnus firmifolia</i> : a) Zona afectada por incendio con severidad alta. b) Sitio afectado por incendio con severidad media, c) Sitio afectado con severidad baja.	39
Figura 13. Probabilidad de mortalidad de aile, en función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal (Modelo 7).....	40
Figura 14. Probabilidad de mortalidad de aile, en función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal y altura de soflamado negro (Modelo 8).	40
Figura 15. Probabilidad de mortalidad de aile, en función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal y porcentaje de soflamado verde (Modelo 9).....	41

Figura 16. Afectación de incendio a arbolado de <i>Pinus hartwegii</i> : A. Zona afectada por incendio con severidad baja. B. Sitio afectado por incendio con severidad extrema. C. Sitio afectado con severidad alta.....	44
Figura 17. Probabilidad de mortalidad de <i>P. hartwegii</i> como función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal (Modelo 15).	45
Figura 18. Expresión gráfica de la probabilidad de mortalidad de <i>P. hartwegii</i> como función de la altura total (Modelo 16).	46

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Clases de severidad de incendio de acuerdo con la clasificación propuesta por Turner y Romme (1994) y Silva (2021)	9
Cuadro 2. Incendios registrados en el APFF Nevado de Toluca de 2006 – 2021.....	14
Cuadro 3. Incendios seleccionados en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.	23
Cuadro 4. Componentes considerados para medir la severidad.....	25
Cuadro 5. Sitios considerados para la toma de datos de acuerdo a la severidad.....	29
Cuadro 6. Variables dasométricas y de severidad del fuego consideradas.	31
Cuadro 7. Significancia de los modelos de probabilidad de mortalidad para <i>Buddleja cordata</i> (modelos 1 al 6).....	32
Cuadro 8. Significancia de los modelos de probabilidad de mortalidad para <i>Alnus firmifolia</i> (modelos 7 al 9).	39
Cuadro 9. Significancia de los modelos de probabilidad de mortalidad para <i>Pinus hartwegii</i> (modelos 15 y 16).	44

I. INTRODUCCIÓN

El fuego es un elemento esencial y natural en el funcionamiento de diversos ecosistemas forestales. Los seres humanos lo han utilizado desde hace miles de años como una herramienta de apoyo en la evolución de la tierra, ha influido en las comunidades vegetales a lo largo del tiempo y, como proceso natural, cumple una función importante para mantener la salud de determinados ecosistemas (Nasi, *et al.*, 2002). En la última parte del siglo XX, la modificación de la dinámica establecida entre la actividad humana, los incendios y la mayor frecuencia del fenómeno El Niño, han dado lugar a una situación en la que los incendios son una amenaza importante para muchos bosques y su biodiversidad (FAO, 2001). Aunque el fuego es un instrumento importante para la evolución de la tierra, tiene otra faceta, particularmente cuando se alteran los regímenes de fuego naturales o base, que produce efectos catastróficos que conducen a daños ecológicos, económicos, sociales y ambientales, como la degradación forestal (FAO, 2013; Rodríguez Trejo, 2014).

Los efectos de los incendios en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y en los ecosistemas forestales en general, se asocian con la intensidad, recurrencia y duración de este. Estos efectos pueden ser directos tales como pérdida de flora, fauna y degradación del suelo, o indirectos, los cuales pueden ser erosión del suelo, contaminación del agua, deslizamientos de tierra, entre otros (Ubeda y Sarricolea, 2016). No todos los efectos directos o indirectos son dañinos, ya que existen algunos incendios que benefician a los ecosistemas forestales, particularmente a aquellos que son dependientes del fuego, ya que forman parte de su dinámica; el fuego entonces, puede ser una herramienta de manejo o un factor de deterioro ambiental, dependiendo de las condiciones en las que se presente (Jardel *et al.*, 2009).

Los efectos de los incendios son muy variados debido a múltiples factores, entre los que destacan la cantidad de biomasa disponible, intensidad (temperaturas alcanzadas y duración), área quemada, tiempo desde el último incendio, tipo de suelo, humedad, pendiente y vegetación (Neary *et al.*, 1999); así se conforma en cada ecosistema un régimen de incendios concreto. Sin embargo, en un mismo ecosistema e incluso en un mismo incendio, la severidad y los efectos del fuego son diferentes y resultan en un

mosaico de manchas de vegetación y suelo que se recuperará con o sin rehabilitación y restauración posterior (CONAF, 2017).

Los ecosistemas forestales del Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, están constantemente sometidos a presión antrópica, la cual afecta su superficie y reduce la densidad del arbolado afectando principalmente al bosque de *Pinus hartwegii* Lindl., o pino de las alturas, denominado así por ser el único en México que habita en los límites de la vegetación arbórea, y crece hasta los 4200 m s.n.m. (CONANP, 2016). *Pinus hartwegii*, es una especie con adaptaciones al fuego, tales como corteza gruesa aislante, estado cespitoso, rebrotes basales, recuperación de copa quemada, poda natural y capacidad de regenerar sitios quemados. Se estima que en estos bosques la ocurrencia promedio de incendios naturales es cada cinco años (Rodríguez y Fulé, 2003), los cuales son provocados por rayos y actividad volcánica. Sin embargo, los incendios inducidos superan a los naturales (Rodríguez, 2001), en algunos casos, debido a la mala gestión en el manejo del fuego, así como a la intervención humana. Lo anterior ha ocasionado la modificación del régimen de fuego en estos ecosistemas, lo que se ha asociado con una mayor tasa de mortalidad del arbolado joven, mayor liberación de gases de efecto invernadero (CO, CO₂ y CH₄), y con menores tasas de crecimiento del arbolado remanente (Vélez, 2000; Rodríguez *et al.*, 2004).

A principios de 2021, el APFF Nevado de Toluca fue afectada por incendios de grandes magnitudes en superficie, en su mayoría superficiales, los cuales, de acuerdo a recorridos realizados por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), afectaron arbolado de *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl., *Alnus firmifolia* Fernald, *Buddleja cordata* Kunth y zonas de reforestación de *Cupressus lindleyii*; sin embargo, existe el registro de algunas áreas con incendio de copa, situación que se debe quizá a la carga de combustibles y a su continuidad vertical. En un estudio realizado en el APFF Nevado de Toluca en 2015, Castañeda *et al.* (2015), mencionan que la carga de combustibles muertos en los bosques varía según la densidad del arbolado, siendo hasta de 34 t·ha⁻¹.

El presente estudio se llevó a cabo debido a la importancia que tienen los ecosistemas forestales del ANP, en particular el bosque de pino; se identifica la severidad de dos

incendios ocurridos en 2021 y la probabilidad de mortalidad de arbolado, con la finalidad de obtener resultados que nos den bases para la toma de decisiones respecto a la implementación de acciones de recuperación, rehabilitación, restauración, conservación y/o protección.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo

Evaluar y modelar las probabilidades de mortalidad de individuos de *Pinus hartwegii*, *Alnus firmifolia*, y *Buddleja cordata*, a partir del análisis de severidad en dos incendios forestales ocurridos en 2021 en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

2.2 Objetivos específicos

- a) Rodalizar las áreas afectadas por el incendio de acuerdo a su severidad producto de los incendios ocurridos del 14 al 19 de febrero del 2021 en el APFF Nevado de Toluca para identificar los tipos de severidad.
- b) Conocer el grado en que la severidad de un incendio modifica las características estructurales del ecosistema bajo estudio.
- c) Evaluar y modelar la probabilidad de mortalidad de arbolado de *P. hartwegii*, *Alnus firmifolia*, y *Buddleja cordata* en la superficie que fue afectada por los incendios ocurridos del 14 al 19 de febrero de 2021 en el APFF Nevado de Toluca.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El fuego

Durante millones de años, el fuego ha sido, y continúa siendo, una fuerza evolutiva mayor que define el tipo de vida en la tierra, las comunidades humanas se han beneficiado de él, usándolo para cocinar, proveer calor, cazar, cultivar, manejar la vegetación y producir energía (The Nature Conservancy, 2004); desde que el hombre lo descubrió, tiene un papel importante en los procesos evolutivos (The Nature Conservancy, 2006) y de ordenación de la Tierra (Shlisky *et al.*, 2007).

La abundancia de carbones en los sedimentos demuestra que el fuego ha actuado desde hace 400 millones de años (principios del Devónico) cambiando su frecuencia e intensidad, según los niveles de oxígeno atmosférico y el clima, y ha influido en la composición de los gases de la atmósfera, el clima, la biota, las geoformas, el transporte de materiales y las tasas de sedimentación (Scott, 2000; Scott, 2009).

Es un proceso natural que ha influido en las comunidades vegetales a lo largo del tiempo y cumple una función importante para mantener la salud de determinados ecosistemas. Los beneficios e impactos del fuego son amplios, la mayoría de los hábitats terrestres dependen del fuego para su sostenibilidad ecológica (Shlisky *et al.*, 2007), pero debido al cambio climático y al uso y abuso humano del fuego, los incendios son considerados como una de las causas más importantes de alteración de los ecosistemas (Eiten 1992; Bond y Keeley, 2005; Certini, 2005; Neary, *et.al.* 1999; Kutiel, 2006). Sus impactos dependen de la variabilidad de la estructura del paisaje, del comportamiento, de la intensidad, recurrencia y duración del incendio forestal (Ubeda y Sarricolea, 2016), así como de las condiciones atmosféricas, del tipo de combustible y de la topografía del terreno (NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007).

3.1.1 Regímenes del fuego

Myers (2006) define al régimen de fuego como un conjunto de condiciones recurrentes del fuego que caracteriza a un ecosistema dado y se refieren a la frecuencia, al comportamiento, severidad, momento y tamaño de la quema, modelo de propagación

del fuego y modelo y distribución de la quema, todo esto, dentro de un rango específico. El mismo autor señala que existen regímenes de fuego, ecológicamente adecuados y alterados o indeseables.

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2010), considera que las relaciones del fuego con un ecosistema definen su régimen, y que tiene que ver con la severidad, la intensidad, la escala espacial, la estacionalidad y la fuente predominante de ignición; es decir, la presencia del fuego en un ecosistema posee un “patrón” específico y atributos. Los regímenes en casi todos los tipos de hábitat, están amenazados por la supresión o la introducción inadecuada de fuego, por lo que la estrategia más usual para atender el problema de los incendios forestales está enfocada en suprimirlo y con frecuencia se dejan de lado los aspectos ecológicos (CONANP, 2011).

De esta manera, un régimen de fuego puede ser considerado como una síntesis de la ocurrencia de incendios, de su comportamiento y de sus efectos dentro de un área específica a lo largo del tiempo y que incluye parámetros específicos tales como la frecuencia o intervalo de retorno entre incendios (Agee, 1993, Jardel *et al.*, 2009), extensión, época de ocurrencia o estacionalidad, tipo de incendio, severidad (magnitud de los efectos en el ecosistema) e intensidad (Kaufmann *et al.*, 2006; Lloret, 2004) y su sinergia con otros agentes de perturbación (Agee, 1993, Jardel *et al.*, 2009) así como duración, extensión, distribución espacial, profundidad de la quema y tipo de incendio (Gill, 1975; Heinselman, 1978; Kilgore, 1981; Whelan, 1995).

3.1.2 Comportamiento del Fuego

El comportamiento del fuego es un término empleado para designar la forma de desarrollo del fuego en un incendio forestal, algunos especialistas utilizan este término para hacer referencia a las características físicas que puede poseer el fuego durante el transcurso de un incendio, y que controlan el desarrollo potencial de los efectos que se pueden alcanzar en su propagación (Julio, A.G. y Giroz G.G, 1975).

El comportamiento del fuego está dado por tres factores: condiciones atmosféricas (temperatura, humedad relativa, y dirección y velocidad del viento), combustibles y topografía del terreno (pendiente, exposición, y altitud) (Ryan, 2002).

Rodríguez *et al.* (2019), establecen que el comportamiento del fuego es todo lo que éste hace, su velocidad de propagación, intensidad (cantidad de calor que libera y que se estima con la longitud de llamas), tipo (superficial, subterráneo, aéreo), y forma, si presenta uno o más frentes o si está produciendo pavesas y focos secundarios.

3.1.3 Comportamiento del fuego en el APFF Nevado de Toluca

En el Nevado de Toluca se han presentado incendios forestales con comportamientos extremos, debido a la cantidad de combustible presente, a sus terrenos escarpados, a la velocidad del viento, y a los diversos intereses que existen por parte de los usuarios del área. La ocurrencia de incendios no solo está influenciada por factores climáticos, biológicos y topográficos, sino que también en gran medida por el manejo que la gente realiza en los ecosistemas (Caldaro, 2002).

a) Combustibles

Las cargas de combustibles varían en función de la etapa sucesional del bosque, de su altitud, y del tipo y nivel de disturbio presente (Rodríguez, 2001). Castañeda *et al.* (2015), encontraron que la carga de combustibles muertos en los bosques de *Pinus hartwegii* del APFF Nevado de Toluca varía según la densidad del bosque. El bosque denso presentó 25 t ha⁻¹, el semidenso 24 t ha⁻¹ y el fragmentado 34 t ha⁻¹; en el bosque denso se presenta una cantidad significativamente alta de combustibles finos (acículas y ramas delgadas) lo que propiciaría un incendio superficial y de rápido desplazamiento; en el bosque fragmentado, con presencia de combustibles de 100 horas de tiempo de retardo (diámetros de 2.5 a 7.5 cm) y presencia de 15.02 t ha⁻¹ de combustibles con 1000 h de tiempo de retardo (diámetros mayores o iguales a 7.5 cm), se prevé que se presentarían incendios mucho más severos.

b) Condición atmosférica

De acuerdo a la normal climatológica número 00015062 NEVADO DE TOLUCA, colocada por el Servicio Meteorológico Nacional dentro del Área Natural Protegida, en la zona de estudio se tiene una temperatura máxima de 23°C, que se presentó en 2018 y una temperatura mínima de 0°C, la cual se registró en 2019.

Por la altitud a la que se encuentran los bosques, se considera que en las horas de mayor peligro se presentan vientos superiores a 20 km h^{-1} , especialmente durante los meses de febrero y marzo, con rachas que van de los 45 km h^{-1} , hasta incluso 60 km h^{-1} . Aunque las temperaturas son bajas, la cantidad de combustibles finos (zacates, hojarasca) y leñosos con bajos tiempos de retardo, frecuentemente están disponibles durante la temporada de estiaje, debido a que los vientos y las heladas desecan el material combustible y eliminan la humedad del mismo, haciéndolos disponibles a la combustión.

c) Topografía

La topografía del área es accidentada, con sitios con un 5% de pendiente hasta zonas con pendientes superiores al 100%; así mismo, podemos encontrar cañadas y algunos lugares planos, situación que hace difícil el combate de los incendios forestales.

3.1.4 Severidad del fuego

El fuego es considerado como uno de los principales agentes de deterioro de los ecosistemas forestales (Perry *et al.*, 2008), debido al factor severidad que determina el impacto del fuego sobre la vegetación, siendo esta la que promueve la heterogeneidad ecológica, ya sea a escala del rodal, o a nivel paisaje (Gill *et al.*, 1999; Bekker y Taylor, 2010).

Para determinar la afectación de un incendio forestal y conocer el régimen de fuego, es importante conocer la severidad con la que ocurrió el incendio, la cual se interpreta como el grado de impacto en el ecosistema (Keeley, 2009). Turner y Romme (1994) proponen tres clases de severidad, y Silva (2021) propone una cuarta clase (Cuadro 1).

Autores como Bekker y Taylor (2010) mencionan que incendios con severidades de moderada a alta pueden afectar seriamente la estructura del bosque matando tanto árboles jóvenes como adultos, lo que da como resultado la creación de bosques incoetáneos. Ávila *et al.*, (2014) mencionan que, en la severidad baja, la distribución espacial por especies en bosque de pino presenta condiciones de heterogeneidad (mayor mezcla espacial de especies).

Cuadro 1: Clases de severidad de incendio de acuerdo con la clasificación propuesta por Turner y Romme (1994) y Silva (2021)

Severidad	Descripción	Mortalidad post-incendio
Baja (1)	Las copas de los árboles retienen >20% de hojas verde (parte superior del dosel). Los árboles permanecen verdes después del fuego.	No
Media (2)	La mayoría de las hojas (>80%) del dosel se presentan afectadas, pero no consumidas. Hojas de color verde se pueden producir en la parte superior (<5%). El dosel presenta una coloración marrón después del incendio (se mantienen las hojas quemadas).	Si
Alta (3)	Dosel con más del 80% de las hojas consumidas y el resto (si lo hay) con señales de daño.	Si
Extrema (4)	Arbolado quemado en su totalidad	Si

La mortalidad de árboles está directamente relacionada con la severidad del incendio (Uhl y Kaufman, 1990; Pinard y Huffman, 1997). El porcentaje de mortalidad, según diversos autores referenciados por Cochrane *et al.*, (1999), puede estar entre el 33 % y el 66 %, aunque otros estudios citados por Barlow y Pérez (2004) señalan porcentajes mucho menores para incendios de superficie. Sin embargo, en los bosques de coníferas, la presencia y la severidad con que un incendio se desarrolla, contribuyen a mantener o eliminar la dinámica de crecimiento de las especies, modificar su composición, diversificar la estructura de dimensiones y crear un mosaico heterogéneo de edades (Collins *et al.*, 2011; Omi, 2005; Phillips & Waldrop, 2008; Pomeroy, 2006), no sólo a escala de rodal sino también de paisaje (Alanís *et al.*, 2010; Bekker & Taylor, 2010; Gill, Woinarski, & York, 1999; González *et al.*, 2011).

3.1.5 Ecología del fuego

La ecología del fuego se encarga del estudio de los efectos de este factor en las relaciones que los seres vivos tienen entre sí y su ambiente físico (Rodríguez, 1996); con base en este concepto, los ecosistemas se clasifican de acuerdo a la relación que tengan con el fuego, y pueden ser dependientes, influidos, sensibles o independientes del fuego (Hardesty *et al.*, 2005).

En los ecosistemas dependientes, el fuego es un factor esencial para la dinámica poblacional de la mayoría de sus especies biológicas, lo mismo que para el mantenimiento de sus procesos ecológicos (The Nature Conservancy, 2004). En estos ecosistemas, un alto porcentaje de las especies de plantas y animales han desarrollado estrategias adaptativas al fuego, lo cual le permite al ecosistema la conservación de sus principales atributos tanto estructurales como funcionales (Campo *et al.*, 2010).

Los ecosistemas influenciados por el fuego tienen tanto especies adaptadas al fuego como especies sensibles. En ecosistemas sensibles al fuego, la mayor parte de las plantas y animales carecen de adaptaciones que les permiten responder de manera positiva al fuego o recuperarse rápidamente después de un incendio. En los ecosistemas independientes del fuego, no hay incendios, en gran parte debido a la falta de vegetación o de fuentes de encendido (The Nature Conservancy, 2004).

En México, los bosques de pino, encino, pastizales, sabanas, palmares y diversos matorrales leñosos, son ejemplos de ecosistemas mantenidos por el fuego; selvas altas, medianas y bosques mesófilos de montaña, son sensibles al fuego; matorrales xerófilos con cactáceas, selvas bajas, así como ecotonos entre ecosistemas mantenidos por el fuego y sensibles a éste, son influenciados por el fuego (Rodríguez Trejo, 2014).

3.1.6 Ecología del fuego en los bosques de coníferas

En los bosques de coníferas el fuego es un proceso fundamental que incide sobre la regeneración, estructura y funcionamiento del mismo (Frelich, 2002), esta incidencia depende de la severidad con la que se presente el incendio, por lo que es fundamental documentar el régimen natural del fuego, así como sus cambios y efectos sobre la regeneración arbórea, para tomar decisiones que aseguren la integridad de los ecosistemas forestales (Brown, 2006). Existe gran variación en los regímenes del fuego (Fulé & Laughlin, 2007), estos varían según la altitud (Myers & Rodríguez-Trejo, 2009) y por la interacción de disturbios naturales y antropogénicos (Buma, 2015).

En los bosques de coníferas se han identificado dos regímenes principales del fuego: 1) fuegos superficiales, frecuentes, de baja severidad e intensidad, y característicos de bosques dominados por *Pinus* sp. y *Juniperus* sp., y 2) fuegos de copa activos o pasivos,

poco frecuentes, de alta severidad e intensidad, generalmente presentes en bosques de *Abies* sp. y *Picea* sp., si bien también hay regímenes mixtos, con incendios superficiales y de copas intercalados (Brown y Smith, 2000; Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003).

Las coníferas han desarrollado mecanismos para asegurar su regeneración dependiendo de los regímenes del fuego bajo los cuales han evolucionado (Sáenz y Pérez, 2019); se ha observado que estos mecanismos son a nivel de especie, y que en los bosques que experimentan fuegos frecuentes, es común encontrar árboles con corteza gruesa y exfoliante que les permite resistir el daño ocasionado por el fuego, como es el caso de *Pinus hartwegii* (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003); en otras especies como *Abies* sp., los conos se desintegran liberando semillas que germinarán en los claros formados por fuegos de reemplazo de rodal (Cremer *et al.*, 2012). Las especies *Pinus montezumae* y *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. y Cham., cuentan con adaptaciones al fuego, entre las que destacan corteza gruesa, buena poda natural, capacidad de rebrote en la base, recuperación de la copa afectada, y regeneración en áreas incendiadas (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003; Rodríguez-Trejo, 2014).

No solo las coníferas han desarrollado mecanismos para asegurar su regeneración ante el fuego, *Alnus arguta*, es una especie tolerante al fuego de baja intensidad, posterior a él genera un mayor número de brotes epicórmicos, (Díaz *et al.*, 2014).

3.2 Incendios forestales

Un incendio forestal es el fuego que se extiende sin control sobre el terreno, afectando a vegetación que no estaba destinada a arder (Vélez, 2000); se presentan en selvas, bosques y vegetación de zonas áridas y semiáridas. La NOM-015 SEMARNAT/SAGARPA (SEMARNAT, 2007), define un incendio forestal, como la combustión de la vegetación forestal sin control. Los incendios forestales son alteraciones ocasionadas por el fuego sobre la vegetación forestal, cuyos efectos pueden ser positivos o negativos a partir de su intensidad, duración y tipo de vegetación impactada (Pellegrini *et al.*, 2017). Los efectos positivos se reflejan sobre aquellas especies que han desarrollado ciertas adaptaciones que les permiten tolerar la

defoliación e incluso la destrucción de sus tallos por la acción del fuego, los negativos se presentan mayoritariamente en la vegetación de tipo arbustiva o de porte bajo, debido a que su corteza es más delgada (Pellegrini *et al.*, 2017).

3.2.1 Efectos de los incendios forestales

La frecuencia de los incendios, su intensidad, su severidad, las temperaturas alcanzadas durante el incendio (Villaseñor y Sáiz, 1990), determinan la magnitud de sus efectos sobre la vegetación y los procesos ecosistémicos (Elliott y Vose, 2010; Gómez *et al.*, 2014). El efecto del fuego sobre la vegetación difiere según la naturaleza de los combustibles y las condiciones ambientales (Villaseñor & Sáiz, 1990), el más notable es la muerte de los organismos que conforman el ecosistema (Donoso, 1997), después de la ocurrencia de un incendio, se aumenta la susceptibilidad de los árboles sobrevivientes a presentar enfermedades y ataques de insectos y hongos (Maldonado, 2005), se ha observado que además de la muerte directa de árboles, se disminuye el proceso de la fotosíntesis del arbolado, debido a la disminución de la superficie verde (Donoso, 1997).

Además de estos efectos, existen otras consecuencias, el suelo queda desprotegido por la pérdida de la vegetación y junto con un aumento de la hidrofobicidad y del sellado de éste, pueden producirse procesos erosivos que lleven a la pérdida y movimiento de suelo y sedimentos (Woods *et al.*, 2007; Gómez *et al.*, 2014). Por otro lado, pueden producirse cambios transitorios en la disponibilidad de nutrientes y en el pH del suelo debido a la volatilización y a la deposición de cenizas (Certini, 2005; Gómez *et al.*, 2014), estos efectos determinan los procesos sucesionales post-incendio y, en consecuencia, condicionan la estructura vegetal de las comunidades resultantes.

Los incendios también son causantes de la fragmentación del hábitat (Fahring, 2003). esta se traduce en cambios microclimáticos que generalmente implican modificaciones en la luminosidad, la temperatura, el viento, la humedad relativa y humedad del suelo (Murcia, 1995; Fernández *et al.*, 2010), estos cambios se pueden extender por cientos de metros al interior del fragmento, provocando que los bordes de los fragmentos se vean afectados por mayor incidencia de vientos y aumento de la radiación solar, ocasionando modificaciones estructurales en la vegetación al incrementar la mortalidad arbórea

(Laurence y Yensen, 1991; Laurence *et al.*, 1997), además de generar una acumulación de combustible en los bordes, que, sumados a las temporadas de sequía, aumentan la incidencia de incendios (Alvarado *et al.*, 2004).

Otros efectos que causan los incendios forestales sobre la vegetación, son la pérdida de biodiversidad, disminución de la calidad del aire, alteración del ciclo de nutrientes, alteración del ciclo hidrológico y desertificación (Fernández *et al.* 2010).

3.2.2 Los incendios forestales y el manejo del fuego en el APFF Nevado de Toluca

La incidencia de incendios forestales en el APFF Nevado de Toluca es una de las amenazas para sus ecosistemas, algunos de los efectos de los incendios se reflejan en el arbolado, en la regeneración natural, y en la presencia de áreas desprovistas de vegetación (Castañeda, 2013). Su frecuencia se atribuye principalmente a causas humanas, relacionadas a la práctica de la ganadería extensiva, ya que un elevado porcentaje es provocado por los pobladores del área para fomentar el rebrote del pasto tierno (pelillo) para el ganado. Esta actividad se realiza sin control, lo que ha provocado la disminución de la cubierta arbórea y la erosión del suelo, además de daños directos o indirectos a la fauna silvestre, al paisaje y la calidad del aire. Otro factor que hoy en día se ha registrado, es el uso de fogatas hechas por los turistas que visitan el volcán (CONANP, 2016), de 2006 al 2021 en el ANP han ocurrido 507 incendios afectando un total de 4889 ha, como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Incendios registrados en el APFF Nevado de Toluca de 2006 – 2021.

AÑO	NÚMERO DE INCENDIOS	SUPERFICIE (ha)
2006	69	360
2007	40	101.25
2008	63	281.5
2009	77	282.25
2010	20	161.5
2011	49	418
2012	13	19.5
2013	15	62
2014	8	33
2015	10	18
2016	17	89
2017	21	153
2018	16	221
2019	31	361.5
2020	24	459
2021	34	1868.7
TOTAL	507	4889.2

Fuente: Elaboración propia con datos de CONANP.

En estos ecosistemas se presentan tres tipos de incendios: incendio superficial, incendio subterráneo e incendio de copa. Los incendios superficiales han sido el principal tipo de incendio durante los últimos 10 años, cuyos daños más severos fueron a la vegetación de zacatón, al estrato bajo y al renuevo del arbolado (CONANP, 2021). La frecuencia de los incendios que ha causado daños al arbolado adulto es menor; sin embargo, su daño ha llegado a tener un impacto mayor, pues cuando no han provocado directamente la muerte del arbolado sí ocasiona un severo debilitamiento, lo que puede atraer la presencia de plagas.

Una estrategia para reducir el daño por incendios forestales puede ser el manejo del fuego, entendiendo como tal las posibles decisiones técnicas y acciones disponibles para prevenir, mantener, controlar o usar el fuego en un paisaje dado (The Nature Conservancy, 2006); el manejo del fuego considera su uso en la administración de ecosistemas para preservarlos, restaurarlos o hacerlos producir (Rodríguez *et al.*, 2002). En las ANP el manejo de fuego contempla tres dimensiones principales: la ecología del

fuego, la cultura del uso de fuego (percepción de las comunidades y usos) y el régimen del fuego (CONANP, 2011); además constituye una herramienta enfocada a asegurar la sostenibilidad ambiental esto es, aplicar acciones para revertir la pérdida de hábitat, ya que la conservación eficaz de la biodiversidad permite que el fuego cumpla su función ecológica sin ser una amenaza a la biodiversidad o al bienestar humano (Shlisky *et al.*, 2007), comprende tres componentes técnicos: prevención, supresión y uso del fuego con los atributos ecológicos clave del fuego, es decir, el régimen de fuego ecológicamente adecuado y las necesidades socioeconómicas y culturales del uso del fuego junto con los impactos negativos que el fuego puede tener sobre la sociedad (Myers, 2006).

Para realizar un manejo efectivo del fuego se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones (The Nature Conservancy, 2006):

- a) Evaluación y análisis de las necesidades y los problemas
- b) Identificación de las metas de manejo del fuego y la condición futura deseada
- c) Desarrollo e implementación de políticas adecuadas en materia del fuego
- d) Diseño de estrategias de prevención de incendios adecuadas a la situación ecológica y social
- e) Implementación de estrategias de uso del fuego
- f) Fortalecimiento de la preparación para enfrentar el fuego y la respuesta a éste en todos los niveles
- g) La implementación de acciones de recuperación, restauración y mantenimiento de los ecosistemas
- h) Investigación.

Dentro del APFF Nevado de Toluca, cada año se realizan acciones de prevención física como son elaboración de brechas cortafuego, rehabilitación de brechas, chaponeo, poda de rama baja, así como prevención legal y cultural con el objetivo de reducir la presencia de incendios forestales.

3.3 Efectos del fuego en la mortalidad del arbolado

Regelbrugge y Conard (1993), señalan que la resistencia de un árbol al fuego, depende de las características morfológicas útiles para proteger sus tejidos vitales, de la

capacidad de recuperarse de ciertos grados de lesión, y de la temporada en que los siniestros se presenten. La resistencia asociada a los rasgos morfológicos tiende a aumentar con el tamaño y la edad del árbol en las especies adaptadas al fuego (Van Wagner, 1973).

Hosmer y Lemeshow (2000) establecen que la regresión logística es la expresión matemática más útil empleada para modelar la probabilidad de mortalidad o de supervivencia al fuego, debido a que son investigaciones predictivas donde la variable dependiente es binomial. Sin embargo, cuando se utiliza este tipo de modelos en árboles, debe incluirse variables que reflejen la gravedad de las lesiones por fuego (Van Wagner, 1973). Por ejemplo, algunos autores mencionan que el porcentaje de copa dañada es quizás una de las características más ampliamente utilizadas para evaluar la probabilidad de mortalidad del arbolado (Herman, 1954; Methven, 1971; Van Wagner, 1973; Dieterich, 1979; Ryan, 1982).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

4.1.1 Localización

El área de estudio se localiza dentro del Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, la cual está ubicada en el Estado de México, y comprende el volcán denominado Xinantécatl o Nevado de Toluca, este ocupa el cuarto lugar entre las cumbres más altas del país con una elevación de 4680 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.). Se localiza en la porción centro Sur del Estado de México, abarcando una superficie de 53,590-67-86.28 ha de los municipios de Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec (CONANP, 2016). Se ubica dentro de Bienes Comunales de Tlacotepec, Municipio de Toluca en el paraje conocido como el arenal, entre las coordenadas extremas 19° 22' 8.4" y 19° 22' 44" de latitud norte y 98°42' 32.40" y 98° 43' 1.2" de longitud Oeste, a una altitud promedio de 3800 m s.n.m. (Figura 1) y en el área Federal del APFF Nevado de Toluca dentro del Municipio de Zinacantepec, en el paraje cerro prieto entre las coordenadas extremas 19° 22' 8.4" y 19° 22' 44" de latitud norte y 98°42' 32.40" y 98° 43' 1.2" de longitud Oeste, a una altitud promedio de 3,800 m s.n.m. (Figura 1).

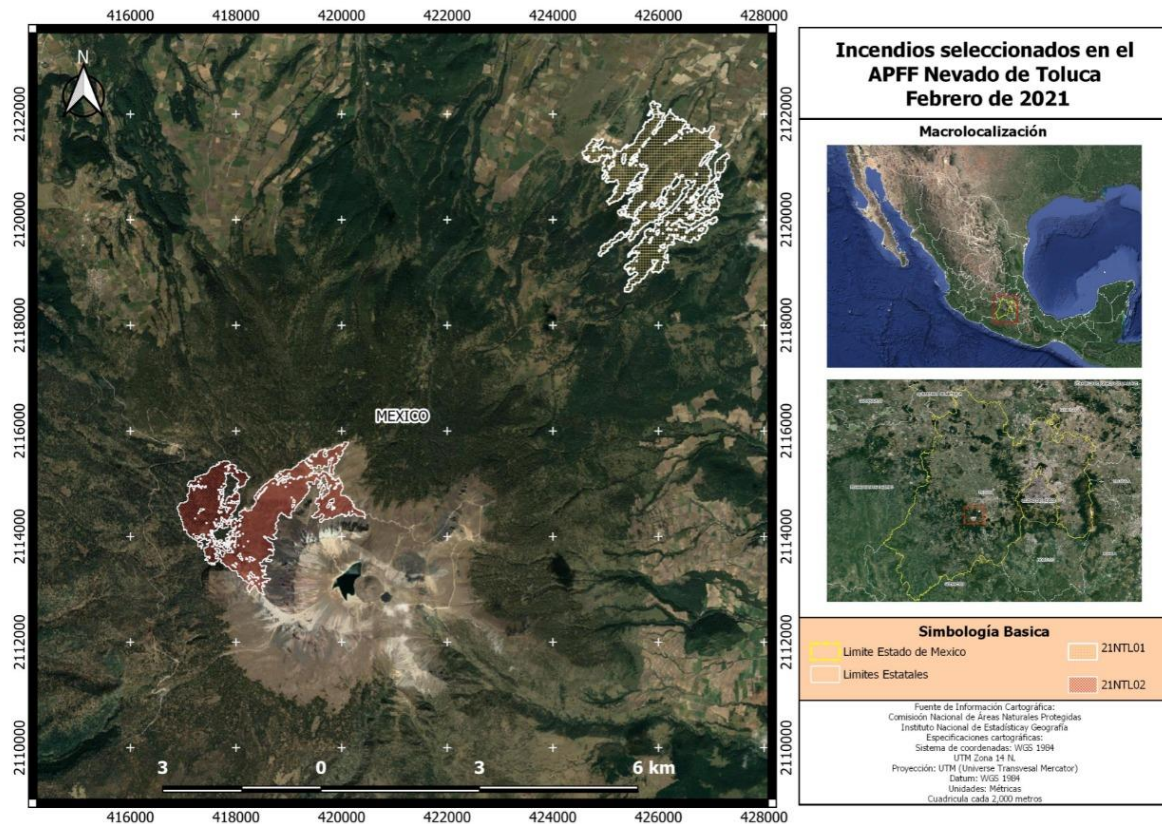


Figura1. Ubicación del área de estudio. Elaboración propia con datos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

4.1.2 Aspectos físicos

a) Clima

En el APFF Nevado de Toluca, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por García (1973), tiene los siguientes tipos de climas:

E(T)H wig. Clima frío con temperatura media anual entre -2 °C y 5 °C, con temperatura del mes más frío inferior a 0 °C, la temperatura del mes más cálido entre 0 °C y 6.5 °C, con régimen de lluvias en verano, aunque puede haber nevadas en invierno; tiene comportamiento isotermal y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano. Este tipo de clima se presenta en el volcán Nevado de Toluca a partir de los 3700 m de altitud.

C(E)wíg. Clima semifrío subhúmedo con temperatura media anual entre -2 °C y 7 °C. El régimen de lluvias es de verano, es isotermal y la temperatura del mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano. Este tipo de clima rodea a todo el volcán, en la franja que está entre los 2800 m y los 3700 m de altitud.

De acuerdo a los datos de la estación meteorológica existente en el cráter del Nevado de Toluca, a 4283 m sobre el nivel del mar, las temperaturas medias mensuales fluctúan entre los 2° C y los 5° C, mientras que las temperaturas máximas extremas se elevan hasta los 21° C en el verano y las mínimas extremas bajan a -10° C en invierno (CONANP, 2016).

b) Suelo

El tipo de suelo predominante en el APFF Nevado de Toluca es el andosol, el cual se encuentra en cerca del 90% del ANP, también podemos encontrar feozem, regosol, cambisol, fluvisol y leptosol (INEGI, 2000). Como producto de la presencia de rocas ígneas extrusivas del Terciario-Cuaternario, se presentan: andesitas, basaltos, pómez, tobas y brechas. La estructura de los suelos en general de toda el ANP, presenta una gran inestabilidad, que, combinada con la deforestación, los cambios de uso de suelo, el sobrepastoreo, las fuertes pendientes y las lluvias torrenciales generan procesos de erosión sumamente intensos, permitiendo el desarrollo de cárcavas, así como de procesos subsuperficiales de hundimiento del suelo, que afecta a la agricultura y a las poblaciones asentadas en las zonas planas (Sánchez, 2012). Los andosoles son el tipo de suelo más importante dentro del Área, ya que se extienden en una superficie de 47 210.63 ha, que representan el 88 % de la superficie total; se caracterizan por derivarse de cenizas volcánicas recientes, ricas en alófanos en un clima semifrío subhúmedo; esta relación aunada a la precipitación generan un pH ácido, que permite tener una alta capacidad de intercambio catiónico y una baja saturación de bases, lo que facilita la retención de agua y nutrientes para el desarrollo de vegetación de pino-encino, que proporcionan a su vez abundante materia orgánica (Vilchis, 2006; FAO, 2001; INEGI, 2000).

c) Hidrología

El APFF Nevado de Toluca está conformada por diversas elevaciones de las cuales descienden numerosos arroyos que contribuyen a la formación de las Regiones Hidrológicas Lerma-Santiago (RH12) y la del Balsas (RH18), a través de aproximadamente 61 arroyos permanentes que descienden del ANP (Conagua, 2010). Dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, existen varias subcuencas, que están caracterizadas por pendientes de rangos de 12 a 25° como la subcuenca La Gavia y las subcuencas Tejalpa, Verdiguél y Almoloya-Otzolotepec las cuales se caracterizan por estar ubicadas en pendientes de 12° a 30° (Martínez, 2001; Jiménez, 2002). Del Nevado de Toluca nacen diversos ríos, entre los que destacan los ríos Temascaltepec y Tilostoc; este último da origen a arroyos, La Garrapata, La Cascada y Los Hoyos, que alimentan la presa Valle de Bravo, cuya relevancia es estratégica para el Sistema Cutzamala, que provee de agua a ciudades, como la Ciudad de México, Toluca y Ecatepec. Los escurrimientos de las porciones sur y sureste, que corresponden a la subcuenca Alto Amacuzac, irrigan las zonas de los municipios de Tenango del Valle, Villa Guerrero y Coatepec Harinas, y surten de agua a ciudades como Ixtapan de la Sal, Tenancingo y Villa Guerrero (CONANP, 2016).

Dentro del cráter del Nevado de Toluca existen dos lagos conocidos como lagunas del Sol y de la Luna, que se forman por la acumulación del agua de lluvia o de deshielo, y presentan una temperatura que oscila entre 2 y 7 °C. (Alcocer, 1980, citado por Luna *et al.*, 2009).

d) Vegetación

La distribución de la vegetación dentro del ANP es influenciada por su posición geográfica y altitudinal en combinación con las características de relieve, geológicas, edáficas y climáticas, así como por el producto de los procesos glaciales y periglaciales que se han desarrollado en diversos periodos desde su formación geológica, los cuales han influido de diversas maneras para dar origen a su diversidad biológica actual, (Madrigal y González, 1996; Almeida *et al.*, 2004).

Con base en las características estructurales y composición florística, los tipos de vegetación presentes, en el volcán Nevado de Toluca, de acuerdo a Rzedowski (1978), se clasifican en: bosques de coníferas; de acuerdo a la especie que predomine pueden clasificarse como bosque de pino (*Pinus*), bosque de oyamel (*Abies*), bosque de oyamel-pino (*Abies-Pinus*), bosque de pino-encino (*Pinus-Quercus*), bosque de encino (*Quercus*), bosque de aile (*Alnus*), pastizal (zacatonal o páramo de altura) y vegetación acuática y subacuática.

El área de estudio está dominada por vegetación de *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae* y bosque de *Alnus* sp., en el cual encontramos también a *Buddleja cordata* (especie observada durante la toma de muestras). El Bosque de *Pinus hartwegii* se desarrolla en altitudes de 3500 a 4000 m s.n.m., sobre andosoles, suelos negros, cubiertos de hojas de pino (ocochal), en pendientes pronunciadas, en condiciones de mayor altitud y menor temperatura, el estrato arbóreo alcanza entre 25 y 35 m de altura, muestra una disminución en su altura y fuste conforme se acerca a su límite altitudinal superior, las variaciones en la talla de estos individuos se atribuyen a las condiciones de temperatura, precipitación, pedregosidad del suelo y exposición de las laderas.

El sotobosque está formado por un estrato arbustivo con jarilla blanca (*Senecio cinerarioides*) y en menor proporción jarilla (*Senecio mairertianus*) y *Stevia monardifolia*, entre otras. El estrato herbáceo tiene una altura promedio de un metro y se encuentra conformado por gramíneas amacolladas y, en menor proporción por otras especies, como rosa de las nieves (*Eryngium proteaeflorum*). En algunas áreas donde la humedad se concentra, es posible observar un estrato rasante formado por musgos, líquenes y hongos. Entre las epífitas se observan algunas plantas del género *Tillandsia* (CONANP, 2016).

El Bosque de *Pinus montezumae* se distribuye en fragmentos aislados, en altitudes entre 3000 y 3200 m s.n.m., está asociado con *Pinus pseudostrobus* en el límite inferior del ANP (Madrigal y González, 1991). Estas comunidades se encuentran muy perturbadas y han sido objeto de campañas de reforestación a través de los años, en las que se han intercalado con especies de cedro (*Cupressus* sp.) (Endara, 2007). El estrato arbóreo alcanza alturas entre 20 y 25 m; es más denso que el bosque de *Pinus hartwegii*, tiene

un estrato arbóreo bajo, formado por ejemplares de cedro blanco como resultado de reforestación (*Cupressus lusitanica*) especie sujeta a protección especial de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana Nom-059-Semarnat-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio- Lista de especies en riesgo. Esta especie convive con arbustos como chicalotl (*Eryngium monocephalum*), cardo santo (*Cirsium jorullense*), perilla (*Symphoricarpos microphyllus*), acocote (*Arracacia atropurpurea*) y escoba (*Baccharis conferta*). El estrato herbáceo alto alcanza en promedio 1.2 m de altura y está conformado por gramíneas amacolladas, plantas perennes cuyo follaje se torna amarillo durante la temporada seca del año (CONANP, 2016).

Por último, está el bosque de aile, este se distribuye en fragmentos a lo largo de la ladera nororiental del cráter, ocupando una superficie estimada de 2353 ha, así como en la parte sur del mismo. Hacia el límite superior altitudinal de este tipo de bosque, es posible ver asociaciones con *Pinus montezumae*; hacia los límites inferiores se asocia con encino (Franco y Burrola, 2010; Regil, 2013).

En sitios perturbados por incendios forestales, abunda *Lupinus montanus*, especie semiarbustiva, que llega a formar grandes manchones que se extienden hacia el zacatonal alpino, siendo un elemento muy frecuente en todas las laderas del volcán, junto con campanita (*Penstemon gentianoides*) y escoba (*Baccharis conferta*) (Endara, 2007).

En el área ocupada por aile se halla también tepozán (*Buddleja cordata*), especie que se desarrolla en una gran variedad de hábitats, sobre todo en lugares con vegetación secundaria, parcelas de cultivo y ambientes urbanos, en altitudes de 1400 a 3200 m s.n.m. (Camacho *et al.* 2009). *Buddleja* es un género de distribución pan tropical, existen unas 20 especies en México y cinco en el Valle de México (Rzedowski y Rzedowski, 1985), *Buddleja cordata* se ha reportado en clima templado subhúmedo y templado subhúmedo con lluvias en verano (Mendoza, 2002), así como semiseco templado con lluvias en verano (García *et al.*, 1999) a temperaturas que van desde los 6.5 hasta los 22°C (Navarro, 2001); este género presenta diversos usos, como son: rehabilitación y reforestación de áreas perturbadas (Peña, 1995), forrajero (Camacho *et al.*, 1999), entre otros.

4.2. Muestreo en campo para la evaluación de la mortalidad.

Del 14 al 16 de febrero del 2021 ocurrieron dos incendios en el APFF Nevado de Toluca, cada uno con duración de dos días; el primero inició el 14 de febrero y se logró su control y liquidación el 15 de febrero, afectando 700 ha; el segundo inició el 17 de febrero y fue controlado el 18 de febrero, afectando 260 ha de los terrenos forestales de los Bienes Comunales de Santiago Tlacotepec (Cuadro 3).

Cuadro 3. Incendios seleccionados en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Nombre	Fecha de Inicio	Fecha de termino	Localidad	Municipio	Tipo de vegetación	Coordenadas
21NTL02	14/02/21	15/02/21	APFFNT	Zinacantepec Toluca Calimaya	Bosque de Pino	417998, 2114415
21NTL01	17/02/21	18/02/21	Bienes Comunales Santiago Tlacotepec	Toluca	Bosque de Pino, Bosque de aile	425490, 2120910

Con apoyo de investigadores de la Universidad Juárez del Estado de Durango se realizó el mapeo del área quemada y severidad de los incendios forestales 21NTL02 y 21NTL01 a partir de imágenes Sentinel, y con el uso de Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/>); QGIS versión 3.16 (<https://www.qgis.org/es/site/forusers/download.html>); Plug in para QGIS versión 3.16, de área quemada (<http://forestales.ujed.mx/incendios2/>), se obtuvo la imagen de cada uno de los incendios (Figuras 2 y 3).

Una vez que se obtuvieron las imágenes se clasificaron las superficies de acuerdo a la severidad de afectación de cada uno de los incendios resultando cuatro tipos de severidad: baja, media, alta y extrema. Se establecieron 33 sitios circulares de 15 m de radio con una superficie de 706.88 m², en los incendios 21NTL02 y 21NTL01, con el objetivo de evaluar la severidad; los sitios se distribuyeron de forma estratificada a una distancia aproximada de 120 m entre sitio y sitio procurando áreas homogéneas dentro del perímetro de cada incendio (22 sitios), así como fuera de éste (11 controles).

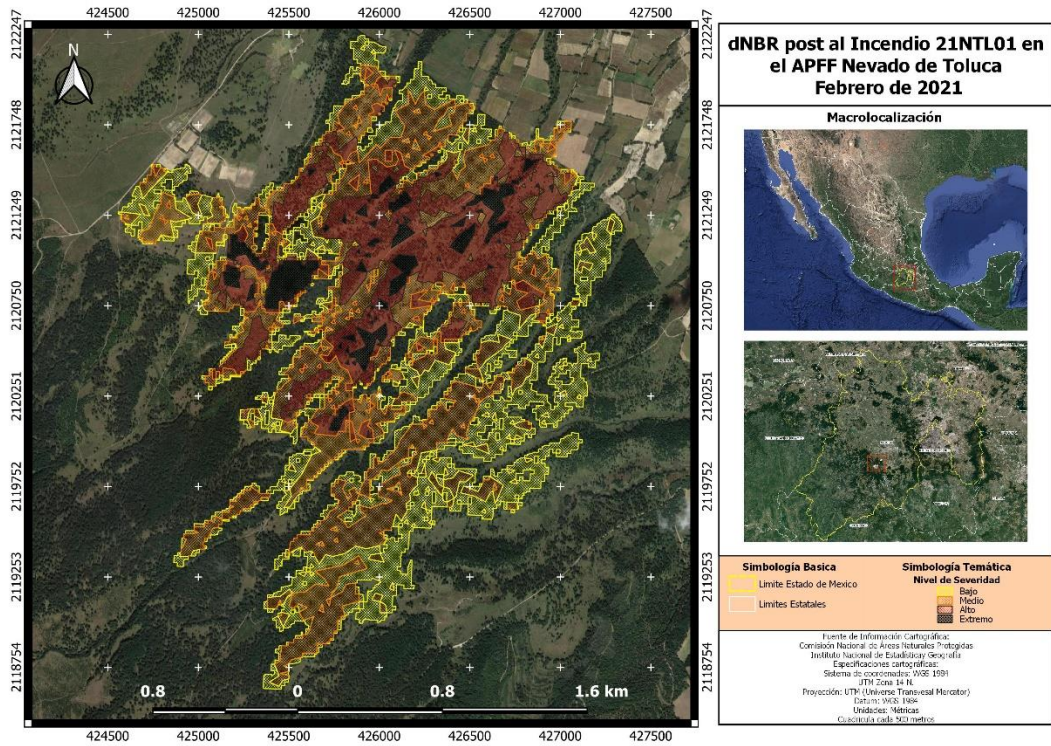


Figura 2. Incendio ocurrido en Bienes Comunes de Tlacotepec, Municipio de Toluca, ubicado dentro del APFF Nevado de Toluca con clave 21NTL01. Elaboración propia con datos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

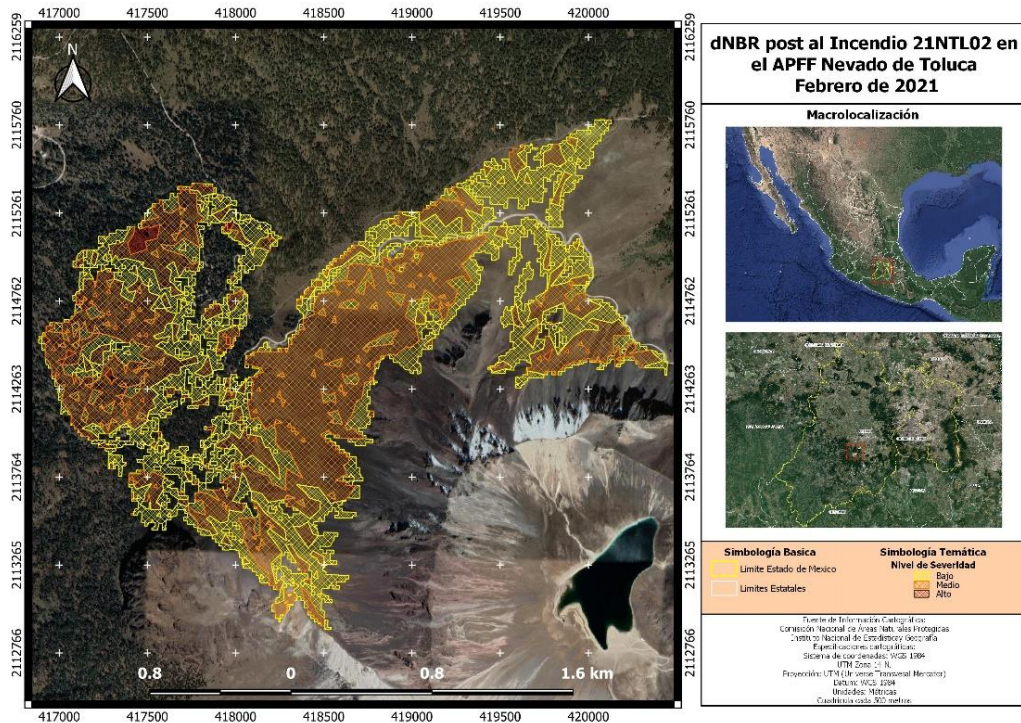


Figura 3. Incendio ocurrido en el APFF Nevado de Toluca, con clave 21NTL02. Fuente: Elaboración propia con datos de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Una vez establecidos los sitios de muestreo, se realizó la toma de datos en campo, siguiendo la metodología para la evaluación de la severidad de incendios forestales en campo en ecosistemas de bosque templado de México, elaborada por Silva-Cardoza *et al.* (2021), la cual se enfocó en los componentes vegetal y edafológico, de la siguiente manera:

Cuadro 4. Componentes considerados para medir la severidad.

Componente	Estrato	Descripción
Edafológico	Suelo	Capa superficial del suelo materia orgánica (herbáceas, hojarasca), mantillo
Vegetal	Subdosel	Arbustos y árboles > 7.5 cm DAP con alturas menores al P75 de los árboles en el sitio
	Dosel	Arbustos y árboles > 7.5 cm DAP con alturas mayores al P75 de los árboles en el sitio.

DAP = Diámetro a la altura del pecho (1.30 m), *P75* = Percentil 75 de las alturas para cada sitio.

En cada sitio de muestreo se tomaron los siguientes datos: tipo de vegetación, altitud, coordenadas geográficas (latitud y longitud), exposición y pendiente (porcentaje), tipos de combustibles forestales, información de la severidad en el componente edafológico, e información de la severidad en el componente vegetal, en el cual se incluyeron altura de cicatriz superficial del tronco (m) en el dosel y subdosel (Figura 4d) provocada por incendio, altura total y de copa, diámetro normal y diámetro de copa, y altura de soflamados.

4.2.1 Severidad ocasionada por el fuego a la vegetación

La severidad ocasionada por el fuego a la vegetación se evaluó conforme al soflamado de copa; una vez que el fuego ha terminado, la copa de los árboles presenta una decoloración foliar visible en tonalidades marrón, a lo que se le denomina “soflamado de copa”, de acuerdo con Varner *et al.* (2021). En cada estrato se registraron tres condiciones de soflamado de copa:

- a. Soflamado de copa verde (SCV). Zonas donde la intensidad del fuego fue mínima, no ha afectado el follaje y éste permanece de color verde (Figura. 4a).
- b. Soflamado de copa marrón (SCM). Zonas recorridas por fuego de superficie, ocasionado un soflamado total o parcial de las hojas en los árboles, causando deshidratación y/o muerte. Se identifica con un color marrón o rojizo (Figura 4b).
- c. Soflamado de copa negro (SCN). Zonas que han sufrido un fuego de copa o en las cuales la intensidad ha sido tal que el follaje se ha calcinado totalmente, dejando una marca de color negro en la totalidad del árbol (Figura 4c).

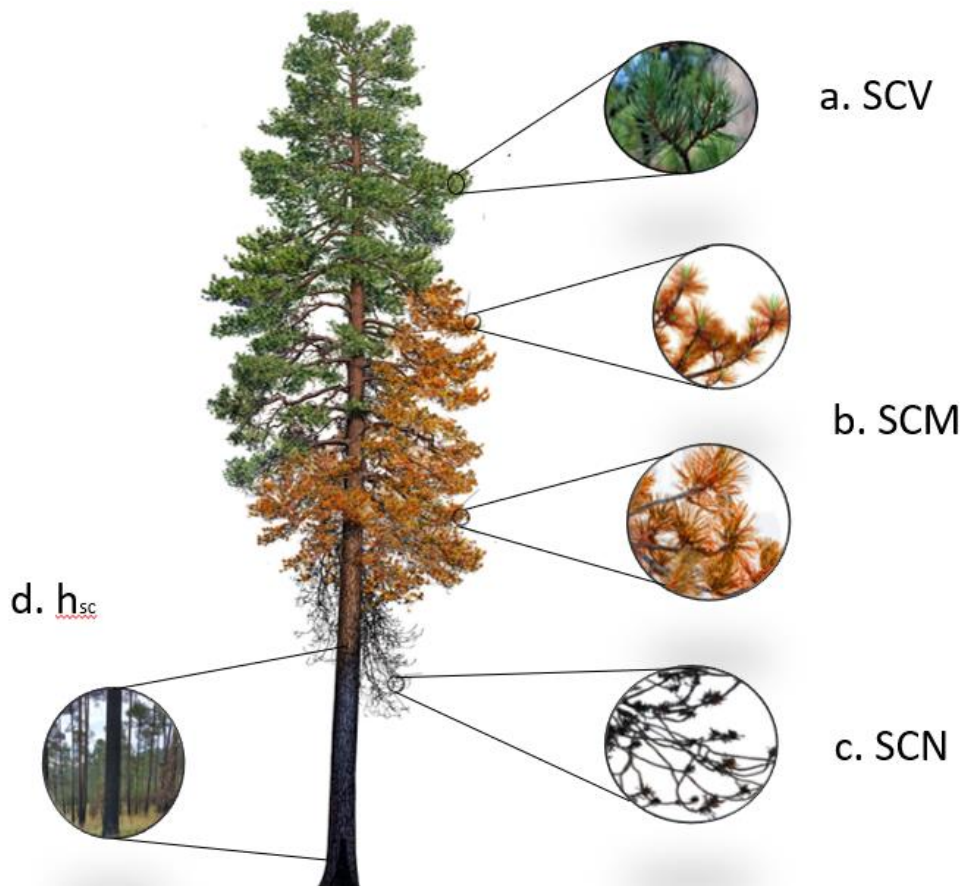


Figura 4. Soflamado en la copa y en el fuste: a = copa verde (SCV), b = soflamado de copa marrón (SCM), c = Soflamado de copa negro (SCN) y d = Altura de soflamado en el tronco del árbol. Foto: Modificada de Varner *et al.* (2021).

4.3 Cálculos para evaluar la probabilidad de mortalidad del arbolado.

Se utilizó un modelo de regresión logística para estimar la probabilidad de mortalidad (P_m) de cada especie muestreada, utilizando como variables independientes al diámetro normal o diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), altura total (HTO, m), altura de la cicatriz del fuego sobre el tronco (HCI, m), altura de soflamado marrón (HSMA, m), altura de soflamado negro (HSNE, m), porcentaje de soflamado negro (SNE, %), porcentaje de soflamado marrón (SMA, %), porcentaje de soflamado de copa verde (SVE, %).

El modelo logístico empleado fue el de Hosmer *et al.* (2013):

$$P = 1 / ((1 + e^{-(\alpha + \beta_1 V_1 + \beta_2 V_2 + \dots + \beta_n V_n)})$$

donde:

P = probabilidad de mortalidad

α = intercepto

β_1 = constante asociada a la variable 1

V_1 = variable 1

β_2 = constante asociada a la variable 2

V_2 = variable 2

β_n = constante asociada a la variable n

V_n = variable n ;

n =representa el número de variables incluidas en el modelo

El ajuste de los modelos se realizó con el procedimiento logístico (PROC LOGISTIC) del programa SAS (Statistical Analysis System) v. 9.4 (SAS Institute, 2012). Se realizaron regresiones logísticas, las cuales estiman la probabilidad de mortalidad (o de supervivencia) a partir de variables explicativas. Los modelos fueron probados con cada una de las variables dasométricas y de severidad, de forma individual y en combinaciones, hasta incluir todas. Para que un modelo fuera considerado significativo, todas sus variables tenían que ser significativas ($p \leq 0.05$), su límite de confianza sin incluir la unidad (lo cual implicaría que la probabilidad de ocurrencia es igual a la de no ocurrencia) y concordancia relevante igual o mayor al 40%. Por último, se probó la bondad de ajuste de los modelos con la prueba de Hosmer-Lemeshow, también en SAS; en este último caso, se buscó que no resultara significativa ($p > 0.05$), pues así las probabilidades pronosticadas no se desvían de las probabilidades observadas de una manera que la distribución binomial no predice.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez mapeada la superficie afectada por incendios en el APFF Nevado de Toluca se seleccionaron los sitios de acuerdo a la severidad. (Cuadro 5).

Cuadro 5. Sitios considerados para la toma de datos de acuerdo a la severidad.

Número de sitio	X	Y	m s.n.m.	Severidad
1	417997	2114415	4014	0
2	423057	2115414	3824	0
3	417626	2113628	4034	2
4	425773	2122081	3076	0
5	416936	2113920	3904	0
6	419463	2116396	3895	0
7	421304	2115011	3932	1
8	424808	2120231	3202	0
9	426026	2119136	3180	0
10	425639	2119891	3189	0
11	417695	2114117	3984	1
12	425948	2119709	3207	1
13	418364	2115367	3914	1
14	418015	2116076	3798	0
15	420167	2116545	3793	0
16	417569	2115252	3829	2
17	426685	2120909	3096	2
18	425580	2120290	3192	2
19	420390	2115945	3958	0
20	425792	2120548	3170	3
21	426087	2121254	3104	3
22	425870	2121029	3135	3
23	426109	2120990	3114	3
24	425590	2121388	3109	3
25	425194	2120902	3155	4
26	426491	2121142	3065	4
27	425491	2120910	3149	4
28	422622	2115188	4011	4
29	4226184	2121583	3088	4
30	425191	2121118	3136	4
31	425280	2120717	3162	4
32	4225799	2120184	3156	4
33	426848	2121546	3036	4

*Severidad 0: no hay afectación de incendios o muy baja, 1: baja, 2: media, 3: alta y 4: extrema.

Es importante mencionar que para evaluar y modelar la probabilidad de mortalidad del arbolado de *P. hartwegii*, *Alnus firmifolia*, y *Buddleja cordata*, solo se consideró la información obtenida de los sitios que fueron afectados (severidades 1, 2, 3 y 4), los sitios con severidad 0 no fueron afectados por el fuego, solo se consideraron como aproximación para conocer la estructura que presentaba el bosque anterior a la ocurrencia de los incendios.

5.1. Cálculo de la probabilidad de mortalidad del arbolado afectado por incendio

Para obtener los modelos de mortalidad se tomaron datos dasométricos, y de severidad del fuego de cada árbol muestreado, cuyas medias, máximos y mínimos se muestran en los Cuadros 6; la toma de muestras incluyó arbolado mayor a 7.5 cm de diámetro normal hasta arbolado maduro de *P. hartwegii*, *P. montezumae*, *Alnus firmifolia* y *Buddleja cordata*.

5.1.1 Modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de *Buddleja cordata*

Se obtuvieron seis modelos (Ecuaciones 1 a 6) que resultaron significativos para Pm ($p \leq 0.05$, límites de confianza sin la unidad, concordancia $\geq 40\%$ y prueba de bondad de ajuste con $p > 0.05$), para los cuales se usaron los datos de altura de la cicatriz del fuego sobre el tronco (HCI), altura de soflamado marrón (HSMA), altura de soflamado negro (HSNE), porcentaje de soflamado negro (SNE), porcentaje de soflamado marrón (SMA), porcentaje de soflamado de copa verde (SVE).

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-2.2738 + 0.2028 \text{ HCI})}) \dots\dots\dots (1)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-4.3175 + 0.0358 \text{ SNE})}) \dots\dots\dots (2)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-0.9387 + (-0.0541 \text{ SVE}))}) \dots\dots\dots (3)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(1.2218 + (-0.6517 * \text{HTO}) + (0.3711 * \text{HSNE}))}) \dots\dots\dots (4)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-1.9851 + (-0.3354 * \text{HTO}) + (0.0381 * \text{SNE}))}) \dots\dots\dots (5)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-1.5936 + (-0.3307 * \text{HTO}) + (-0.0616 * \text{SVE}))}) \dots\dots\dots (6)$$

Cuadro 6. Variables dasométricas y de severidad del fuego consideradas.

Variable	Buddleja cordata				Alnus firmifolia				P. hartwegii				P. montezumae			
	DE	Prom	M	m	DE	Prom	M	m	DE	Prom	M	m	DE	Prom	M	m
DAP (cm)	6.29	12.57	46.00	8.00	10.64	20.32	75.00	4.00	15.71	21.50	85.00	6.00	6.47	14.49	53.00	8.00
HTO (m)	2.48	7.88	17.00	4.00	3.72	10.50	21.00	2.00	6.92	9.93	36.00	2.40	2.14	7.53	21.00	3.00
HCI (m)	2.86	3.90	10.00	0.00	4.08	6.02	18.00	0.50	2.81	2.40	15.00	0.20	2.14	7.53	21.00	3.00
HMA (m)	2.82	1.72	12.00	0.00	4.90	3.84	17.00	0.00	2.95	1.68	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HNE (m)	3.92	5.45	14.00	0.00	4.21	6.90	16.00	0.00	3.17	2.55	16.00	0.00	2.14	7.53	21.00	3.00
SNE(%)	44.89	63.93	100.00	0.00	39.24	68.95	100.00	0.00	38.33	33.51	100.00	0.00	2.01	99.71	100.00	80.00
SMA(%)	22.43	12.02	100.00	0.00	24.72	16.04	100.00	0.00	15.89	9.71	60.00	0.00	0.81	0.10	10.00	0.00
SVE(%)	35.60	21.47	100.00	0.00	29.09	14.78	100.00	0.00	41.15	47.26	100.00	0.00	1.85	0.19	20.00	0.00

DAP = diámetro normal, HTO = altura total, HCI = altura de la cicatriz del fuego sobre el tronco, HSMA = altura de soflamado marrón, HSNE = altura de soflamado negro, SNE = porcentaje de soflamado negro, SMA= porcentaje de soflamado marrón, SVE = porcentaje de soflamado verde, DE = desviación estándar, Prom = promedio, M = máximo, m = mínimo.

La Figura 5 muestra la afectación de los árboles observada en campo, el Cuadro 7 muestra la significancia de los modelos y parámetros, y de la Figuras 6 a la 11 se muestran los gráficos derivados de los modelos.

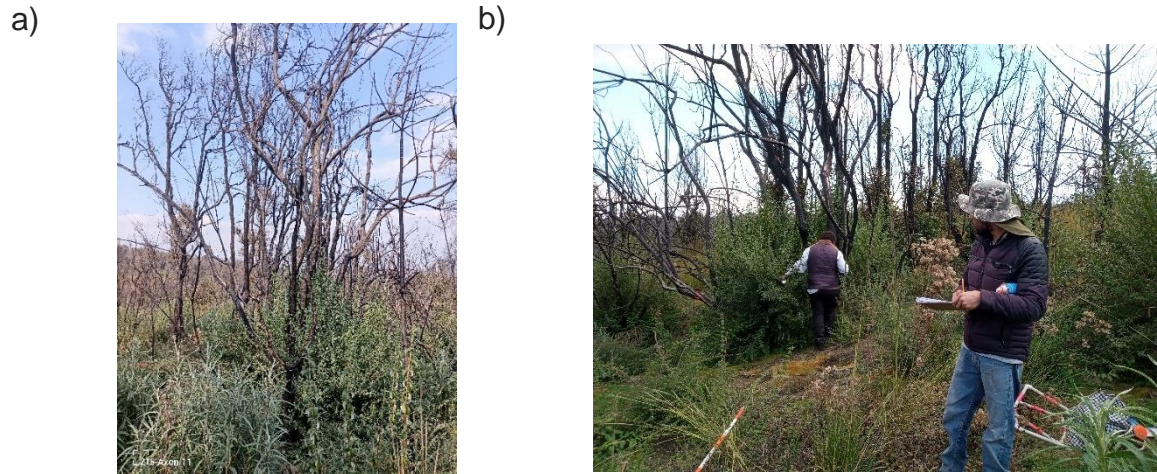


Figura 5. a) Zona afectada por incendios con severidad alta, con presencia de *Buddleja cordata*. b) Sitio con presencia de *Buddleja cordata*, afectado por incendio de severidad extrema.

Cuadro 7. Significancia de los modelos de probabilidad de mortalidad para *Buddleja cordata* (modelos 1 al 6).

Modelo	P intercepto	Variable	P variables	IC		Concordancia	P BAHL
1	<0.0001	HCI	0.0166	1.037	1.446	61.4	0.2413
2	0.0006	SNE	0.0061	1.01	1.063	52.9	0.6581
3	0.0003	SVE	0.0457	0.898	0.999	40.9	0.8873
4	0.2704	HTO	0.0029	0.339	0.8	70.8	0.761
		HSNE	0.0088	1.098	1.913	70.8	0.761
5	0.2107	HTO	0.0277	0.53	0.964	77.3	0.4962
		SNE	0.0035	1.013	1.066	77.3	0.4962
6	0.1584	HTO	0.029	0.534	0.967	72.5	0.8757
		SVE	0.0331	0.888	0.995	72.5	0.8757

IC = intervalo de confianza a 95%, C = concordancia, p BAHL = valor de p de la prueba de bondad de ajuste de Hosmer y Lemeshow.

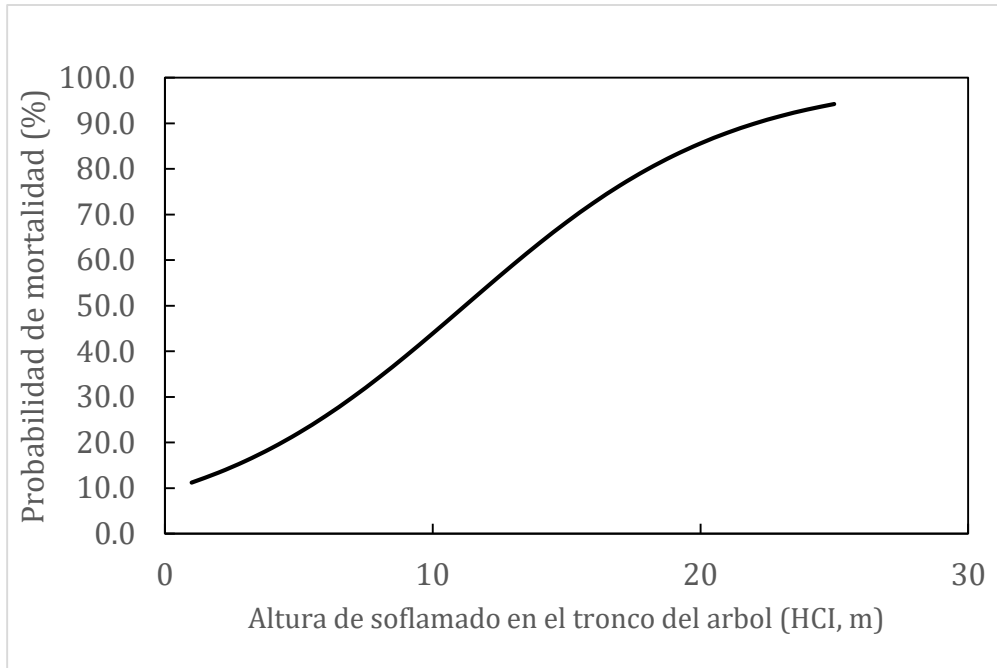


Figura 6. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura de soflamado sobre el tronco (Modelo 1).

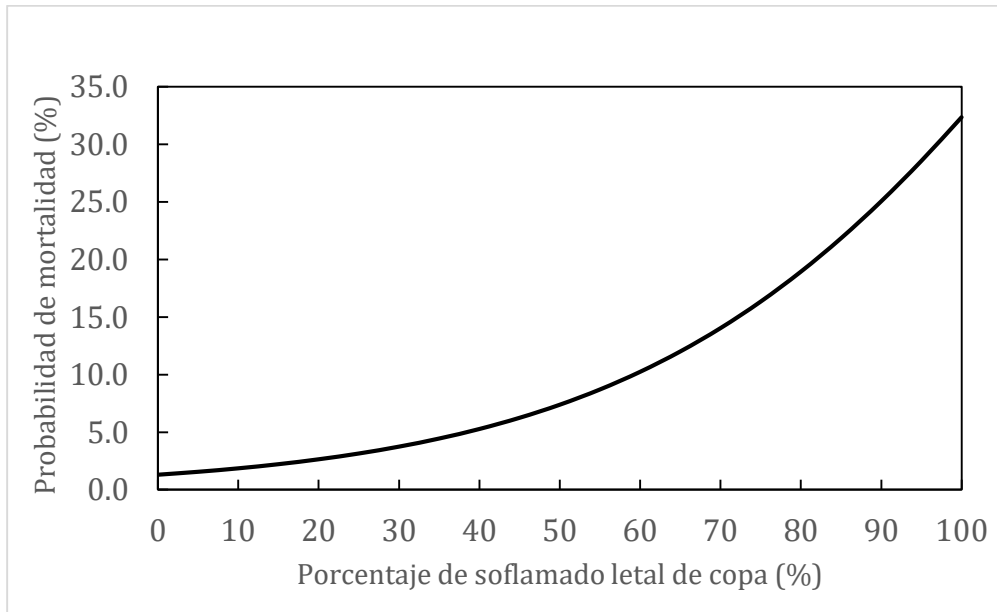


Figura 7. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función del porcentaje del soflamado letal de copa (Modelo 2).

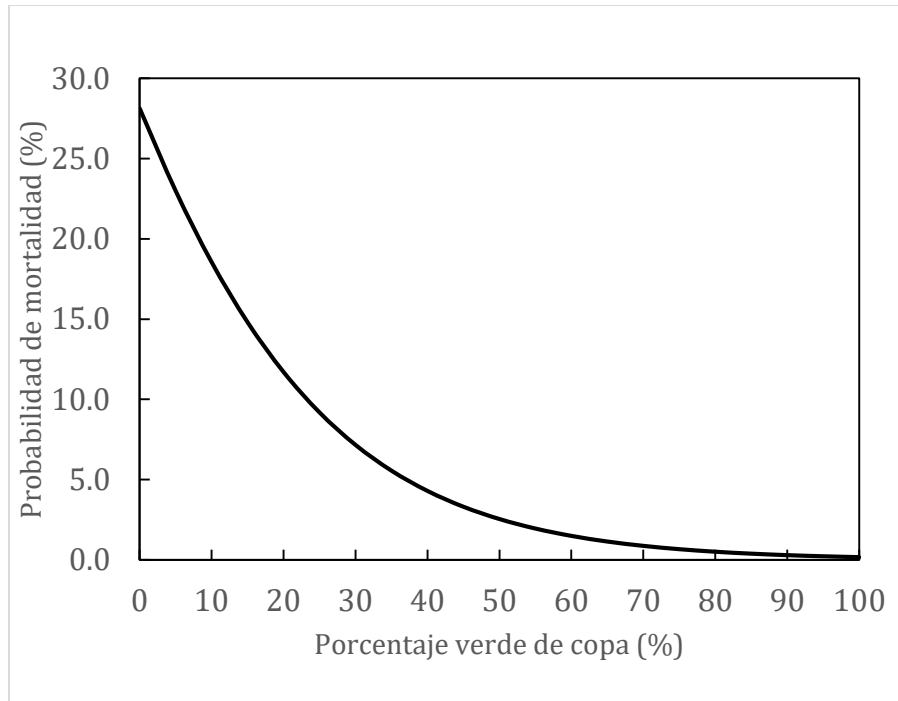


Figura 8. Probabilidad de mortalidad del fuste original de tepozán (con rebrotación posterior), en función del porcentaje verde de copa (Modelo 3).

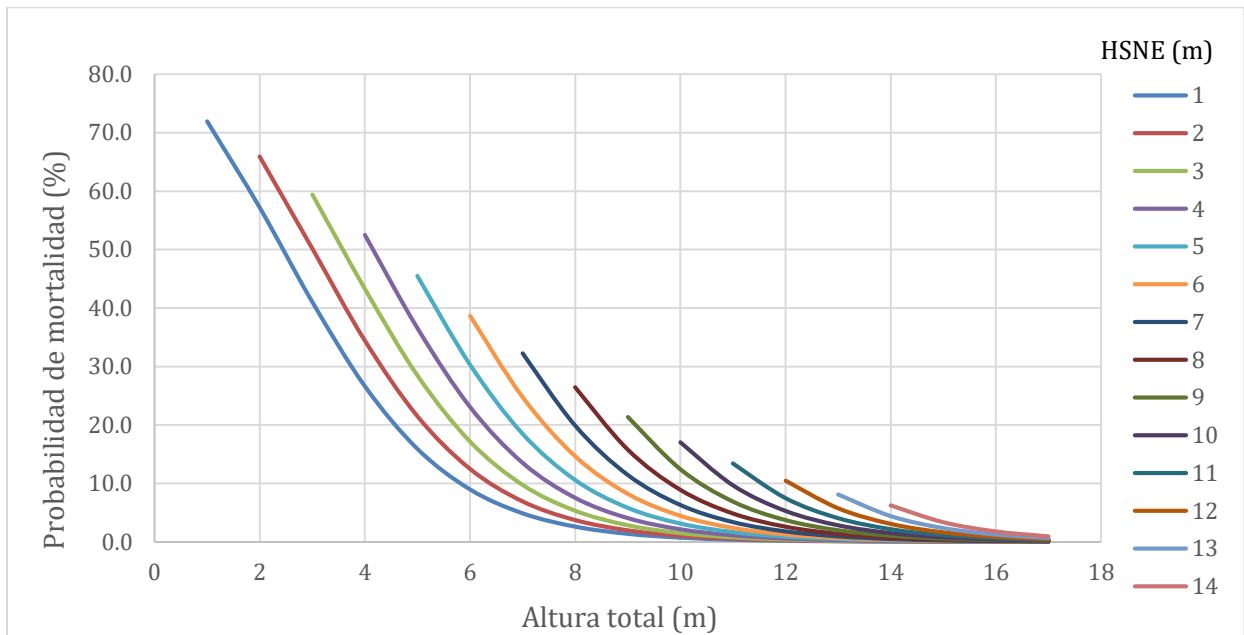


Figura 9. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura total y altura de soflamado negro (HSNE) (Modelo 4).

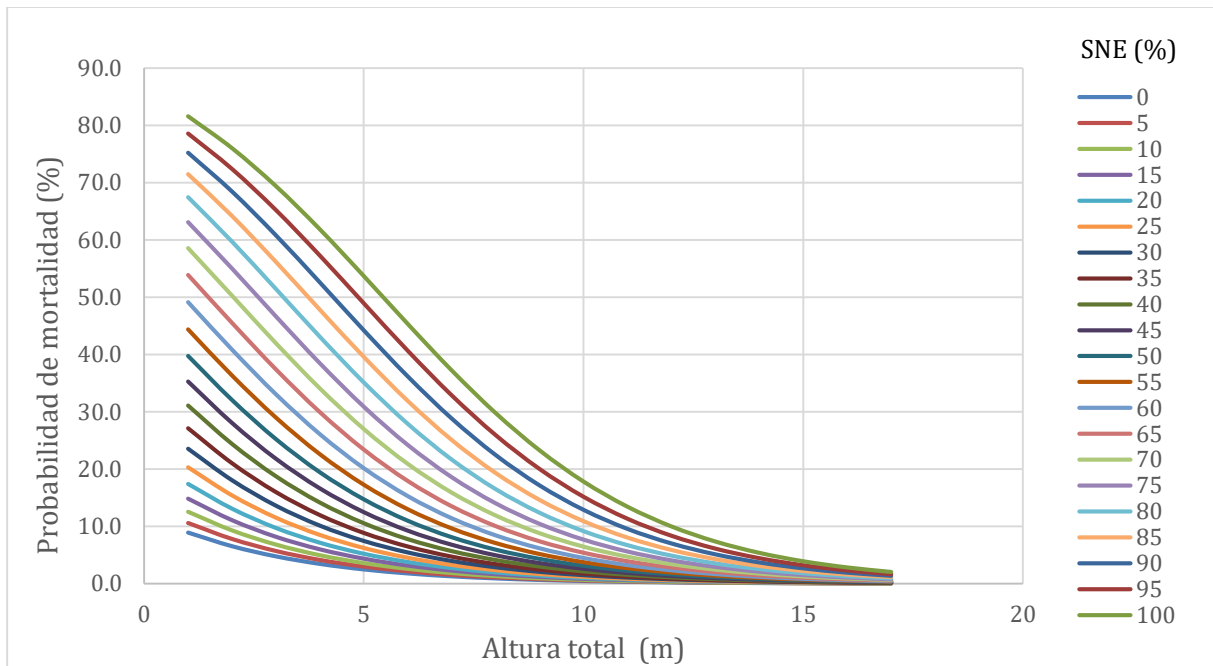


Figura 10. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura total y del porcentaje de soflamado negro (SNE) (Modelo 5).

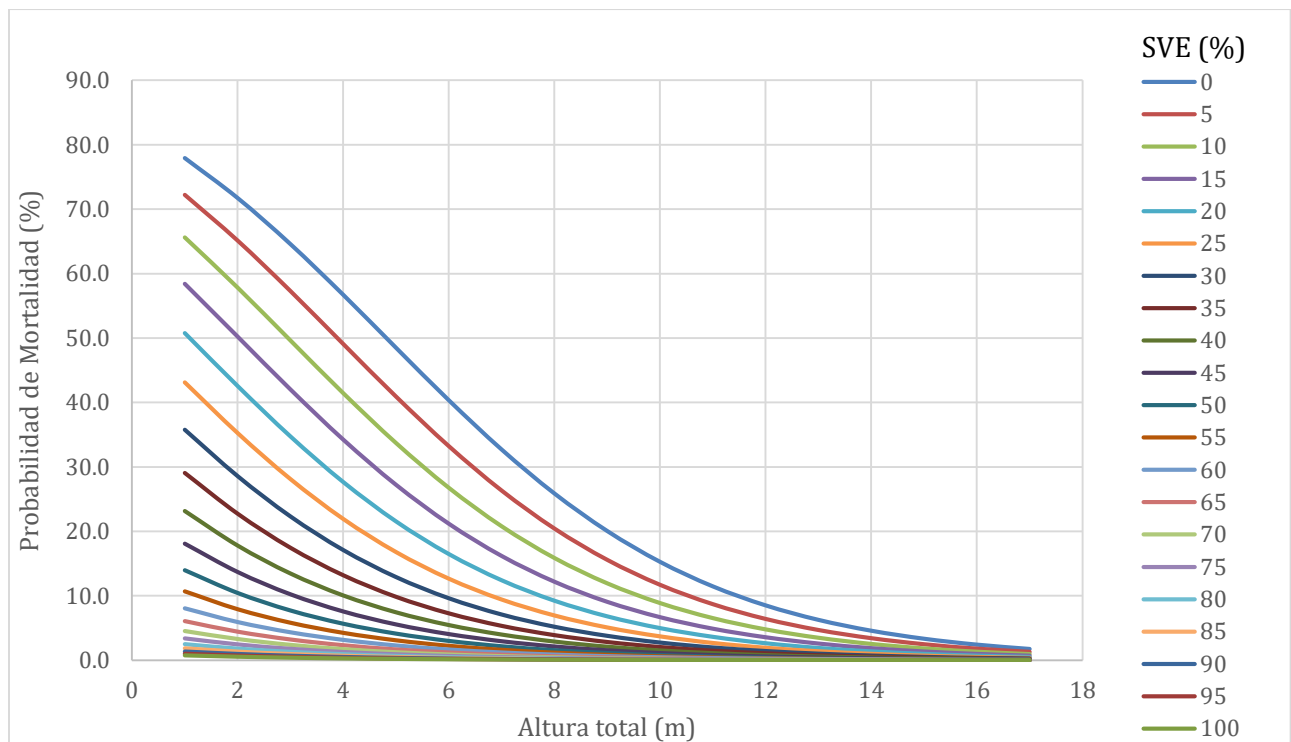


Figura 11. Probabilidad de mortalidad del tepozán, en función de la altura total y del porcentaje de soflamado verde (SVE) (Modelo 6).

Con base en el modelo logístico 1, la probabilidad máxima de mortalidad en el arbolado de *Buddleja cordata* (tepozán) es de 95% cuando la cicatriz de quemado está presente en la totalidad del fuste, por lo que a menor altura de cicatriz del incendio en el fuste menor es la probabilidad de mortalidad; conforme la citada cicatriz es más alta, el fuego habrá causado mayor daño al tronco, en particular al cambium (a pesar del grosor de corteza), al follaje y al tejido de conducción (Díaz Hernández *et al.*, 2014).

Con respecto al soflamado letal de copa se tiene que si el porcentaje de soflamado en la copa es del 100% la probabilidad de mortalidad de la copa del individuo es igual al 32.4%; por el contrario, si tenemos un porcentaje de soflamado letal de copa de 5% la probabilidad de mortalidad es de 1.6%; a mayor porcentaje de soflamado letal de copa mayor probabilidad de mortalidad (Modelo 2). Si después de un incendio los individuos de tepozán tienen un 0% de copa verde la probabilidad de mortalidad del arbolado es de 28.1% (Modelo 3), no así del individuo, ya que, de acuerdo con observaciones en campo, esta especie es capaz de rebrotar después de un incendio.

Se generaron modelos en los cuales intervinieron dos variables (modelos 4,5,6, Cuadro 7), y se graficó la altura total contra la altura de soflamado negro. Se obtuvo que la probabilidad de mortalidad aumenta si la altura de soflamado negro es igual o muy cercana a la altura total, por el contrario si la altura de soflamado es mucho menor a la altura total la probabilidad de mortalidad disminuye, a mayor altura total la probabilidad de mortalidad es menor; a una altura total de 17 m, con una altura de soflamado negro de 14 m el porcentaje de mortalidad es de 0.93%; sin embargo si se tiene una altura total de 10 m con una altura de soflamado negro de 8 m, el porcentaje de mortalidad se incrementa a 26.4% (Modelo 4).

Si se tiene una altura total de 17 metros con un porcentaje de soflamado negro de 100 %, la probabilidad de mortalidad es del 2%, si se tiene una altura total de 1 m con un porcentaje de soflamado negro del 50% la probabilidad de mortalidad se incrementa y es de 39.8% (Modelo 5). Si se tiene un individuo que posterior al incendio tiene 0% de copa verde, con una altura total de un metro se tiene que el porcentaje de mortalidad es igual al 78% (Modelo 6).

Con base en estos resultados, se deduce que *Buddleja cordata* es tolerante al fuego de baja y media severidad, ya que posterior al incendio tiene la capacidad de generar brotes epicormicos. Lo mismo ocurrió en *Arbutus xalepensis* y *Alnus arguta*, las cuales son especies tolerantes al fuego de baja intensidad, al generarse un mayor número de brotes epicórmicos, tanto por individuo como por hectárea. Para estas especies la aplicación del fuego de baja intensidad asegura una mayor probabilidad de rebrote de individuos de diámetros y alturas menores (Díaz Hernández et al., 2014).

A la fecha, no se encontraron modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de *Buddleja cordata*; sin embargo, en estudios realizados por Rodríguez-Trejo et al., (2019) se encontró una relación directa entre la altura de la cicatriz sobre el tronco y la probabilidad de mortalidad en *Juniperus deppeana* en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, Puebla, tal y como se encontró en este estudio. Díaz Hernández et al., (2014) determinaron que para el caso de *Arbutus xalepensis* y *Alnus arguta*, a mayor altura total la probabilidad de mortalidad disminuye, lo cual se debe a que cuando el árbol es más alto sus primeras ramas están alejadas del suelo reduciendo la posibilidad de arder, y también a que a mayor crecimiento en altura, mayor crecimiento en diámetro, y a mayor diámetro de los árboles el grosor de corteza también aumenta y esta provee mejor aislamiento térmico al cambium (Miller, 2000).

5.1.2 Modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de *Alnus firmifolia*

Se obtuvieron ocho modelos que resultaron significativos para Pm ($p \leq 0.05$, límites de confianza sin la unidad, concordancia $\geq 40\%$ y prueba de bondad de ajuste con $p > 0.05$), los cuales se muestran a continuación:

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(0.0694 + (-0.0649 * DAP))}) \dots\dots (7)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(1.115 + (-0.1089 * DAP) + (0.253 * HSNE))}) \dots\dots (8)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(0.1913 + (-0.0541 * DAP) + (-0.0513 * SVE))}) \dots\dots (9)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(2.1249 + (-0.1354 * HCl) + (0.2413 * HSNE))}) \dots\dots (10)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(0.1837 + (-0.0854 * HCl) + (-0.0676 * SVE))}) \dots\dots (11)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(3.577 + (-0.1156 * HMA) + (0.0326 * SNE))}) \dots\dots (12)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(0.3761 + (-0.1691 * HMA) + (-0.0442 * SMA))}) \dots\dots (13)$$

$$P_m = 1 / (1 + e^{-(-0.411 + (-0.2178 * HMA) + (-0.0283 * SVE))}) \dots\dots (14)$$

Sin embargo, una vez realizadas las gráficas, se encontró que cinco de los modelos incluyen variables en las cuales los resultados no son como se esperaban; por ejemplo, se obtuvo que a mayor altura de chamuscado marrón menor probabilidad de mortalidad, pero los resultados deberían ser al contrario; esto resulta así porque hay efecto enmascarado de otras variables que influyen en las variables de los modelos 10 al 14, aunque no están en el modelo en cuestión (como la altura total del árbol o superficie con soflamado negro o letal) de cierta manera generan influencia en los resultados. Así, un árbol con mayor soflamado marrón o no letal da menor probabilidad de mortalidad porque el mayor soflamado marrón se puede asociar con menor soflamado negro o letal. Por esta razón no se recomienda el uso de estos cinco modelos, caso contrario en los primeros tres modelos los cuales si son recomendables.

La Figura 12 muestra la afectación del arbolado en campo. La significancia de los modelos y los parámetros se muestra en el Cuadro 8. Las Figuras 13, 14 y 15 muestran los gráficos derivados.

a)



b)



c)



Figura 12. Afectación de incendio a arbolado de *Alnus firmifolia*: a) Zona afectada por incendio con severidad alta. b) Sitio afectado por incendio con severidad media, c) Sitio afectado con severidad baja.

Cuadro 8. Significancia de los modelos de probabilidad de mortalidad para *Alnus firmifolia* (modelos 7 al 9).

Modelo	P intercepto	Variable	P variables	IC	Concordancia	PBA	
7	0.7988	DAP	<0.0001	0.911	0.964	63.1	0.0866
8	0.0011	DAP	<0.0001	0.864	0.931	76.2	0.1926
		HNE	<0.0001	1.195	1.388	76.2	0.1926
9	0.501	DAP	0.0004	0.919	0.976	71.9	0.0542
		SVE	0.0002	0.925	0.976	71.9	0.0542

IC = intervalo de confianza a 95%, C = concordancia, p BAML = valor de p de la prueba de bondad de ajuste de Hosmer y Lemeshow.

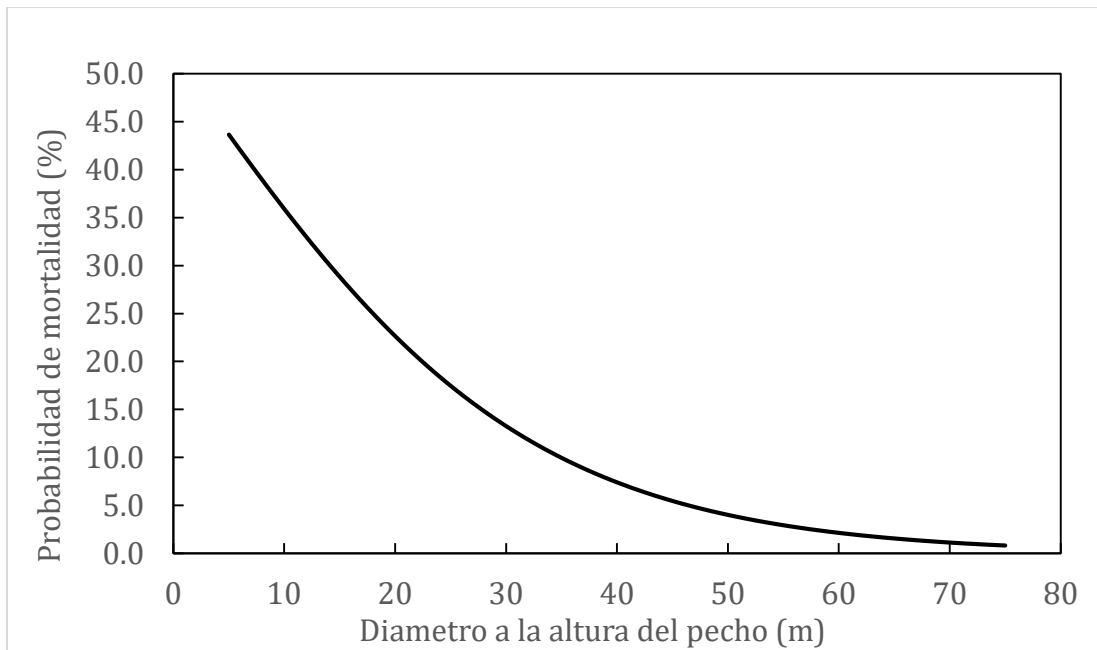


Figura 13. Probabilidad de mortalidad de aile, en función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal (Modelo 7).

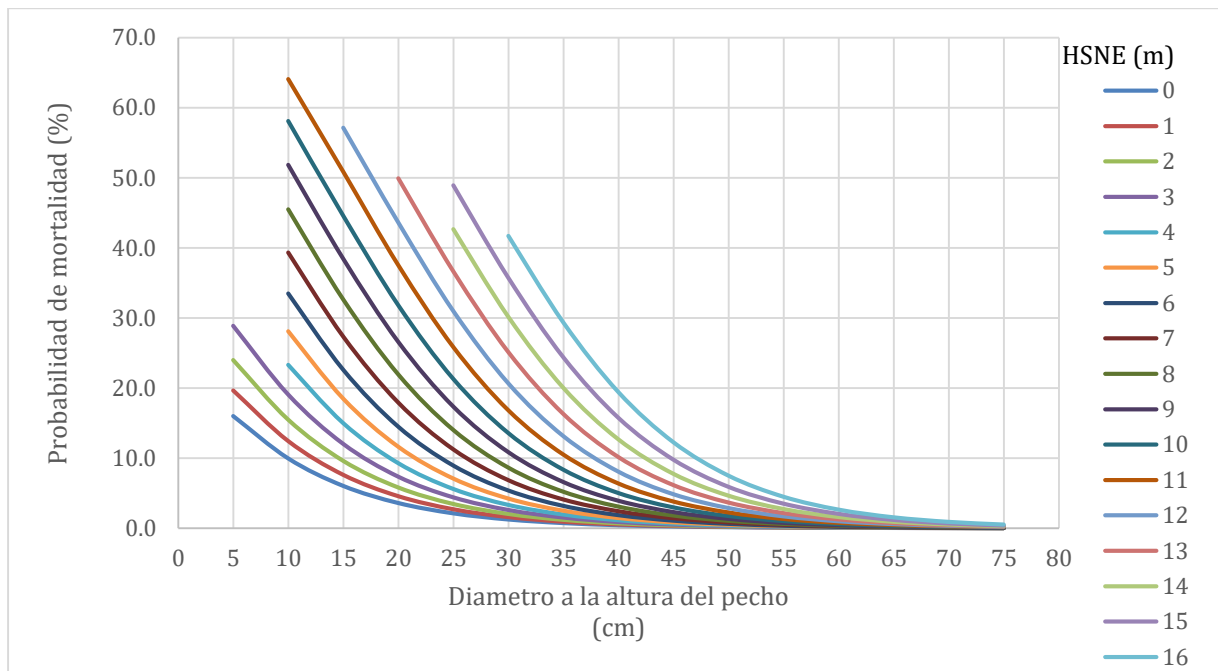


Figura 14. Probabilidad de mortalidad de aile, en función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal y altura de soflamado negro (Modelo 8).

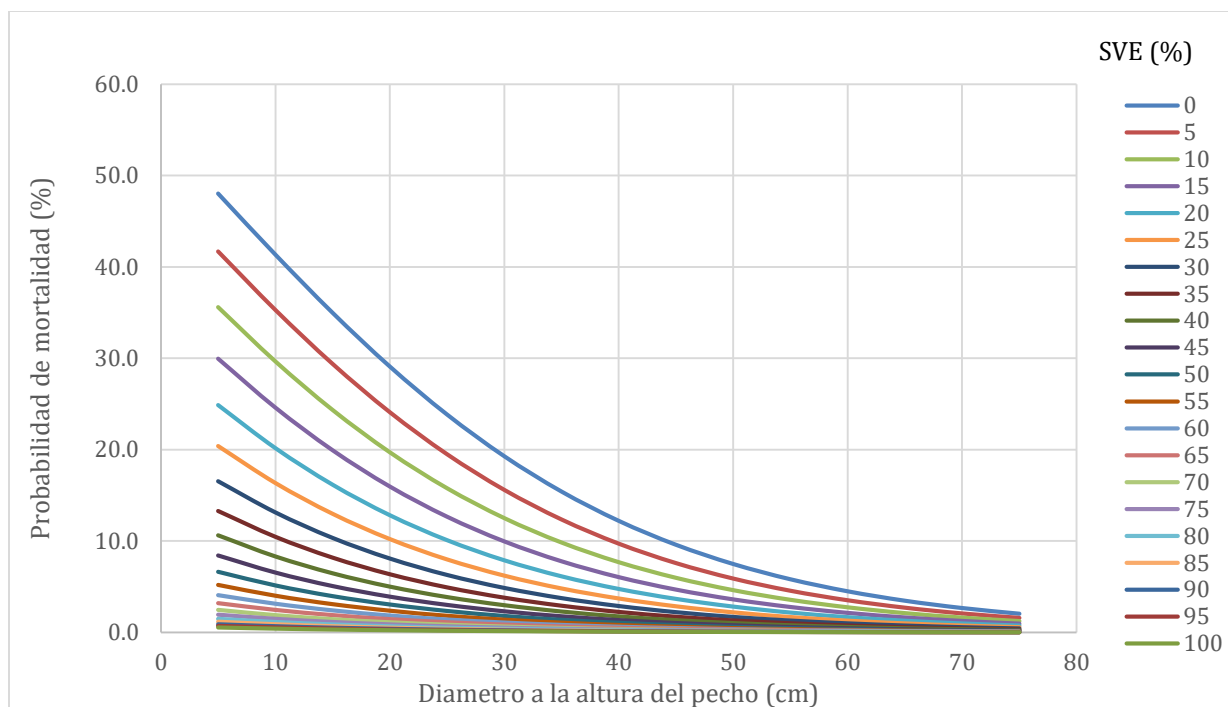


Figura 15. Probabilidad de mortalidad de aile, en función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal y porcentaje de soflamado verde (Modelo 9).

Con base en el modelo 7 (Figura 13), la probabilidad máxima de mortalidad en el arbolado de *Alnus firmifolia* (aile) es de 42.1 % cuando el arbolado afectado tiene un diámetro de 6 cm; si el individuo tiene un diámetro de 50 cm la probabilidad de mortalidad reduce considerablemente siendo esta de 4%. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Miller (2000), quien menciona que conforme un árbol tiene mayor diámetro, tenderá a tener más gruesa su corteza y esta protegerá mejor al cambium vascular, reduciendo así la probabilidad de mortalidad.

Debido a que no existe investigación de probabilidad de mortalidad de *Alnus firmifolia* se realiza la comparación con resultados de otras latifoliadas como es el caso de un estudio realizado por Diaz Hernández *et al.*, (2014), en el cual determinaron que la probabilidad de mortalidad en *Arbutus xalepensis* por incendio forestal aumenta si el diámetro es menor.

Asimismo, se generaron modelos en los cuales intervinieron dos variables (modelos 8 y 9, Cuadro 8). Se graficó el diámetro a la altura del pecho contra altura de soflamado negro o letal, como resultado se tiene que el arbolado con diámetro de 40 cm y una altura

de soflamado negro de 16 m tiene un 19.4 % de probabilidad de mortalidad, mientras que arbolado con diámetro de 5 cm y altura de soflamado negro de 2 m tendrá un porcentaje de mortalidad de 24%, lo que quiere decir que cuando se tiene menor diámetro y mayor altura de soflamado negro el porcentaje de mortalidad es mayor (modelo 8, Figura 14);

En la medida que un árbol es más alto tendrá también una mayor parte de las copas fuera del alcance del fuego, es decir, el follaje o tejido para la fotosíntesis que permitirá la producción de carbohidratos para rebrote de follaje y ramas de las partes dañadas. De igual forma, a mayor altura la yema apical y las de las ramas, se encuentran más elevadas y lejos del alcance del fuego (Díaz Hernández *et al.*, 2014), por lo que se reduce la probabilidad de hacer un incendio de copa pues se corta el combustible en escalera.

Se graficó el diámetro a la altura del pecho contra el porcentaje de soflamado verde, obteniéndose como resultado que el arbolado con diámetro de 10 cm y un porcentaje de copa verde de 0% tiene un 41.3% de probabilidad de mortalidad, arbolado con 10 cm de diámetro y con 100% de copa verde, la probabilidad de mortalidad es de 0.4%, y arbolado con 40 cm de diámetro y 0% de copa verde tiene un 12 % de probabilidad de mortalidad (Figura 15).

De acuerdo con lo observado en campo, *Alnus firmifolia* tiene una alta capacidad de rebrotación; en concordancia con estudios realizados por Juárez *et al.* (2012) Díaz Hernández *et al.* (2014) y Rodríguez-Trejo (2014) en los cuales *Alnus acuminata* y *Quercus spp.*, también presentan rebrotes post-fuego más vigorosos y abundantes que en los pinos, razón por la cual se consideran especies tolerantes al fuego (Whelan, 1997).

5.1.3 Modelos para estimar la probabilidad de mortalidad de *Pinus hartwegii*.

Se obtuvieron siete modelos (Ecuaciones 15 a 21) que resultaron significativos para Pm ($p \leq 0.05$, límites de confianza sin la unidad, concordancia $\geq 40\%$ y prueba de bondad de ajuste con $p > 0.05$), los cuales se muestran a continuación:

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-0.05078 + (-0.0362 * DAP))}) \dots\dots (15)$$

$$Pm = 1 / (1 + e^{-(-0.5076 + (-0.1363 * HTO))}) \dots\dots (16)$$

$$P_m = 1 / (1 + e^{-(-0.396 + (-2.6608 * HMA))}) \dots\dots (17)$$

$$P_m = 1 / (1 + e^{-(0.3436 + (-0.0381 * DAP) + (-2.4195 * HMA))}) \dots\dots (18)$$

$$P_m = 1 / (1 + e^{-(1.4889 + (-0.2053 * HTO) + (-2.9202 * HMA))}) \dots\dots (19)$$

$$P_m = 1 / (1 + e^{-(-0.9072 + (0.1964 * HCI) + (-2.3652 * HMA))}) \dots\dots (20)$$

$$P_m = 1 / (1 + e^{-(-1.4966 + (-1.9692 * HMA) + (0.0256 * SNE))}) \dots\dots (21)$$

Sin embargo, una vez realizadas las gráficas, se tuvo que cinco de los modelos incluyen variables en las cuales los resultados no son como se esperaban, debido a que hay efecto oculto de otras variables que influyen en las variables de los modelos 17 al 21, las cuales, aunque no están en el modelo en cuestión influyen en los resultados. Por esta razón, no se recomienda el uso de estos cinco modelos, caso contrario en los primeros dos modelos los cuales sí son recomendables.

La Figura 16 muestra la afectación del arbolado de *Pinus hartwegii*. La significancia de los parámetros es presentada en el Cuadro 9. Las figuras 17 y 18 muestran los gráficos derivados de los parámetros.

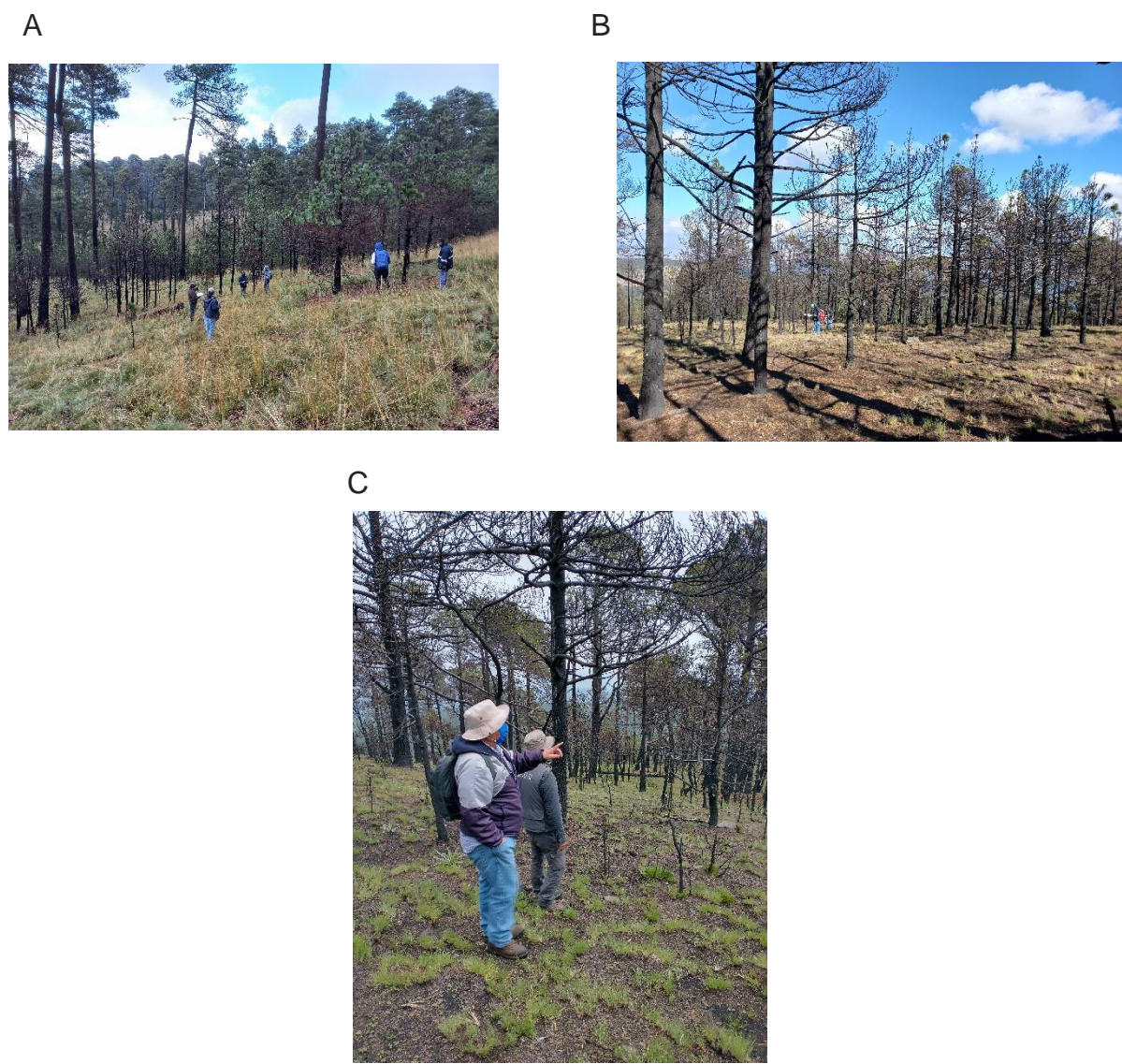


Figura 16. Afectación de incendio a arbolado de *Pinus hartwegii*. A. Zona afectada por incendio con severidad baja. B. Sitio afectado por incendio con severidad extrema. C. Sitio afectado con severidad alta.

Cuadro 9. Significancia de los modelos de probabilidad de mortalidad para *Pinus hartwegii* (modelos 15 y 16).

Modelo	P intercepto	Variable	P variables	IC	Concordancia	PBA	
15	0.1478	DAP	0.0332	0.933	0.997	65.2	0.2185
16	0.8813	HTO	0.003	0.798	0.955	65.8	0.1478

IC = intervalo de confianza a 95%, C = concordancia, p BAH = valor de p de la prueba de bondad de ajuste de Hosmer y Lemeshow.

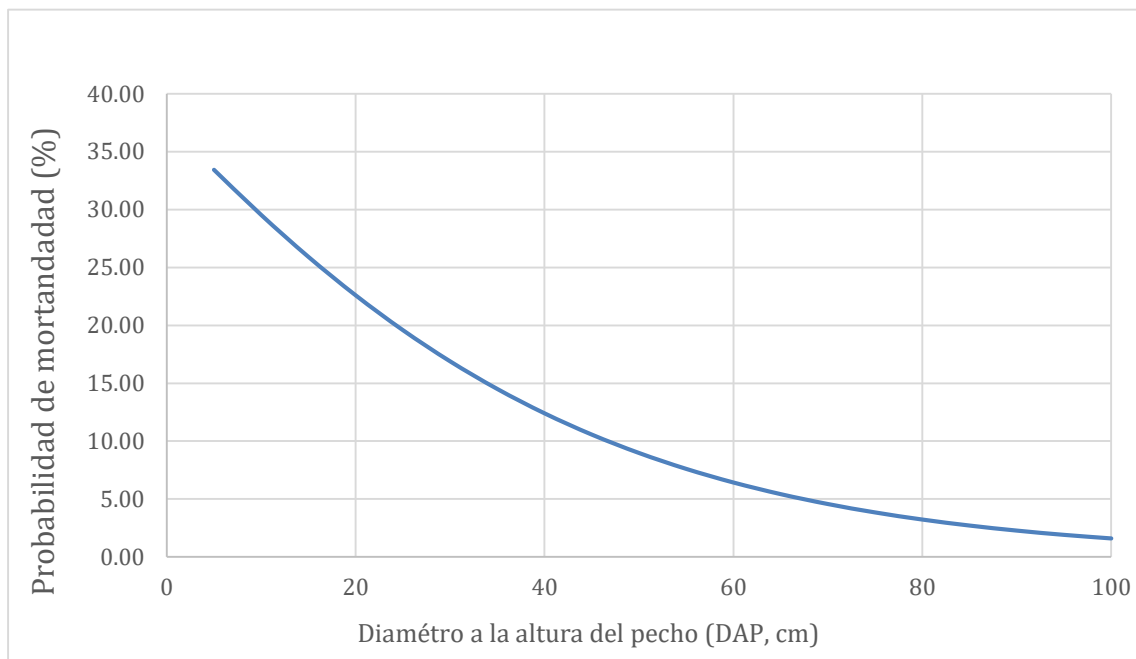


Figura 17. Probabilidad de mortalidad de *P. hartwegii* como función del diámetro a la altura del pecho o diámetro normal (Modelo 15).

Con base en el modelo 15, la probabilidad máxima de mortalidad en el arbolado de *Pinus hartwegii* fue de 33.4 % cuando el arbolado afectado por incendio tiene un diámetro de 5 cm (Figura 17). Lo anterior debido a que el arbolado que tiene mayor diámetro, tiene mayor grosor de corteza y esto contribuye al aislamiento térmico y supervivencia del cambium vascular debido a que estará más protegido de las elevadas temperaturas y será menos probable que resulte afectado por el fuego, ya que el grosor de corteza es una adaptación al fuego (Miller, 2000). A menor grosor de corteza, mayor probabilidad de daño al cambium vascular y a los tejidos de conducción (alterando transporte de agua, nutrimentos y fotosintatos), con lo que aumenta la probabilidad de mortalidad (Hood *et al.*, 2018).

Estas tendencias han sido muy consistentes en diversos trabajos que se han realizado con especies de coníferas tales como el de Robles Gutiérrez *et al.* (2015), quienes encontraron que el porcentaje de mortalidad para monte bravo de *Pinus hartwegii* es mayor a medida que el diámetro a la altura del pecho es menor. Gómez-Mendoza y Rodríguez-Trejo (2021) mencionan que sucede lo mismo en el caso de *Pinus*

montezumae, es decir, a medida que el diámetro aumenta, el porcentaje de mortalidad disminuye. Resultados similares han sido reportados para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (Pantoja-Campa *et al.* 2018).

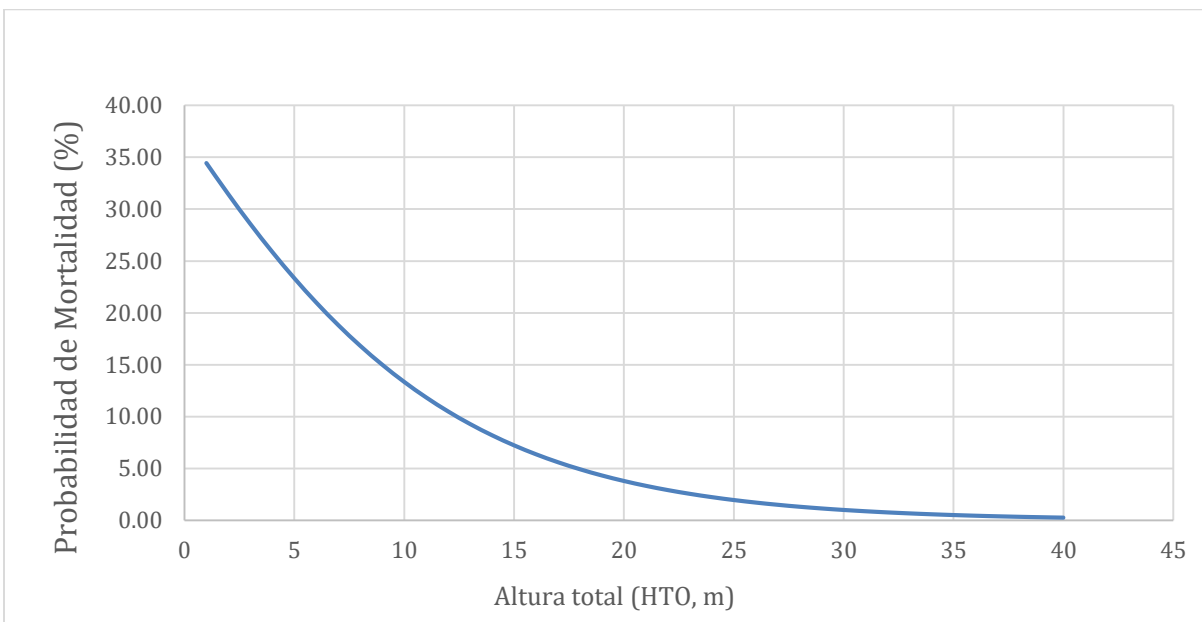


Figura 18. Expresión gráfica de la probabilidad de mortalidad de *P. hartwegii* como función de la altura total (Modelo 16).

En el modelo 16 se tiene que un árbol con una altura de 1 m, afectado por incendios, tiene una probabilidad de mortalidad de 34.4%, mientras que otro con 30 m de altura dicha probabilidad es del 1%; esto indica, que a mayor altura del arbolado menor es la probabilidad de mortalidad, ya que a medida que un árbol es más alto tendrá también una mayor parte de las copas fuera del alcance del fuego. Estos resultados son consistentes con otros trabajos en los cuales se calculó la probabilidad de mortalidad (Rodríguez-Trejo 2019; Gómez-Mendoza y Rodríguez-Trejo 2021; Pantoja-Campa *et al.*, 2018).

VI. CONCLUSIONES

Se obtuvieron seis modelos logísticos para la modelación de mortalidad en la zona de estudio para *Buddleja cordata*, siendo la altura de cicatriz del fuego sobre el tronco (HCI), porcentaje de soflamado negro (SNE), porcentaje de soflamado de copa verde (SVE), altura de soflamado negro (HSNE) y altura total (HTO), las variables que influyen en la mortalidad. Los modelos mostraron que la probabilidad de mortalidad de esta especie está influenciada mayormente por el porcentaje de copa dañada; sin embargo, a pesar de haberse quemado la totalidad de la copa en algunos casos, en la época en la cual se levantaron los datos se observó que existen rebrotes.

A partir de los modelos obtenidos, se puede decir que, para el caso del incendio ocurrido en el APFF Nevado de Toluca, el cual afectó a *Buddleja cordata* se tiene que:

- a) A mayor altura de la cicatriz del fuego en el fuste mayor es la probabilidad de mortalidad.
- b) Si el incendio afecta la copa y se presenta un mayor porcentaje de soflamado letal, se puede tener hasta un 35% de probabilidad de mortalidad, lo que quiere decir que a pesar de que toda la copa este afectada, es poco probable que el individuo muera.
- c) El porcentaje de mortalidad aumenta cuando la altura de soflamado letal es igual o cercano a la altura total del arbolado; sin embargo, cuanto más alto es el individuo mayor es su resistencia al fuego y su probabilidad de sobrevivir es mayor.
- d) La probabilidad de mortalidad es mayor cuando el porcentaje de soflamado letal es mayor, pero si el arbolado es adulto su capacidad de sobrevivir aumenta, pues en campo se observó que esta especie tiene alta capacidad de rebrote.
- e) A mayor porcentaje de copa verde presente en el arbolado de esta especie afectado por incendio mayor es la probabilidad de sobrevivir a los efectos del fuego.

Para *Alnus firmifolia* se obtuvieron tres modelos de probabilidad de mortalidad, siendo el diámetro normal con corteza, la altura de soflamado negro y el porcentaje de soflamado verde las variables que influyen en la mortalidad.

Se mostró que la probabilidad de mortalidad de esta especie está influenciada mayormente por el diámetro normal. A partir de los modelos se tiene que:

- a) A mayor diámetro normal la probabilidad de mortalidad disminuye.
- b) La probabilidad de mortalidad de aile disminuye cuando el individuo tiene un diámetro mayor; la probabilidad de mortalidad aumenta si la altura de soflamado letal aumenta y el diámetro normal disminuye.
- c) A mayor porcentaje de soflamado verde, menor es la probabilidad de mortalidad, esta reduce si el diámetro normal con corteza es mayor.

Durante los recorridos realizados para el levantamiento de datos se observó que el aile tiene una alta probabilidad de rebrote, en sitios donde la severidad del incendio fue extrema se observó arbolado con rebrotes de hasta un 1 m de altura.

Para *Pinus hartwegii* se obtuvieron dos modelos de probabilidad de mortalidad, siendo el diámetro normal con corteza y la altura total las variables más significativas.

A partir de los gráficos se tiene que:

- a) A mayor diámetro normal con corteza, menor es la probabilidad de mortalidad; lo mismo sucede con la altura total, a mayor altura total menor es la probabilidad del arbolado afectado por incendio.

Las especies de interés en este estudio mostraron un mínimo porcentaje de mortalidad, lo que nos indica que es importante esperar al menos un año después de sucedido el incendio para decidir las acciones de restauración que se deben de realizar.

Se recomienda que en un próximo estudio se utilicen los datos de los daños ocasionados al componente herbáceo y al suelo, con la finalidad de realizar una mejor valoración del efecto que el fuego ocasiona a los ecosistemas en las diferentes intensidades.

VII. LITERATURA CITADA

- Agee, J.K. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest Forest. Island Prees, Washinton, D.C., USA. 493 p.
- Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó., Jiménez-Pérez, J., Pando-Moreno, M., Treviño-Garza, E. J., Aranda-Ramos, R., Canizales-Velázquez, P.A. (2010). Efecto de la severidad del fuego sobre la regeneración asexual de especies leñosas de un ecosistema mixto (*Pinus-Quercus*) en el Parque ecológico Chipinque, México. *Interciencia*, 35 (9); 690-695 pp.
- Almeida-Leñero, L., Giménez-De Azcárate, J., Cleef, A. M., y González-Trápaga, A. (2004). Las comunidades vegetales del zacatonal alpino de los volcanes Popocatepetl y Nevado de Toluca, Región Central de México. *Phytocoenologia*, 34(1); 91-132 pp.
- Ávila-Flores, D., González-Tagle, M.A., Jiménez-Pérez, J, Aguirre-Calderón, O.A., Treviño-Garza, E., Vargas-Larreta, B y Alanís-Rodríguez, E. (2014). Efecto de la severidad del fuego en las características de la estructura forestal en rodales de coníferas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(1), 34-45 pp.
- Bekker, M. F y Taylor, A. H. (2010). Fire disturbance, forest structure, and stand dynamics in montane forests of the southern Cascades, Thousand Lakes Wilderness, California, USA. *Écoscience*, 17(1); 59–72 pp.
- Bond, W.J., y Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”; the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20; 387-394 pp.
- Brown, P. (2006). Climate effects on fire regimes and tree recruitment in Black Hills ponderosa pine forests. *Ecology*, 87(10); 2500–2510 pp.
- Brown J. K., and J. K. Smith (Eds). United State of America, 2000. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 257 p.
- Caldaro, N. 2002. Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology. *Science of the Total Environment* 292(3):141-165.
- Camacho, M., Hernández, S.L. y Morfín, L. (2009). Tepozán (*Buddleia cordata*). Proyecto Papime pe205907. FESC UNAM. 1-40 pp.
- Camacho D., Nahed J., Ochoa S., Jiménez G., Soto L., Grande D., Pérez-Gil F., Carmona J., Aguilar C. (1999). Traditional knowledge and fodder potential of the genus *Buddleia* in the Highlands of Chiapas, Mexico. *Animal Feed Science and Technology* 80 Elsevier. 123-134 p.
- Castañeda-Rojas, M. F., y Endara Agramont, A. R. (2013). Evaluación de zonas vulnerables a incendios forestales en bosques de alta montaña del Estado de México. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México].

- Castañeda-Rojas, M.F, Endara-Agramont, A.R, Villers-Ruiz, M.L y Nava-Bernal, E.G. (2015). Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y bosques*, 21(2); 45-58 pp.
- Cochrane, M.A, Alencar, A, Schulze, M., Souza, C, Nepstad, D, Lefebvre, P y Davidson, E. (1999). Positive Feedbacks in the Fire Dynamic of Closed Canopy Tropical Forests. *Science (New York, N.Y.)*. 284. 1832-5 pp.
- Collins, B. M., Everett, R. G y Stephens, S. L. (2011). Impacts of fire exclusion and recent managed fire on forest structure in old growth Sierra Nevada mixed-conifer forests. *Ecosphere*, 2(4); 2150–8925 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2011). Estrategia y Lineamientos de Manejo del Fuego en Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT, México (2da edición); 1-18 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca; 37-42 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2017). Memoria de Foro de Manejo Adaptativo en Áreas Naturales Protegidas. CONANP México. Recuperado: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/10/Memorias-Foro-Manejo-Adaptativo-en-areas-naturales-protegidas.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2016). Incendios forestales. Gobierno de México de: <https://www.gob.mx/conafor/documentos/incendios-forestales-27734>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019). Programa de Manejo del Fuego 2019. Gobierno de México; 2-63 pp.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). Incendios forestales. Gobierno de México de: <https://www.gob.mx/conafor/documentos/incendios-forestales->
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2017). Análisis de la Afectación y Severidad de los Incendios Forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile. Informe Técnico, Santiago, Chile; 56 p.
- Cremer, E., Ziegenhagen, B., Schulerowitz, K., Mengel, C., Donges, K., Bialozyt, R., Hussendörfer, E y Liepelt, S. (2012). Local seed dispersal in European silver fir (*Abies alba* Mill.): lessons learned from a seed trap experiment. *Trees*, 26(3), 987–996 pp.
- Díaz-Hernández, D., Rodríguez-Laguna, R., Rodríguez-Trejo, D.A, Acevedo-Sandoval, O.A., Maycotte-Morales, C.C. (2014). Tolerancia al fuego de *Alnus arguta* (Schl.) Spach. y *Arbutus xalapensis* Kunth, en Singuilucan, Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1 (7); 103-110 pp.

- Donoso C., 1997. Ecología Forestal: El bosque y su medio ambiente. Editorial Universitaria. V Edición. Santiago. Chile. 369 pp.
- Eiten, G. (1992). Natural Brazikian vegetation types and their causes. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 64; 35-65 pp.
- Endara-Agramont, A.R. (2007). Estructura forestal de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, México]
- FAO. (2001). The Global Forest Resources Assessment 2000, Main report. FAO Forestry Paper 140. Rome
- FAO. (2013). Incendios Forestales. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [En línea]. Recuperado de: <http://www.fao.org/emergencias/nuestras-actividades/tipos-de-peligros-y-deemergencias/incendios-forestales/es/>
- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M., y Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal; 1-49 pp.
- Franco, M. S. y Burrola, A. C. (2010). Los hongos comestibles del Nevado de Toluca. Toluca, Estado de México, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Frelich, L. E. (2002). Forest dynamics and disturbance regimes: Studies from temperate evergreen-deciduous forests. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1-9 pp
- Fulé, P. Z., & Laughlin, D. C. (2007). Wildland fire effects on forest structure over an altitudinal gradient, Grand Canyon National Park, USA. *Journal of Applied Ecology*, 44(1), 136–146. doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01254.x
- García-Sánchez F., Aguirre-Rivera J.R., Villanueva-Díaz J. y García-Pérez J. (1999). Contribución al conocimiento florístico de La Sierra de Álvarez, San Luis Potosí, México. *Polibotánica*, agosto, 10. 73 – 103 pp.
- Gill, A.M., Woinarski, J., & York, A. (1999). Australia's biodiversity responses to fire. *Biodiversity Technical Paper*, No. 1; 17-260 pp.
- Gómez-Reyes, V. M., Tinoco-Molina, O., Terrón-Alfonso, A., Gómez-Peralta, M., Tena-Morelos, C. A., y Garza-Ocañas, F. (2014). Efecto de los incendios forestales en la riqueza y composición de macromicetos. *Revista mexicana de micología*, 39; 21-30 pp
- González, M. E., Szejner, M., Muñoz, A. A., y Silva, J. (2011). Incendios catastróficos en bosques andinos de *Arcauria nothofagus*: Efecto de la severidad y respuesta de la vegetación. *Bosque Nativo*, 46; 12–17 pp.
- Gill, M., Woinarski J., & York A. (1999). Australia's biodiversity responses to fire. *Biodiversity Technical Report No. 1*, Environment Australia.

- Hardesty, F., Myers, R., & Fulks, W. (2005). Fire, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *George Wright Forum*, 22; 78-87 pp.
- Heinselman, M. L. 1978. Fire in wilderness ecosystems. In: 'Wilderness Management'. Hendee J. C., G. H. Stankey, and R. C. Lucas (Eds.). Washington, D. C. 1978. USDA Forest Service, pp: 249–278.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI), 2000. Cartografía Edafológica Temática, escala 1: 250,000: catálogo de símbolos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía-México; 2-27 pp.
- Jardel, E. J., Pérez Salicrup, D., Alvarado, E., & Morfín Ríos, J. E. (2014). Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales: guía de campo. Comisión Nacional Forestal: Guadalajara, Jalisco, México; 100 p.
- Julio A., G., & Giroz G., G. (1975). Notas Sobre el Comportamiento del Fuego y su Aplicación en el Control de Incendios Forestales. *BOSQUE*, 1(1), 18–27. <https://doi.org/10.4206/bosque.1975.v1n1-04>
- Kaufmann, M. R., T. T. Veblen and W. H. Romme. 2006. Historical fire regimes in ponderosa pine forests of the Colorado Front Range and recommendations for ecological restoration and fuels management. Front Range Fuels Treatment Partnership Roundtable, findings of the Ecology Workgroup. www.frftp.org/roundtable/pipo.pdf. (septiembre de 2013).
- Kilgore, B. M. 1981. Fire in ecosystem distribution and structure: western forests and scrublands. In: 'Fire Regimes and Ecosystem Properties: Proceedings of the Conference'. Mooney H. A., T. M. Bonnicksen, N. L. Christensen, J. E. Lotan and R. A. Reiners (Comps.) Washington, D.C. 1981. USDA Forest Service, pp. 58–59.
- Lloret, F. 2004. Régimen de incendios y regeneración. In: Valladares, F. (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente-EGRAF, S. A., Madrid, España. pp. 101-126
- Mendoza-Hernández, P.E. (2002). Sobrevivencia y crecimiento de los estadios iniciales de *Buddleia cordata* (Tepozan) en ambientes contrastantes del Ajusco medio, D.F. México, 2002. IX, 89 p.
- Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forests: implications for conservation, *Trends in Ecology & Evolution*, 10 (2), 58-62 pp.
- Myers, R. L. (2006). Convivir con el fuego: manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego (No. C043. 008). The Nature Conservancy; 36 p.
- Myers, R. L., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2009). Fire in tropical pine ecosystems. In M. A. Cochrane (Ed.), *Tropical fire ecology* (pp. 557–605). Berlin, Alemania: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8_20

- Nasi, R., Dennos, R., Meijaard, E., Applegate G. & Moore, P. 2002: Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales (FAO)*. 53: 36-40.
- Navarro, G. (2001). Determinación de la calidad nutritiva de cuatro plantas forrajeras (*Amelanchier denticulata*, *Buddleia cordata*, *Cotoneaster pannosa*, *Dodonaea viscosa*) como alternativa para la alimentación de caprinos y ovinos. México. 36 p.
- Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., & Ffolliot, P.F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122; 51-71pp.
- Pantoja-Campa, Victoria; Rodríguez-Trejo, Dante Arturo; L. Myers, Ronald; Hernández-Acosta, Elizabeth; González-Santiago, María Virginia. (2018). Modelación de la probabilidad de mortalidad de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. en áreas de quema prescrita o incendiadas en Chiapas *Acta Universitaria*, 28 (4): páginas
- Pellegrini, A. F. A., Anderegg, W. R. L., Paine, C. E. T., Hoffmann, W. A., Kartzinel, T., Rabin, S. S., Sheil, D., Franco, A. C., & Pacala, S. W. (2017). Convergence of bark investment according to fire and climate structures ecosystem vulnerability to future change. *Ecology Letters*, 20(3); 307–316 pp.
- Peña-Flores, R.M. (1995). Propagación por medio de esporas de algunas especies (*Tamarix plumosa*, *Cotoneaster pannosa*, *Senecio praecox*, *Buddleia cordata*, *Schinus terebenthifolius*). México, 1995. 62 p.
- Perry, D., Oren, R., y Hart, S. (2008). *Forest Ecosystems. Oregon State University*. Prensa de la Universidad Johns Hopkins, EUA, 632 pp.
- Phillips, R. J., & Waldrop, T. A. (2008). Change in vegetation structure and composition in response to fuel reduction and composition in response to fuel reduction treatments in the South Carolina Piedmont. *Forest Ecology and Management*, 255, 3107–3116 pp.
- Pinard, M. y Huffman, J. (1997). Resistencia al fuego y propiedades de la corteza de árboles en un bosque estacionalmente seco en el oriente de Bolivia. *Revista de Ecología Tropical*, 13 (5), 727-740 pp.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Ed. Limusa. México, 417 p.
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2001). Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2); 145-151 pp.
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Fulé, P.Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23-37 pp.
- Rodríguez-Trejo, D., Martínez-Hernández, H., Ortega-Baranda, V. (2004). Ecología del fuego en el bosque de *Pinus hartwegii*. En: *Incendios forestales en México*.

- Métodos de evaluación. Villers R., L. y J. López B. (Eds.). México, 2004. Universidad Autónoma de México. 103-120 pp.
- Rodríguez Trejo, D. A. 2014. Incendios de Vegetación. Vol. 1. Ed. C.P., UACH, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP, PNIP. México. 889 p.
- Rodríguez-Trejo, D.A. (2000). Educación e Incendios Forestales. Mundi-Prensa México. 2a edición; 212 p.
- Rodríguez-Trejo, DA; Martínez-Muñoz, P; Pulido-Luna, JA; Martínez-Lara, PJ; Cruz-López, JD. 2019. Instructivo de Quemadas Prescritas para el Manejo Integral del Fuego en el municipio de Villaflores y la Reserva de la Biosfera La Sepultura, Chiapas, México. FMCN, USDA FS, USAID, BIOMASA, A. C., UACH, Ayuntamiento de Villaflores, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP, Gobierno del Estado de Chiapas, ANCF. México. 183 p.
- Ryan, K.C. 1982. Evaluating potential tree mortality from prescribed burning. In: Proceedings of the symposium on site preparation and fuels management on steep terrain. D. M. Baumgartner (ed.), Pullman, Washington. 1982. Washington State University Cooperative Extension. pp: 167-179.
- Ryan, K.C. (2002). Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica*, 36(1), 13–39. Obtenido de <http://www.metsantutkimuslaitos.fi/silvafennica/full/sf36/sf361013.pdf>
- Rzedowski, J. y G. de Rzedowski (1985). Flora fanerogámica del Valle de México, Volumen II, Dicotyledoneae (Euphorbiaceae-Compositae). Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, e Instituto de Ecología, México, 1985, 674 p
- Scott, A. C. (2000). The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeo*, nº 164, 281-329.
- Scott, A. C. (2009). Forest fire in the fossil record, en *Fire effects on soils and restoration strategies*. Enfield, Edit. Science Publishers, 1-37 pp.
- Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., y Schmidt, D. (2007). El Fuego, los Ecosistemas y la Gente: Amenazas y estrategias para la conservación global de la biodiversidad. Informe Técnico de la Iniciativa Global para el Manejo del Fuego 2007-2. The Nature Conservancy. Arlington, VA; 12 p.
- The Nature Conservancy, WWF y UICN. (2004). El Fuego los Ecosistemas y la Gente. Global Fire Initiative 13093 Henry Beadel Drive Tallahassee, FL fire@tnc.org
- The Nature Conservancy, WWF y UICN. (2006). Convivir con el Fuego. Global Fire Initiative 13093 Henry Beadel Drive Tallahassee, FL fire@tnc.org.
- Turner, M y Romme, W. (1994). Landscape dynamics in crown fire ecosystems. *Landscape Ecology*. 9. 59-77 pp.
- Ubeda, X y Sarricolea, P. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146, 152-161 pp.

- Uhl, C. and J.B. Kauffman. (1990). Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*, 71, 437-449 pp.
- Varner, J. M., Hood, S. M., Aubrey, D. P., Yedinak, K., Hiers, J. K., Jolly, W. M., Shearman, T. M., McDaniel, J. K., O'Brien, J. J., & Rowell, E. M. (2021). Tree crown injury from wildland fires: causes, measurement and ecological and physiological consequences. *New Phytologist*, 231(5); 1676–1685 pp.
- Vélez-Muñoz R. (2000). La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Madrid: McGraw-Hill, 1a ed. en español (1);1360 p.
- Villaseñor, R y Sáiz, (1990). Incendios forestales en el Parque Nacional La Campana, Sector Región Chile II. Efectos sobre el estrato arbustivo-arboreo. *Anuales Museo Histl Natural de Valparaiso* 21, 16-26 pp.
- Whelan, R. J. 1995. The ecology of fire. Cambridge University Press. New York. 360 p.