



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

**PATRONES Y CONTROLES ESPACIO-TEMPORALES DE LA INCIDENCIA DE INCENDIOS
FORESTALES EN JALISCO, MÉXICO: UNA PERSPECTIVA TOP-DOWN VS BOTTOM-UP**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

CAMILA TOLEDO JAIME

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. CARLOS DÍAZ AVALOS
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

DR. DIEGO PÉREZ SALICRUP
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

**PATRONES Y CONTROLES ESPACIO-TEMPORALES DE LA INCIDENCIA DE INCENDIOS
FORESTALES EN JALISCO, MÉXICO: UNA PERSPECTIVA TOP-DOWN VS BOTTOM-UP**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

CAMILA TOLEDO JAIME

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. CARLOS DÍAZ AVALOS
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

DR. DIEGO PÉREZ SALICRUP

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

NOVIEMBRE, 2023

COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
OFICIO CGEP/CPCB/FC/0697/2023
ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académica del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **22 de mayo de 2023** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Manejo Integral de Ecosistemas** de la estudiante **TOLEDO JAIME CAMILA** con número de cuenta **416080843** con la tesis titulada **“Patrones y controles espacio-temporales de la incidencia de incendios forestales en Jalisco, México: Una perspectiva Top-Down vs Bottom-Up”**, realizada bajo la dirección del **DR. CARLOS DÍAZ AVALOS**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: **DRA. SILVIA CASTILLO ARGÜERO**
Vocal: **DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES**
Vocal: **DRA. ANGELINA MARTÍNEZ YRIZAR**
Vocal: **DR. MIGUEL ÁNGEL CASTILLO SANTIAGO**
Secretario: **DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO**

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 12 de septiembre de 2023

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA

c. c. p. Expediente del alumno

AGNS/AAC/GEMF/EARR/ipp



AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Al Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme otorgado la oportunidad de concretar una formación académica de alta calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de estudios de posgrado otorgada bajo el CVU con número de registro 1026687.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el apoyo económico brindado mediante el proyecto IG100221.

Al Dr. Carlos Díaz Avalos por ser el director de mi tesis. Su apoyo, amabilidad y orientación fueron fundamentales para el éxito de este trabajo. Gracias por la confianza y por enriquecer mi desarrollo académico.

Al Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento y al Dr. Diego Pérez Salicrup por haber aceptado ser miembros de mi Comité Tutor. Gracias por su disposición, guía y apoyo a lo largo de todo este trabajo. Sin sus acertados comentarios, sugerencias y críticas, no habría sido posible concretar este proyecto.

AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL

A mis padres, quienes son mis más grandes maestros. Su amor y apoyo incondicional hacen que todo sea posible.

A mi hermano, quien me ha enseñado la fortaleza y fragilidad del ser.

Al Dr. Pablo Juan Verdoy y al Dr. Somnath Chaudhuri por su valiosa colaboración durante mi estancia de investigación en España. No solo fueron mentores excepcionales, sino que también me recibieron con calidez y me hicieron sentir como en casa.

A los miembros del jurado, la Dra. Angelina Martínez Yrizar, el Dr. Homero Julio Eudes Campo Alves, la Dra. Silvia Castillo Argüero, el Dr. Miguel Ángel Castillo Santiago y el Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento. Sus valiosos comentarios contribuyeron a la significativa mejora de este trabajo.

A mis amigas Rebeca, Jaqueline, Sheccid, Diana y Priscila, por ser mi sostén, mi refugio y mi reflejo. Las quiero y admiro profundamente.

A Daniel y Alejandro, por su amistad y complicidad. Gracias por llenar mis días de alegría y por estar en las buenas y en las no tan buenas.

A todas mis amigas y amigos, por acompañarme en este camino.

A Sebastián, por tu amor, comprensión y apoyo a lo largo de estos años. Aunque por ahora nuestros caminos se han separado, siempre te estaré agradecida.

A mis abuelas Rosa María y Cora,
las mujeres pilares de mi legado.

“No hay nada en el mundo, fuera de ti,
que pueda satisfacer tu profundo anhelo de ser”

Eckhart Tolle

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Ecología del paisaje	5
1.2 Comportamiento del fuego e incendios forestales.....	7
1.3 Régimen de incendios	9
1.4 Controles <i>Top-Down</i> vs <i>Bottom-Up</i>	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
3.1 Objetivo General	16
3.2 Objetivos Específicos	16
3.3 Hipótesis.....	17
4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	17
5. MÉTODOS	18
5.1 Sitio de estudio	18
5.2 Obtención y procesamiento de datos	20
5.2.1 <i>Datos de incendios</i>	20
5.2.2 <i>Cobertura de suelo y vegetación</i>	23
5.2.3 <i>Datos Bottom-Up</i>	25
5.2.4 <i>Datos Top-Down</i>	29
5.3 Análisis de datos	31
5.3.1 <i>Caracterización de incendios</i>	31
5.3.2 <i>Análisis Bottom-Up</i>	33
5.3.3 <i>Análisis Top-Down</i>	36
5.4 Modelo probabilístico	38
5.4.1 <i>Inferencia Bayesiana</i>	38
5.4.2 <i>Aproximación estadística</i>	40
5.4.3 <i>Ajuste del modelo</i>	42
6. RESULTADOS	46
6.1 Caracterización de incendios	46
6.1.1 <i>Ocurrencia y área quemada anual</i>	46
6.1.2 <i>Ocurrencia y área quemada por tipo de vegetación</i>	47

6.2	Análisis <i>Bottom-Up</i>	52
6.2.1	<i>Heterogeneidad espacial en la incidencia de incendios</i>	52
6.2.2	<i>Correlación e influencia de variables Bottom-Up por vegetación</i>	54
6.2.3	<i>Asociación entre incendios y variables Bottom-Up</i>	63
6.3	Análisis <i>Top-Down</i>	69
6.3.1	<i>Patrones climáticos</i>	69
6.3.2	<i>Variabilidad temporal del NDVI</i>	81
6.3.3	<i>Patrones de incidencia de incendios</i>	85
6.3.4	<i>Efecto de El Niño Oscilación del Sur sobre la incidencia de incendios</i> ...	89
6.4	Modelo de predicción espacial.....	90
6.4.1	<i>Validación</i>	96
6.4.2	<i>Densidad espacial del área quemada</i>	100
7.	DISCUSIÓN	107
7.1	Patrón espacio temporal de incidencia de incendios en Jalisco	107
7.2	Coberturas de suelo con mayor incidencia de incendios.....	109
7.2.1	<i>Incendios forestales</i>	109
7.2.2	<i>Quemas agropecuarias</i>	113
7.3	Heterogeneidad espacial en la incidencia de incendios	114
7.3.1	<i>Bosques de pino-encino</i>	115
7.3.2	<i>Selva subcaducifolia y caducifolia</i>	116
7.3.3	<i>Quemas agropecuarias</i>	117
7.3.4	<i>Correlación y contribución de controles Bottom-Up</i>	117
7.4	Patrones generales de regulación Bottom-Up	119
7.5	Variabilidad climática y regulación Top-Down	122
7.5.1	<i>Patrones de temperatura, precipitación y NDVI</i>	122
7.5.2	<i>Patrones de incidencia de incendios</i>	125
7.5.3	<i>Efecto de El Niño Oscilación del Sur</i>	126
7.6	Modelado espacial de área quemada por incendios forestales	129
7.6.1	<i>Covariables</i>	129
7.6.2	<i>Validación</i>	133
7.6.3	<i>Áreas críticas</i>	134
8.	CONCLUSIONES	135
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRFICAS	140
10.	ANEXO	154

RESUMEN

Durante millones de años el fuego ha jugado un papel determinante en la composición, estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas terrestres. El fuego es un proceso espacio-temporal impulsado por controles que operan a través de diversas escalas; en términos generales, estos controles pueden clasificarse como *Top-Down* y *Bottom-Up*. En las últimas décadas, factores como el cambio climático, el cambio de uso de suelo y la supresión de incendios, han alterado la frecuencia, intensidad y los patrones espaciales del fuego en diversos ecosistemas alrededor del mundo. Uno de los estados más afectados por incendios forestales en México es Jalisco, el cual representa la entidad con mayor superficie incendiada acumulada en los últimos cincuenta años. La mayoría de los estudios realizados en Jalisco se han enfocado en analizar la incidencia de incendios en Áreas Naturales Protegidas, por lo que hay poca información sobre el comportamiento del fuego a nivel estatal.

El objetivo del presente trabajo fue analizar los patrones de ocurrencia y área quemada de incendios forestales en el estado de Jalisco, así como identificar los principales mecanismos *Top-Down* y *Bottom-Up* que explicaron su variabilidad espacio-temporal. Utilizando observaciones satelitales de área quemada, se llevó a cabo una caracterización de la incidencia de incendios en la entidad, incluyendo los tipos de vegetación más afectados. Para evaluar la influencia de los controles *Bottom-Up* en la ocurrencia de incendios forestales, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) utilizando un conjunto de datos geoespaciales representando el efecto de variables locales. Para evaluar el efecto de la regulación *Top-Down*, se analizaron patrones climáticos de precipitación y temperatura a gran escala, identificando períodos de sequía y humedad asociados al tamaño y frecuencia de los incendios. Asimismo, se ajustó un modelo probabilístico con el fin de obtener información acerca de los factores con mayor influencia sobre el tamaño de los incendios, y modelar los patrones espaciales de área quemada dentro del sitio de estudio.

El promedio anual de incendios forestales fue de 193, con una media de 71,742 hectáreas quemadas al año. Los bosques de pino-encino representaron la cobertura con mayor número de incendios (45.2%), seguidos de las selvas subcaducifolias y caducifolias (20.5%). Las igniciones asociadas a tierras agrícolas, vegetación cultivada y vegetación inducida

constituyeron el 32.8% de los eventos registrados, sin embargo, solo representaron el 22.3% del área quemada total de Jalisco. Las variables que en mayor medida explicaron la variación espacial en la ocurrencia y tamaño de los incendios fueron la temperatura, el NDVI y los factores asociados a actividades antrópicas. La regulación *Top-Down* generó patrones sincrónicos de incidencia de incendios a lo largo del estado de Jalisco, y durante años con sequía extrema, estos controles crearon condiciones meteorológicas y del combustible que suprimieron o intensificaron el efecto de la regulación *Bottom-Up*. Las áreas críticas del sitio de estudio identificadas por el modelo se ubicaron sobre todo en las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Occidental; la alta concentración de superficie incendiada en estas zonas sugirió que un gran porcentaje de las igniciones fueron ocasionadas por actividades antropogénicas. Los hallazgos del presente estudio proporcionan información valiosa para comprender cuáles son los principales impulsores de incendios forestales en el estado de Jalisco, y contribuyen al desarrollo de estrategias efectivas de manejo del fuego en la región.

ABSTRACT

Fire plays a crucial role in shaping terrestrial ecosystems' composition, structure, functioning, and dynamics. Fire is also a spatio-temporal process driven by controls operating at different scales, commonly categorized as Top-Down and Bottom-Up. In recent decades, factors such as climate change, land-use change, and fire suppression have significantly altered the frequency, intensity, and spatial patterns of fire in ecosystems worldwide. Among the states in Mexico, Jalisco has experienced a high incidence of wildfires, resulting in the largest accumulated burned area over the past fifty years. While most studies in Jalisco have focused on fire occurrence in natural reserves, limited information is available regarding fire behavior at a regional level.

This study aimed to analyze the spatio-temporal patterns of fire occurrence and burned areas in the state of Jalisco while identifying the primary Top-Down and Bottom-Up mechanisms driving these patterns. Utilizing satellite-based burned area observations, we characterized fire incidence, focusing on the most affected vegetation types in Jalisco. To assess the influence of Bottom-Up controls on wildfire occurrence, we conducted a Principal Component Analysis (PCA) using geospatial datasets representing local variables. Furthermore, we examined large-scale precipitation and temperature patterns to evaluate the Top-Down regulation, identifying periods of drought and humidity associated with the size and frequency of wildfires. Additionally, a probabilistic model was developed to determine the factors with the greatest impact on fire size and to model the spatial distribution of burned areas within the study site.

The annual average of forest fires was 193, with a mean of 71,742 hectares burned per year. Pine-oak forests accounted for the highest number of fires (45.2% of the total), followed by sub-deciduous and deciduous forests (20.5%). Ignitions associated with agricultural lands and induced vegetation constituted 32.8% of the recorded events, however, they only accounted for 22.3% of the total burned area. The variables that predominantly influenced the spatial variation in fire size and occurrence were temperature, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), and factors related to human activities. Top-Down regulation led to synchronized patterns of fire incidence throughout the state of Jalisco. During years of extreme drought, these controls created weather and fuel conditions that either suppressed or

intensified the effect of Bottom-Up regulation. The critical areas identified by the probabilistic model were primarily located in the physiographic provinces of the Sierra Madre del Sur and the Sierra Madre Occidental. The concentration of burned surfaces in these areas suggested that a significant percentage of the ignitions were caused by anthropogenic activities. The findings of this study provide valuable insights into the main drivers of forest fires in the state of Jalisco and contribute to the development of effective fire management strategies in the region.

1. INTRODUCCIÓN

El fuego es un fenómeno natural presente en la Tierra desde hace millones de años (Bowman *et al.* 2009) que a lo largo del tiempo ha aumentado y disminuido en su ocurrencia debido a cambios en el clima, la vegetación, el relieve de la tierra y más recientemente a la influencia antropogénica. El fuego también ha jugado un papel determinante en la composición, estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas terrestres (Jardel *et al.* 2014), actuando como una de las principales fuerzas de selección natural, incidiendo en la evolución de diversas especies y promoviendo la diversidad biológica de algunos ecosistemas (Jardel *et al.* 2014).

Más allá de su importancia ecológica y evolutiva, el fuego también posee un significado cultural y social. Desde hace miles de años, el fuego ha sido utilizado como herramienta en la cacería, el manejo de recursos naturales, la gestión del paisaje y para promover o limitar el crecimiento de ciertas especies de plantas (Pyne 1996; Scott *et al.* 2014). En las últimas décadas, el fuego se ha utilizado para el desmonte de vegetación forestal y cultivo agrícola, en la inducción de pastizales, el manejo de agostaderos para la ganadería, en los tratamientos del renuevo en la silvicultura y como control en la acumulación de combustibles con el fin de reducir el peligro de incendios (Pyne *et al.* 1996; Jardel *et al.* 2014).

El vínculo entre las aplicaciones históricas y contemporáneas del fuego y su interacción con patrones espaciales y disturbios se explora a través de la lente de la ecología del paisaje, donde se examina cómo los patrones espaciales influyen en procesos ecológicos, y cómo los disturbios, incluido el fuego, moldean la configuración del paisaje a lo largo del tiempo. A través de este enfoque, se desvelan las complejas interrelaciones que definen la dinámica del fuego en los ecosistemas y se establece el terreno para analizar aspectos más concretos, como el comportamiento del fuego, el régimen de incendios y los controles que operan a diversas escalas espacio-temporales.

1.1 Ecología del paisaje

La ecología del paisaje es una disciplina que se enfoca en estudiar la interacción que existe entre diversos patrones espaciales y procesos ecológicos (Turner 1989; Turner *et al.* 2005), y enfatiza las causas y consecuencias de la heterogeneidad espacial del paisaje a lo largo de

distintas escalas (Turner *et al.* 2015). Asimismo, esta disciplina considera el papel de los disturbios en la configuración y estructura de los patrones y procesos presentes en el paisaje.

Un disturbio puede definirse como cualquier evento relativamente discreto que perturba la estructura de un ecosistema, comunidad o población, y que altera la disponibilidad de recursos en el ambiente físico (White & Pickett 1985). Los disturbios son una parte integral de los sistemas ecológicos y afectan el paisaje a través de diversas escalas (Turner *et al.* 2005), incluso ciertos sistemas ecológicos requieren la presencia de disturbios para el mantenimiento de su estructura y funcionamiento (White 1979). Además de ser agentes naturales de cambio en comunidades ecológicas, los disturbios son impulsores clave de heterogeneidad espacial y temporal, debido a que alteran el estado y la dinámica del sistema (Turner *et al.* 2015). En ecología del paisaje, los disturbios son objetos ideales de estudio debido a que reflejan la interacción proceso-patrón: no sólo responden a patrones en el paisaje, también los crean (Turner 2010). Por lo tanto, un disturbio tiene la capacidad de transformar el paisaje de forma abrupta, y grandes y severos disturbios pueden llegar a ser una fuerza dominante en la estructura del paisaje (Romme *et al.* 1998).

El fuego es considerado como uno de los principales disturbios que moldean al paisaje y que forman parte integral de la relación recíproca proceso-patrón que ocurre en los ecosistemas (Parisien *et al.* 2011). Al interactuar con el paisaje, el fuego se convierte en un complejo proceso espacio-temporal que es tanto impulsado como regulado por factores bióticos y abióticos (Johnson 1992). La propagación y comportamiento del fuego dependen de distintos atributos del paisaje, como la distribución, tipo y condición de la vegetación (McKenzie *et al.* 2011); la distribución espacio-temporal de la biomasa es de particular importancia debido a que influye directamente en la propagación del fuego: si la biomasa es escasa o muy húmeda, las condiciones para que se lleve a cabo el proceso de combustión no serán favorables. Por lo tanto, el fuego es un disturbio que depende explícitamente de su interacción con el paisaje (Peterson 2002).

Al mismo tiempo, la influencia del fuego sobre la formación y estructura del paisaje ha tenido el alcance suficiente como para haber ejercido una fuerza evolutiva en múltiples ecosistemas alrededor del mundo (Bond & Midgley 1995; McKenzie *et al.* 2011). Asimismo, el fuego es un importante impulsor de heterogeneidad espacial en el paisaje dado que crea mosaicos de

vegetación con distintos niveles de perturbación, los cuales varían en sus características físicas y biológicas, por ejemplo, la humedad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la composición y estructura de la vegetación, así como el estado sucesional de la misma.

El fuego también tiene la propiedad de actuar como un mecanismo de retroalimentación positiva, al crear condiciones en el paisaje que promueven su propia ocurrencia y perpetuación (McKenzie *et al.* 2011); por ejemplo, la presencia del fuego puede favorecer el crecimiento de ciertas especies de plantas adaptadas o propensas a incendiarse, favoreciendo a su vez la continua aparición y propagación del fuego. De manera similar, la incidencia del fuego tiene el potencial de crear condiciones que promuevan el establecimiento de especies invasoras, las cuales pueden colonizar de forma más rápida y eficiente áreas quemadas que plantas nativas, perpetuando el ciclo de incendios frecuentes (Brooks *et al.* 2004).

Por otro lado, el fuego puede ser considerado como un proceso autorregulatorio que crea condiciones que limitan su propia ocurrencia y severidad (McKenzie *et al.* 2011); por ejemplo, cuando hay incendios frecuentes, se reduce la cantidad de biomasa necesaria para el proceso de combustión, y se vuelve menos probable que los eventos sean catastróficos. Adicionalmente, al incendiar la vegetación y consumir la biomasa disponible a su paso, el fuego crea barreras que impiden la propagación de futuros incendios (Turner *et al.* 2015).

1.2 Comportamiento del fuego e incendios forestales

El fuego es un fenómeno físico-químico que requiere de tres componentes para su ignición, que en su conjunto constituyen el *triángulo del fuego* (Pyne *et al.* 1996): el combustible, que se refiere a cualquier material que se pueda quemar, tal como la biomasa presente en un bosque; el oxígeno, el cual actúa como comburente y que, combinado con el combustible, produce la reacción química que da origen al fuego; y finalmente la aportación de una fuente de calor externa, la cual provee la energía necesaria para que inicie el proceso de combustión (Balcázar 2011).

A escala del paisaje, la propagación del fuego está influenciada por la interacción de tres componentes, los cuales constituyen el *triángulo del ambiente del fuego* (Pyne *et al.* 1996): el material combustible, que se refiere a la vegetación o materia orgánica que puede incendiarse, y que varía espacialmente (tipo, cantidad, distribución vertical y horizontal) y

temporalmente (estado sucesional de la vegetación) a lo largo de un ecosistema (Balcázar 2011); el estado del tiempo, que es la variación a corto plazo de las condiciones atmosféricas en una localidad determinada; y la topografía o forma del terreno. Así, en una unidad del paisaje, el fuego está gobernado por la disponibilidad de biomasa, las propiedades del terreno que influyen en el proceso de combustión y las variables meteorológicas que afectan su ignición (McKenzie et al. 2011).

Un incendio forestal consiste en la propagación libre y sin control del fuego en terrenos forestales o silvestres, esto es, en áreas cubiertas por bosques, selvas, matorrales, pastizales naturales y otras formaciones vegetales (Pyne *et al.* 1996, Jardel *et al.* 2014). Los incendios forestales pueden clasificarse en función de su comportamiento, lo que ayuda a predecir su propagación y daño potencial: 1) incendios subterráneos, que ocurren bajo el suelo mineral, comúnmente en áreas con alto contenido de materia orgánica y sin producir llamas, 2) incendios superficiales, que consumen el mantillo del suelo (hojarasca y material leñoso caído) y la vegetación baja (herbácea y arbustiva) y 3) incendios de copa, que se propagan por el dosel de los árboles y potencialmente tienen los efectos más severos (Balcázar 2011; Jardel *et al.* 2011)

La acumulación de biomasa combustible en los ecosistemas terrestres es resultado de los procesos de productividad primaria y descomposición (Jardel *et al.* 2014), ambos determinados por la influencia de una variedad de factores como el clima, la humedad, el tipo de suelo, la disponibilidad de nutrientes y la presencia de disturbios. En ecosistemas con altas tasas de productividad primaria, la gran acumulación de biomasa se traduce a una mayor cantidad de combustible potencial, es decir, la cantidad total de material combustible existente en un área, independientemente de su condición (Jardel *et al.* 2014); no obstante, la propagación de incendios forestales no está en función del combustible potencial presente en un ecosistema, sino del combustible disponible, que es la fracción del combustible total que se encuentra lo suficientemente seco como para incendiarse (Gedalof 2011; Jardel *et al.* 2014).

Debido a que el combustible es un factor determinante en el comportamiento del fuego, la caracterización, clasificación y cuantificación de los combustibles forestales es fundamental para el estudio, manejo y prevención de incendios forestales (Sandber *et al.* 2001). Un

concepto que permite describir y evaluar las propiedades del complejo de combustibles en un área, así como la caracterización de las condiciones del paisaje en las cuales se propagan los incendios forestales, es el de cama de combustibles, el cual se define como “una unidad relativamente uniforme del paisaje que representa un ambiente de combustión único y determina el comportamiento potencial del fuego y sus efectos” (Ottmar et al. 2007; Riccardi et al. 2007; Jardel *et al.* 2014).

La variabilidad en las propiedades físicas de las camas de combustibles, y en la composición y estructura de la vegetación, da lugar a la existencia de ecosistemas propensos o reluctantes a incendios (Jardel *et al.* 2014). Los ecosistemas propensos a incendiarse son aquellos que tienen una alta probabilidad de incidencia del fuego debido a las características de la vegetación, pero sobre todo a que presentan altas tasas de acumulación de biomasa (combustible potencial), combinado con una estación seca lo suficientemente larga para que haya combustible disponible (Gedalof 2011, Jardel *et al.* 2011). Algunos ejemplos de ecosistemas propensos a incendiarse incluyen pastizales y bosques de pinos o encinos; estos ecosistemas han desarrollado adaptaciones a lo largo del tiempo para sobrevivir y evolucionar junto con el fuego como parte de su dinámica natural. En contraste, la humedad persistente o la baja acumulación de biomasa de los ecosistemas reluctantes a incendios limitan la propagación del fuego; por ejemplo, en coberturas forestales con climas lluviosos (como las selvas altas perennifolias y los bosques mesófilos de montaña) donde las condiciones de humedad permanecen todo el año, la ocurrencia de incendios se ve limitada por la falta de combustible disponible, mientras que en ecosistemas con climas áridos o semiáridos (como los matorrales xerófilos), la poca productividad primaria limita la acumulación de biomasa y por lo tanto la propagación del fuego (Gedalof 2011; Jardel *et al.* 2011; Jardel *et al.* 2014). Es importante considerar que la propensión de los ecosistemas a incendiarse se encuentra dentro de un espectro, siendo algunos más susceptibles al fuego que otros.

1.3 Régimen de incendios

Un régimen de incendios se refiere a “la amplitud de la variación natural o histórica en la frecuencia, estacionalidad, intensidad, severidad y patrón espacial de los eventos de incendios, y su sinergia con otros agentes de perturbación naturales o antropogénicos, característico de una unidad del paisaje y determinado por la influencia de las condiciones

de clima, geomorfología y vegetación complejo de combustibles” (White & Pickett 1985; Agee 1993; Jardel *et al.* 2011). El régimen de incendios es un componente esencial en la dinámica de muchos ecosistemas, y distintos tipos de ecosistemas poseen regímenes de incendios característicos, relacionados con el tipo de vegetación y las condiciones del paisaje (Heyerdahl *et al.* 2001; Jardel *et al.* 2011). El estudio de los regímenes de incendios es útil para comparar el papel que cumple el fuego en distintos ecosistemas, así como para describir su nivel de desviación con respecto a valores históricos.

Algunas de las principales variables que caracterizan a los regímenes de incendios se describen a continuación (White & Pickett, 1985; Agee 1993; Falk *et al.* 2007; Jardel *et al.* 2011, 2014):

- *Frecuencia*: número de incendios por unidad de tiempo en un área determinada
- *Intervalo de retorno*: tiempo (años) entre incendios sucesivos en un área determinada; inverso de la frecuencia
- *Estacionalidad*: Temporada del año en la cual se presentan las condiciones meteorológicas favorables (baja humedad) para la propagación del fuego; época del año en la que ocurren los incendios forestales
- *Intensidad*: Cantidad de calor liberado por el fuego por unidad de tiempo o fuerza física del incendio. El tipo de incendio (superficial, de copa o subterráneo) puede servir como un indicador aproximado de la intensidad.
- *Severidad*: Efecto del incendio sobre un ecosistema en particular. La severidad de un incendio varía en relación con la duración de los intervalos de retorno del fuego, su intensidad y con la respuesta y resiliencia de la vegetación.

En algunos ecosistemas, tal como los bosques de pino, los pastizales y algunos bosques de encino, el fuego forma parte de la dinámica del ecosistema y la mayoría de las especies están adaptadas, y en algunos casos dependen, de la ocurrencia de incendios, por lo que los intervalos de retorno son de pocos años (Jardel *et al.* 2014); estas comunidades vegetales se caracterizan por tener un régimen potencial (la probable amplitud de la variación en los atributos del régimen) de incendios superficiales ligeros a intensos, frecuentes y de baja severidad (Jardel *et al.* 2011). En otros ecosistemas donde el fuego está limitado por la humedad (como las selvas altas perennifolias o los humedales) o por la falta de combustible

(como las selvas bajas caducifolias y el matorral xerófilo), los incendios son eventos ocasionales, con intervalos de retorno de hasta cientos de años (Jardel *et al.* 2014); el régimen potencial en estos tipos de vegetación suele ser de incendios superficiales ligeros, ocasionales y de severidad alta dado que la mayoría de las especies no están adaptadas a la presencia del fuego (Whelan 1995; Jardel *et al.* 2011).

1.4 Controles *Top-Down* vs *Bottom-Up*

El fuego es un proceso espacio-temporal impulsado por controles que operan a través de diversas escalas (Falk *et al.* 2011). En términos generales, estos controles pueden clasificarse como *Top-Down* (de arriba hacia abajo) y *Bottom-Up* (de abajo hacia arriba) (Lertzman & Fall 1998). A escala local, el comportamiento del fuego está influenciado por las condiciones locales del combustible, el tiempo atmosférico, la topografía y las fuentes de ignición; la variación en estos controles (*Bottom-Up*) conduce a la variación en la ignición, propagación y efecto de los incendios, así como a su legado en el paisaje (Falk *et al.* 2011). Por otro lado, aquellos procesos que operan a escalas regionales o mayores, ejercen un control *Top-Down* sobre la incidencia de incendios (Heyerdahl *et al.* 2001); el clima regional, el principal regulador *Top-Down*, puede afectar directamente el régimen de incendios al incidir en los patrones de temperatura y precipitación de gran escala, los cuales determinan el contenido de humedad del combustible y, por lo tanto, su propensión a incendiarse. El clima regional también afecta de manera indirecta a los regímenes de incendios al controlar la variabilidad espacial de la vegetación, que a su vez influye en el tamaño, cantidad y arreglo del combustible (Heyerdahl *et al.* 2001).

Uno de los principales impulsores de la regulación *Bottom-Up* es la variabilidad espacio-temporal del combustible en el paisaje. Factores como la topografía influyen indirectamente en la distribución local de la vegetación y, por lo tanto, en el tipo, arreglo, humedad y conectividad de los combustibles forestales (Gill & Taylor 2009; Falk *et al.* 2011). Por ejemplo, la pendiente y orientación de ladera afectan significativamente el nivel de exposición a la luz solar, lo que a su vez ejerce un fuerte control sobre los tipos de vegetación dominante en un área, así como sobre la cantidad y humedad del combustible (Heyerdahl *et al.* 2001; Falk *et al.* 2011). El tipo y humedad del combustible también se ven influenciados por la elevación: en general, a medida que incrementa la elevación, la temperatura disminuye

y aumenta el contenido de humedad de la vegetación (Falk *et al.* 2011); asimismo, la estructura y composición de la vegetación varía con la elevación. Por otro lado, las propiedades físicas del relieve tienen un efecto directo sobre el comportamiento de eventos individuales: los incendios tienden a ser más intensos y a propagarse más rápidamente en pendientes pronunciadas que en pendientes suaves (Rothermel 1983), elevaciones altas suelen presentar vientos más fuertes y la complejidad del terreno puede actuar como barrera para la dispersión del fuego (Heyerdahl *et al.* 2001). Otras variables locales como el tiempo atmosférico también influyen en el comportamiento individual del fuego al afectar directamente el contenido de humedad en el combustible; por su parte, ciertas actividades humanas modifican la composición y estructura de la vegetación, y así, la configuración espacio-temporal del combustible, además de que actúan como una de las principales fuentes de ignición en diversos ecosistemas.

Los controles *Bottom-Up* son intrínsecamente heterogéneos en el espacio, por lo que su distribución espacial determinará en gran medida los patrones espaciales de incendios en el paisaje (Turner 2005). Dado que estos mecanismos tienden a modificar la física y la propagación del fuego a escalas finas, se caracterizan por crear mosaicos o parches de vegetación heterogéneos, tal que la heterogeneidad espacial en la ocurrencia, tamaño, intensidad o severidad de los incendios en áreas con características similares es un rasgo distintivo de la regulación *Bottom-Up* (Heyerdahl *et al.* 2001; Falk *et al.* 2011). En contraste, la variación climática interanual (o mayor) tiende a tener el efecto contrario, al sincronizar la ocurrencia de incendios a escalas regionales a subcontinentales (Falk *et al.* 2011). Por ejemplo, variaciones en la temperatura y precipitación asociadas a sequías regionales o periodos húmedos regulan la producción y flamabilidad del combustible, promoviendo o limitando la aparición del fuego a gran escala; algunos fenómenos climáticos como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), procesos acoplados entre el océano y la atmósfera (Nigam *et al.* 1999), modifican la temperatura superficial del océano y los patrones climáticos globales, lo que a su vez influye en la incidencia de incendios en muchas regiones del mundo. De forma que, a diferencia de los patrones irregulares del paisaje creados por los controles *Bottom-Up*, el rasgo distintivo de la regulación *Top-Down* es la ocurrencia sincrónica (o interrumpida) de incendios entre zonas más allá del alcance de un solo evento (Gill & Taylor 2009, Falk *et al.* 2011).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fuego es un disturbio natural que ha moldeado a los ecosistemas terrestres de todo el mundo durante millones de años. Sin embargo, en las últimas décadas, las actividades humanas, como el cambio de uso de suelo y la supresión de incendios, han alterado la frecuencia, intensidad y los patrones espaciales del fuego en muchos ecosistemas. Al tratarse de un elemento de transformación del paisaje, el fuego tiene el potencial de ser destructivo; cuando se alteran sus regímenes, los incendios forestales contribuyen significativamente a la pérdida y degradación de bosques, biodiversidad y funcionamiento ecosistémico, además de presentar un riesgo para asentamientos y vidas humanas (Zhang & Biswas 2017).

Actualmente, la alteración de los regímenes históricos de incendios tiene su origen en factores antrópicos como la transformación del paisaje, las malas prácticas de uso y manejo del fuego y el cambio ambiental global (Jardel *et al.* 2014). Las tendencias observadas a nivel global sugieren que los regímenes de incendios se verán alterados por el cambio climático, con varios estudios pronosticando un incremento de las áreas susceptibles a incendios, una mayor intensidad y severidad de los eventos, y un aumento en la ocurrencia de incendios en áreas que ya son propensas al fuego (Hurteau *et al.* 2014; Rocca *et al.* 2014; Riley *et al.* 2016; Le Page *et al.* 2017; Gutiérrez 2021).

La supresión del fuego en ecosistemas terrestres que históricamente han estado sujetos a regímenes de incendios frecuentes de baja severidad (tal como los bosques de pino y encino) también ha sido perjudicial, al provocar modificaciones en la estructura y composición de la vegetación, así como una acumulación excesiva de material combustible (Jardel *et al.* 2014); combinado con el aumento en las temperaturas y la prolongación de las sequías asociadas al cambio climático, estos ecosistemas se han vuelto más susceptibles a la presencia de *mega incendios*, los cuales pueden afectar grandes extensiones de cobertura forestal en un solo evento y generar efectos negativos (Neger *et al.* 2022). Estos incendios de mayor intensidad y severidad pueden resultar en una alta mortalidad de árboles y perturbar los patrones de regeneración, ocasionando alteraciones en la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas (Rodríguez *et al.* 2003)

México es un país con alta incidencia de incendios forestales; entre 2015 y 2021 el promedio anual de hectáreas incendiadas fue de 493, 888 (CONAFOR 2022). De acuerdo a la misma dependencia, el 99% de los incendios forestales en el país son ocasionados por actividades humanas, siendo las principales causas las actividades agropecuarias, los incendios accidentales (fogatas, colillas de cigarro) o intencionales y las actividades ilícitas como el cambio de uso de suelo y el cultivo de sustancias ilegales (CONAFOR 2022). Entre los estados mexicanos más afectados por incendios forestales destaca Jalisco, que se posiciona como la entidad con la mayor superficie incendiada acumulada en las últimas cinco décadas, con 1,371,239 hectáreas forestales incendiadas (CONAFOR 2022), cifra que representa un 17.5% del total de la extensión territorial del estado. La alta cobertura forestal en Jalisco, particularmente de bosques compuestos por pinos y encinos, que son altamente inflamables, en conjunto con las condiciones del clima y el relieve, incrementan la susceptibilidad del estado a incendiarse; adicionalmente, factores humanos como la producción agropecuaria a gran escala, la urbanización, las prácticas agrícolas que involucran el uso del fuego y la presencia del crimen organizado aumentan la probabilidad de ocurrencia de incendios (SEMADET 2018).

A pesar de los esfuerzos realizados para mitigar los impactos negativos de los incendios forestales (p. ej. la alteración en los regímenes de incendios, cambios en la estructura de la vegetación, aumento de la erosión del suelo, emisión de gases de efecto invernadero), éstos continúan representando una amenaza significativa tanto para los ecosistemas como para las comunidades humanas, especialmente en un contexto de cambio global. Lo anterior ha acentuado la necesidad de profundizar y afinar nuestra comprensión del papel ecológico del fuego en los ecosistemas, así como de sus implicaciones para la seguridad y el bienestar de las poblaciones humanas.

Los regímenes de incendios son una base fundamental para comprender y describir los efectos del cambio climático y la influencia humana sobre los patrones de incendios, ya que proveen un punto de referencia contra el cual comparar variaciones históricas del comportamiento del fuego. Como se mencionó anteriormente, los regímenes de incendios están controlados por procesos que operan a través de diversas escalas espacio-temporales (Gill y Taylor 2009); por lo tanto, para entender su variación es necesario conocer cuáles son

estos controles, cómo varían a lo largo del tiempo y el espacio y cuál es su efecto en distintos ecosistemas. Comprender la importancia relativa de estos controles también puede ser útil para predecir el comportamiento de los regímenes de incendios ante escenarios climáticos futuros y desarrollar estrategias efectivas para el manejo del fuego.

Aunque hoy en día existen muchas herramientas para el estudio y monitoreo de los incendios forestales, las técnicas de percepción remota ofrecen ventajas considerables (Balcázar 2011). Por ejemplo, la alta resolución espacio-temporal de los datos, los cuales se obtienen de manera periódica y con una cobertura global; el monitoreo rápido y continuo de áreas extensas, incluyendo regiones remotas que de otro modo serían poco accesibles; información en tiempo real sobre la ubicación y tamaño de los incendios forestales, fundamental para la prevención y combate del fuego; y la disponibilidad y accesibilidad de una amplia gama de sensores de detección de incendios, como MODIS, VIIRS y Sentinel (Szpakowski 2019). Asimismo, la percepción remota puede proporcionar información sobre las condiciones del paisaje antes y después de los incendios, incluyendo la cobertura de vegetación, los cambios de uso de suelo y los patrones espaciales de área quemada, así como para el monitoreo de cambios a través de grandes extensiones geográficas y escalas espacio-temporales. Los datos obtenidos a partir de sensores remotos también pueden ser utilizados para el desarrollo de modelos predictivos de ocurrencia y comportamiento de incendios forestales.

Debido a la complejidad de los procesos ecológicos, el desarrollo de métodos de análisis cuantitativos es cada vez más relevante (Miller & Ager 2013); tal es el caso de la estadística espacial y la modelación estadística espacial. La rareza y naturaleza estocástica de incendios individuales puede ser abordada a partir de un marco probabilístico formalizado (Vilar *et al.* 2010; Woolford *et al.* 2014; Serra *et al.* 2014a; Pimont *et al.* 2020): al asociar a los incendios forestales con sus coordenadas espaciales, junto con otras variables como su tamaño o causa, y con información acerca del momento en el que ocurrieron, es posible identificarlos como un proceso estocástico espacio-temporal (Serra *et al.* 2014b). Tales procesos, conocidos como procesos puntuales espaciales, son modelos estocásticos complejos que pueden ser utilizados para: 1) encontrar tendencias en el patrón espacial de los incendios e identificar zonas de mayor riesgo; 2) determinar la relación entre los diferentes atributos de los incendios, tal como su tamaño, ubicación geográfica, causa o año de ocurrencia; 3) establecer

qué factores están relacionados con la distribución espacial de incidencia y superficie quemada de los incendios y 4) hacer predicciones sobre su ocurrencia y extensión (Serra *et al.* 2014b; Díaz *et al.* 2016)

A pesar de que se han realizado diversos estudios sobre incendios forestales en México, pocos se han enfocado en estudiar la variación de los patrones del fuego a escala regional o nacional (Neger *et al.* 2022); específicamente en el caso de Jalisco, la información acerca de la dinámica espacio-temporal de los incendios a nivel estatal es escasa. En el presente estudio se realizará un análisis espacio-temporal a partir de datos satelitales, de los incendios ocurridos en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2020, con el fin de describir los patrones generales de incidencia y área quemada en la entidad, determinar los controles que explican la variabilidad espacio-temporal de los incendios e identificar tendencias en el comportamiento del fuego, así como las zonas de mayor riesgo.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivo General

Analizar la influencia relativa de los controles *Bottom-Up* y *Top-Down* sobre los patrones espacio-temporales de incidencia de incendios en el estado de Jalisco para el periodo 2001-2020

3.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar la incidencia de incendios (número, tamaño, estacionalidad, variación interanual y cobertura de vegetación afectada) en el sitio y periodo de estudio
- b) Comparar patrones de variación espacio-temporal de incidencia de incendios a nivel local, y analizar su relación con controles que operan a escalas finas (*Bottom-Up*)
- c) Comparar patrones de variación espacio-temporal de incidencia de incendios a nivel regional, y analizar su relación con controles que operan a escalas gruesas (*Top-Down*)
- d) Construir un modelo espacial que incluya el efecto de la regulación *Bottom-Up* y *Top-Down* sobre el tamaño de los incendios y determinar la importancia relativa de cada

variable; realizar predicciones de superficie quemada para el sitio de estudio e identificar zonas de alto riesgo.

3.3 Hipótesis

- a) La regulación *Bottom-Up* ocasiona heterogeneidad espacial en la ocurrencia y tamaño de los incendios en áreas con clima similar (mismos tipos de vegetación)
- b) La regulación *Top-Down* sincroniza (o interrumpe) la incidencia de incendios a través de escalas regionales (estado de Jalisco)
- c) En algunas ocasiones, la dinámica de los incendios es impulsada principalmente por el clima, y otras por las condiciones locales (p. ej. actividades antrópicas); sin embargo, es más común que una combinación de ambos mecanismos esté presente.

4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se dio a la tarea de dar respuesta a varias preguntas. En primer lugar, se plantearon interrogantes asociadas a los patrones generales de incidencia de incendios en el sitio y periodo de estudio: ¿Cómo ha sido la incidencia de incendios (número y superficie quemada) en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2020? ¿Cuál ha sido la variación interanual en el número y tamaño de los incendios? ¿Cuál ha sido la variación estacional en el número y tamaño de los incendios? ¿Cuáles son los tipos de vegetación con mayor incidencia de incendios del estado de Jalisco?

En el segundo bloque de preguntas se investiga acerca del papel de distintos controles sobre el comportamiento de los incendios: ¿Cuál es la importancia relativa de los controles *Bottom-Up* y *Top-Down* en la ocurrencia y tamaño de los incendios? ¿Cuáles son los controles *Bottom-Up* con mayor influencia sobre la incidencia de incendios? ¿El efecto de los controles *Top-Down* y *Bottom-Up* varía dependiendo el tipo de vegetación?

Finalmente se plantearon preguntas relacionadas con la distribución espacial de los incendios: ¿El patrón espacial de área quemada por incendios forestales presenta un patrón aleatorio o agrupado? ¿Cuáles son las zonas con mayor densidad de área quemada del estado de Jalisco?

5. MÉTODOS

5.1 Sitio de estudio

El estado de Jalisco está ubicado en el occidente del país, entre las coordenadas 18°58'00" y 22°45'00" de latitud norte y 101 °28'15" y 105°43'16" de longitud oeste. Jalisco colinda al norte con Durango, Zacatecas y Aguascalientes, al este con Guanajuato y San Luis Potosí, al sur con Michoacán y Colima, y al oeste con el océano Pacífico y Nayarit. El estado cuenta con una superficie de 78,596 km², un intervalo altitudinal de 0 a 4,260 msnm y se encuentra dividido en 125 municipios (INEGI 1988).

Debido a su posición geográfica, la conformación heterogénea del relieve y la influencia de masas de agua oceánicas, el estado de Jalisco presenta un amplio gradiente climático que favorece el desarrollo de diversos tipos de vegetación (INEGI 1988). De acuerdo a la información de la Serie VI de uso de suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el estado de Jalisco podemos encontrar las siguientes coberturas vegetales: agrícola (27.6%), selva baja subcaducifolia y caducifolia (19.2%), bosque de encino (18.6%), bosque de coníferas (11.6%), vegetación inducida (6.5%), pastizal (5.7%), selva mediana subcaducifolia y caducifolia (3.6%), vegetación cultivada (2.7%), cuerpos de agua (1.9%), zona urbana (1.7%), bosque mesófilo de montaña (0.5%), matorral xerófilo (0.2%), vegetación hidrófila (0.2%) y otros tipos de vegetación (0.1%).

El clima en Jalisco presenta un patrón estacional, con lluvias de verano que comprenden de junio a septiembre, y una temporada seca y calurosa que se extiende de marzo a mayo (Arias 2008). El régimen de lluvia durante junio, julio, agosto y septiembre aporta aproximadamente el 83.9% de la lluvia anual, lo que subraya la importancia de esta temporada para los ciclos hidrológicos y los ecosistemas locales (Lino 2022). La temperatura máxima promedio anual para Jalisco es de 33.1°C, la cual se alcanza durante el mes de mayo, mientras que la temperatura mínima promedio anual es de 7°C en el mes de enero; en general, las heladas se presentan en el período de septiembre a marzo (INEGI 1990).

En el estado se localizan parte de cuatro provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico, la Mesa del Centro, la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur. La provincia del Eje Neovolcánico está constituida por una cadena de volcanes, entre los que destacan el Nevado de Colima y el Volcán de Fuego (Gobierno del Estado de Jalisco 1996). El grupo de clima

dominante en esta región es el templado con tipos semicálidos subhúmedos (INEGI 1988), con una temperatura media anual de 18°C y una precipitación promedio de 800 mm anuales (CEA 2020). Las coberturas de suelo más abundantes son el matorral, los pastizales, la selva baja subcaducifolia y caducifolia, los bosques de pino-encino y los bosques de encino; los valles presentes en esta provincia le confieren una alta potencialidad agrícola, por lo que la agricultura, tanto de riego como de temporal, abarca grandes extensiones (INEGI 1990).

La provincia de la Mesa del Centro se localiza en el noreste de la entidad y la caracterizan las mesas bajas, valles y planicies aluviales con suelos aptos para la ganadería y el cultivo (Gobierno del Estado de Jalisco 1996). Predomina el grupo de climas secos con tipos semisecos, semicálidos y semisecos templados (INEGI 1988); la temperatura media anual es de 18.5°C y la precipitación promedio es de alrededor de 600 mm al año (CEA 2020). Los pastizales, matorrales y bosques de encino, así como la agricultura de temporal y de riego, son las coberturas más comúnmente encontradas en esta provincia (INEGI 1990).

En la provincia de la Sierra Madre Occidental la vegetación está compuesta por matorral, bosque de encino, bosque de pino-encino y selva baja; además existen áreas dedicadas a la agricultura de temporal (INEGI 1990). Su morfología es variable, con mesetas altas, valles y cañones (Gobierno del Estado de Jalisco 1996). Los grupos de climas dominantes son el templado con tipos semicálidos subhúmedos y el grupo de climas secos con tipos semisecos semicálido (INEGI 1988), con una temperatura media anual de 20.5 °C y una precipitación promedio de 700 mm anuales (CEA 2020).

Finalmente, la provincia de la Sierra Madre del Sur, que limita al oeste con el Océano Pacífico, se caracteriza por la existencia de cuencas con depresiones y variaciones complejas; contiene las sierras de Cacoma y Manantlán (Gobierno del Estado de Jalisco 1996). En esta provincia predomina el grupo de climas cálidos con tipo cálido subhúmedo a lo largo de la zona costera, y el grupo de clima templado con tipo semicálido subhúmedo con en el extremo sur (INEGI 1988). Las selvas bajas y medianas subcaducifolias y caducifolias, los bosques de encino, los bosques de pino-encino y la agricultura de riego, son los tipos de vegetación más representativos de la región (INEGI 1990). La precipitación promedio para la región es de 1,300 mm anuales, con temperaturas medias de 25°C (CEA 2020).

Jalisco es la tercera entidad federativa con mayor número de habitantes del país, con 8,348,151 habitantes en 2020 (INEGI 2020). De acuerdo al Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2020), el 88% de la población habita en localidades urbanas, y el 12% en localidades rurales; alrededor del 50% de los habitantes residen en las ciudades de Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque y Tlajomulco. En 2020, Jalisco representó el 7.3% del PIB nacional, convirtiéndolo en la cuarta entidad federativa con mayor contribución a la economía nacional (IIEG 2021). Con respecto a la producción agropecuaria, Jalisco se posiciona entre los primeros lugares como productor de huevo, leche y carnes de bovino, porcino y ave; de acuerdo con cifras oficiales del gobierno federal publicadas en el reporte de Expectativas Agroalimentarias 2022, la producción agropecuaria y pesquera del estado mantiene el liderazgo nacional, con 41.2 millones de toneladas producidas en el 2021 (SIAP 2022).

5.2 Obtención y procesamiento de datos

5.2.1 Datos de incendios

La Iniciativa de Cambio Climático (CCI por sus siglas en inglés) de la Agencia Espacial Europea es un programa que tiene como objetivo generar y proveer información acerca de variables esenciales del clima (ECV por sus siglas en inglés) a escala global, basadas en series temporales de datos satelitales (Pettinari 2021). Dentro del programa, los incendios son considerados como una ECV; a partir del proyecto *Fire CCI*, se ha generado una base de datos que consta de mapas globales de área quemada por pixel, a una resolución de 250 m. Estos mapas se construyen con base en imágenes satelitales adquiridas por el satélite TERRA, las cuales reúnen información de la reflectancia superficial diaria en las bandas rojo e infrarrojo del sensor MODIS (Pettinari 2021). El resultado final es un archivo GeoTIFF de área quemada por pixel, que incluye tres capas indicando 1) el día del año o día juliano en el cual el incendio fue detectado por primera vez, 2) el nivel de confianza y 3) la cobertura de suelo en el pixel detectado como quemado. El producto se publica mensualmente, abarcando al momento el periodo del 2001-2020.

y representar el área quemada en forma de polígonos. Finalmente se descargó un archivo por año para el periodo 2001-2020.

Dado que el objetivo era obtener el área quemada por evento de incendio y no por polígono, se exportaron los archivos a un Sistema de Información Geográfica y a continuación se juntaron aquellos polígonos que se presumía pertenecían a un mismo evento de incendio tomando como criterio si a) ocurrieron en un rango de máximo 2 días y b) compartían bordes. Es importante mencionar que existe un porcentaje de error al seguir este procedimiento; esto se debe a que es posible que un mismo incendio se encuentre disperso en un área y no como un continuo, lo que no significa que se trate de eventos distintos. Una vez teniendo los polígonos por incendio, se agregaron las coordenadas del centroide de cada polígono y su área a la tabla de atributos. Como resultado final, se obtuvo un archivo vectorial por año (Figura 5.2) con su respectiva tabla de atributos (Figura 5.3), con información acerca del día de detección del incendio, las coordenadas de su centroide y su superficie incendiada.

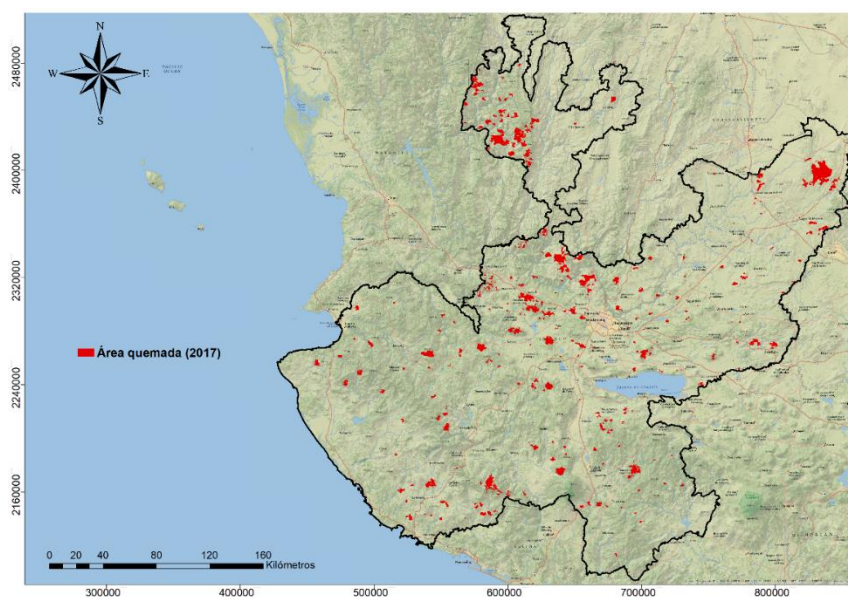


Figura 5.2. Mapa de área quemada del año 2017 en el estado de Jalisco, elaborado a partir del archivo vectorial con los polígonos por evento de incendio.

FID	Shape *	label	cent_lon	cent_lat	burn_area
0	Polygon	133	-104.223722	19.38425	8.733134
1	Polygon	153	-104.198958	19.527128	0.351371
2	Polygon	153	-104.204798	19.532294	0.292799
3	Polygon	142	-104.174255	19.555201	0.058553
4	Polygon	153	-104.141691	19.541726	0.117116

Figura 5.3. Encabezado de la tabla de atributos de un año con: el evento de incendio, el día (juliano) de su detección, las coordenadas de su centroide y el área quemada asociada.

5.2.2 Cobertura de suelo y vegetación

La obtención de los datos de cobertura de suelo y vegetación se basó en el Mapa de Cobertura del Suelo del estado de Jalisco correspondiente al año base 2016. Este mapa fue generado por la Comisión Nacional Forestal y la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (CONAFOR, SEMADET 2020), utilizando imágenes capturadas por el satélite Landsat 8 durante el año 2016. El mapa se presenta en formato vectorial y está desarrollado a una escala de 1:75,000, detallando un total de 24 categorías distintas de uso del suelo y vegetación (ver Tabla 5.1). Sin embargo, para simplificar el análisis y considerando similitudes en los tipos de combustible en cada categoría, se optó por reducir la cantidad de categorías (ver Tabla 5.2).

Los datos de cobertura de suelo y vegetación se obtuvieron a partir del Mapa de Cobertura del Suelo del estado de Jalisco correspondiente al año base 2016. Este mapa fue generado por la Comisión Nacional Forestal y la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (CONAFOR, SEMADET 2020), utilizando imágenes capturadas por el satélite Landsat 8. El mapa se encuentra en formato vectorial, a una escala de 1:75,000, y cuenta con un total de 24 clases de uso de suelo y vegetación (ver Tabla 5.1).

Dado que el enfoque del presente estudio era analizar patrones generales de incidencia de incendios en distintas coberturas de vegetación a nivel estatal, se optó por reducir el número de clases. Siguiendo la clasificación empleada en diversos estudios que han explorado la variabilidad espacio-temporal de los incendios forestales a escala nacional (Rodríguez Trejo 2008; Corona-Núñez *et al.* 2020; Montoya *et al.* 2023) y estatal (Villar-Hernández *et al.* 2022), se agruparon las clases de uso de suelo y vegetación con características similares (Tabla 5.2). Estas categorías incluyeron: bosque de pino-encino (*temperate forests*); selva

subcaducifolia y caducifolia (*tropical dry forests; tropical deciduous forest; tropical seasonal forest*); matorral y mezquital (*shrubland*); pastizal (*grassland*) y selva perennifolia y subperennifolia (*tropical wet forest; tropical rain forest*). Adicionalmente se incorporaron el humedal, representando vegetación inundada o parcialmente inundada, las tierras agropecuarias o con vegetación inducida, y las zonas urbanas o sin vegetación. Esta simplificación permitió enfocar el estudio en tendencias generales, evitando la inclusión de detalles muy específicos que impidieran identificar patrones emergentes. La reclasificación se llevó a cabo mediante un Sistema de Información Geográfica, y el resultado final se ajustó a una resolución de 250 metros por píxel, tal como se ilustra en la Figura 5.4.

Con el fin de determinar la superficie en hectáreas de cada ecosistema en el sitio de estudio, se utilizó la tabla de atributos del ráster resultante. Esta tabla contenía información acerca del número de píxeles en cada clase de cobertura de suelo y vegetación. Para convertir el número de píxeles a superficie en hectáreas, se aplicó un factor de conversión basado en la resolución del ráster y su equivalente en hectáreas ($1 \text{ píxel} = 250 \times 250 = 62,500 \text{ m}^2$; $1 \text{ m}^2 = 0.0001 \text{ ha}$). De esta manera fue posible calcular las proporciones de superficie incendiada en cada ecosistema en relación con su extensión total.

Tabla 5.1. Clases originales del Mapa de Cobertura del Suelo del estado de Jalisco al año base 2016. Las categorías de cobertura de suelo y vegetación que posteriormente fueron agrupadas se resaltan en un mismo color.

Bosque de Coníferas de Altura	Matorral Crasicaule
Bosque de Coníferas	Popal
Bosque de Encino-Galería	Tular
Mezquital y Matorral Submontano	Vegetación de Dunas Costeras
Bosque Cultivado e Inducido	Vegetación Halófila Hidrófila
Bosque Mesófilo y Selva Baja Perennifolia	Pastizales Naturales
Selva Baja y Mediana Subperennifolia	Tierras Agrícolas Cultivos Anuales
Manglar y Petén	Urbano y Construido
Selva Mediana y Alta Perennifolia	Suelo Desnudo
Selva Baja Caducifolia Subcaducifolia	Agua
Selva Mediana Caducifolia y Subcaducifolia	Pastizales Cultivados e Inducidos
Mezquital Xerófilo y Vegetación Galería	Tierras Agrícolas Cultivos Perennes

Tabla 5.2. Clases de cobertura de suelo y vegetación resultantes de la reclasificación de las categorías originales. Se resaltan en colores diferentes las nuevas clases creadas mediante la agrupación de categorías similares.

Bosque de pino - encino	Humedal	Tierras agrícolas/vegetación cultivada
Selva subcaducifolia/caducifolia	Matorral/Mezquital	Zonas urbanas/sin vegetación
Selva subperennifolia/perennifolia	Pastizal	Cuerpos de agua

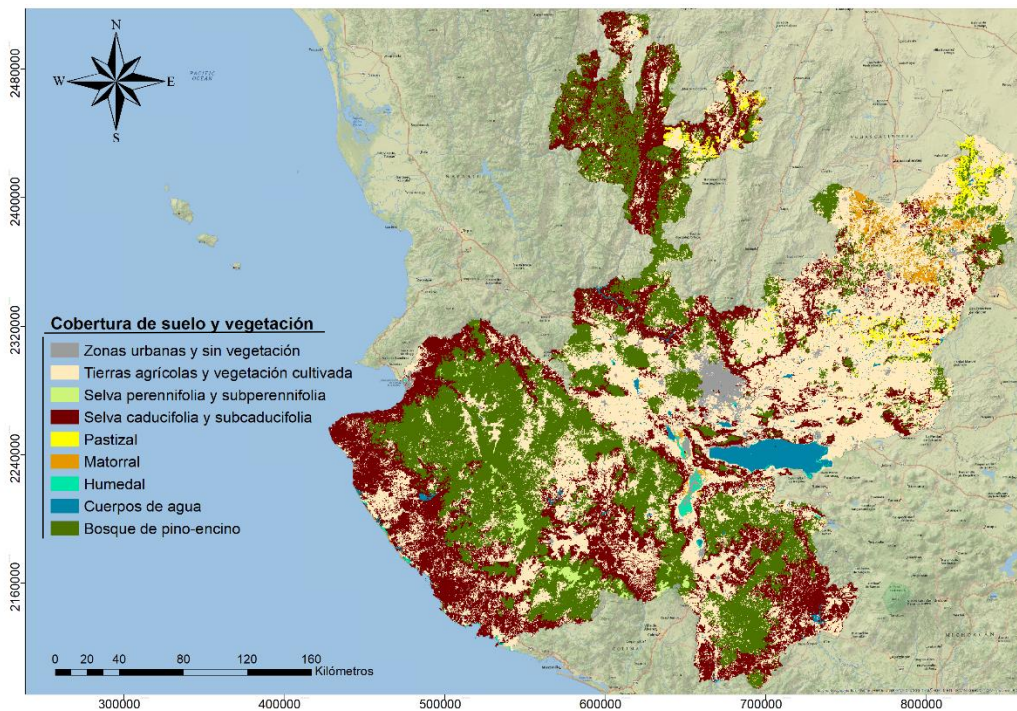


Figura 5.4. Mapa final de cobertura de suelo y vegetación. Fuente: Elaboración propia, derivado de *Mapa de Cobertura del Suelo del estado de Jalisco al año base 2016*

5.2.3 Datos Bottom-Up

La Tabla 5.3 muestra las variables seleccionadas como controles *Bottom-Up* en el análisis, así como su efecto sobre el comportamiento del fuego a escalas locales. Estas variables se relacionan principalmente con las condiciones locales del combustible, como su tipo, arreglo, humedad y conectividad. Asimismo, se consideran las posibles fuentes de ignición asociadas a la presencia humana.

Las bases de datos de precipitación, temperatura y NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés) se descargaron desde la plataforma Google Earth Engine en formato ráster (Tabla 5.4). Los ráster de precipitación provienen de un conjunto de datos pluviales globales de más de 30 años, generados a partir de imágenes satelitales diarias de resolución de 0.05° (~ 5 km) y datos de estaciones in situ (Funk 2005). De manera similar, los ráster de temperatura se derivan de imágenes del satélite TERRA, en función de la emisividad de la superficie terrestre diaria por pixel detectada por el sensor MODIS, a una resolución de 1 km (Wan 2015). Finalmente, los ráster de NDVI son obtenidos por medio del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA; las imágenes son capturadas cada 16 días, a una resolución de 250 m y se basan en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Verdín 2003). Con el objetivo de resumir la información generada diariamente en el caso de la temperatura y precipitación, y cada 16 días en el caso del NDVI, se calculó el promedio mensual por pixel, de tal forma que se obtuvieron 12 ráster de cada variable por año, para el periodo 2001-2020.

Tabla 5.3. Controles *Bottom-Up*, tipo de variable y breve descripción del efecto local que ejercen sobre la incidencia de incendios

Control	Tipo	Efecto
Elevación	Topográfica	Tipo, continuidad y humedad del combustible
Pendiente	Topográfica	Tipo, continuidad y humedad del combustible
Orientación de ladera	Topográfica	Tipo, continuidad y humedad del combustible
Precipitación	Meteorológica	Humedad del combustible
Temperatura	Meteorológica	Humedad del combustible
NDVI	Combustible	Vigorosidad y humedad del combustible
Distancia a carreteras	Fuente de ignición	Incendios asociados a actividad humana
Distancia a campos agrícolas	Fuente de ignición	Incendios asociados a actividad humana

A pesar de que la precipitación y la temperatura son variables dinámicas en el tiempo, y están relacionadas a procesos climáticos de mayor escala, se consideraron como controles *Bottom-Up* puesto que representan las condiciones meteorológicas de cada pixel al momento del incendio, afectando directa y localmente la humedad del combustible. Por su parte, el NDVI

es un índice ampliamente utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Su rango de variación va desde -1 hasta 1 y, a grandes rasgos, cuantifica la densidad y el verdor de la vegetación: valores negativos o cercanos a cero suelen estar relacionados con áreas sin vegetación, como cuerpos de agua o suelos desnudos, mientras que valores positivos indican distintos grados de salud y verdor de la vegetación (Verdín 2003).

En el contexto de los incendios forestales, el NDVI puede ofrecer información acerca del estado de la vegetación y, por ende, del combustible presente en un área. En regiones con vegetación densa y vigorosa, el NDVI tiende a ser alto, lo que sigue una mayor acumulación de biomasa y, por lo tanto, de combustible potencial. Por otro lado, valores bajos de NDVI pueden indicar sequías y estrés hídrico en la vegetación, especialmente en ecosistemas con una marcada estacionalidad en los periodos de lluvia y sequía a lo largo del año. Estas condiciones de sequía pueden propiciar la transformación del combustible potencial a combustible disponible, incrementando la susceptibilidad a la ignición y propagación de incendios.

Tabla 5.4. Variables *Bottom-Up* obtenidas a partir de bases de datos existentes

Variable	Periodo	Escala/Resolución	Formato	Fuente
Elevación	2012	15 m	Ráster	Continuo de Elevaciones Mexicano INEGI
NDVI	2001-2020	250 m	Ráster	MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m
Temperatura	2001-2020	1 km	Ráster	MOD11A1.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1 km
Precipitación	2001-2020	5 km	Ráster	CHIRPS Daily: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
Red de carreteras y caminos urbanos	2011	1:50,000	Vectorial (líneas)	Conjunto de datos vectoriales de Carreteras y Vialidades Urbanas. Edición 1.0, Jalisco

En cuanto a la topografía, se utilizó un Sistema de Información Geográfica para derivar los ráster de pendiente y orientación de ladera a partir del ráster de elevación. Para facilitar el manejo de estas últimas dos capas, se transformaron a variables categóricas, como se muestra en la Tabla 5.5 y 5.6. Capturar la variación local de los distintos elementos topográficos era relevante debido a que la topografía influye indirectamente en la distribución de la vegetación y, por lo tanto, en el tipo arreglo y continuidad del combustible. Además, la elevación, pendiente y orientación de ladera afectan tanto el contenido de humedad del combustible (al incidir en el microclima de un área) como la propagación de las llamas a través del terreno.

Tabla 5.5. Clases del ráster de pendiente

Valor	Clase	Descripción
1	Menor a 10°	Suave
2	10° - 15°	Moderada
3	15° - 25°	Inclinada
4	25° - 35°	Fuerte
5	Mayor a 35°	Muy fuerte

Tabla 5.6. Clases de ráster de orientación de ladera

Valor	Clase	Descripción
1	315 °- 45 °	Norte
2	45° - 135°	Este
3	135° - 225°	Sur
4	225° - 315°	Oeste

Los ráster de distancia a carreteras/caminos urbanos y distancia a terrenos agrícolas se construyeron con la finalidad de tomar en cuenta la influencia de actividades antrópicas, que a nivel local actúan principalmente como fuente de ignición. Desde un Sistema de Información Geográfica, se derivó el ráster de distancia a carreteras y caminos urbanos a partir del archivo vectorial de *Red de carreteras y caminos urbanos* previamente descargado, mientras que el ráster de distancia a terrenos agrícolas se generó a partir del ráster de

vegetación y uso de suelo, utilizando como referencia la distancia a píxeles clasificados como tierras agrícolas y vegetación cultivada. Estas variables funcionan como indicadoras de la influencia antrópica porque se asume que, a menor distancia (de carreteras o campos agrícolas), mayor probabilidad de que el evento de incendio esté relacionado a alguna actividad humana.

Finalmente, todos los ráster obtenidos se recortaron a los límites de Jalisco, se homogeneizó su extensión y resolución (250 m) y se les asignó un Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) - Zona 13 - Datum WGS84.

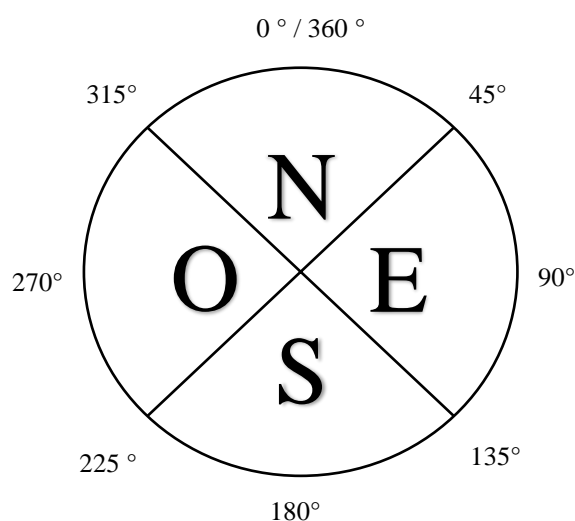


Figura 5.5. Puntos cardinales de orientación de ladera. La orientación de ladera se define como el punto cardinal al que mira la pendiente de la ladera

5.2.4 Datos Top-Down

Variaciones en la temperatura y precipitación asociadas a sequías regionales y/o periodos húmedos regulan la producción del combustible y su flamabilidad a escalas regionales o mayores (Falk *et al.* 2011). Con la finalidad de conseguir registros históricos de temperatura y precipitación para el área y periodo de estudio, se accedió a la información estadística climatológica de la página web de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual dispone de una base de datos de alrededor de 5,500 estaciones climatológicas distribuidas a lo largo de toda la República Mexicana, con registros diarios de precipitación, temperatura

máxima y temperatura mínima desde 1900 hasta el presente. Esta base de datos es abierta al público y se encuentra en formato de texto.

La información de las estaciones climatológicas ubicadas en el estado de Jalisco se obtuvo directamente desde el sitio web. Más adelante, se transfirieron los archivos al entorno de desarrollo integrado RStudio, donde se llevó a cabo una limpieza de los datos, la cual consistió en detectar posibles errores de entrada, como dígitos incorrectos o números fuera de rango; también se identificaron registros con datos faltantes y se verificó el orden cronológico de los datos para prevenir saltos temporales incoherentes. A continuación, se seleccionó una estación climatológica por región fisiográfica de Jalisco, priorizando aquellas con el menor número de datos incompletos. La elección de una estación meteorológica por provincia se fundamentó en la necesidad de obtener una visión representativa de todo el estado, así como abordar el análisis con una cantidad razonable de datos. Cada estación meteorológica seleccionada fue ubicada de manera estratégica dentro de cada provincia para maximizar la representatividad de la región.

Con el fin de analizar la precipitación en un contexto climático de largo plazo, se utilizaron datos del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). El SPI es una herramienta valiosa en el análisis climático de largo plazo que proporciona información sobre la variabilidad y la intensidad de la precipitación en una región específica. Los valores del SPI reflejan las desviaciones con respecto a la precipitación promedio a lo largo de un período de tiempo determinado, con un mínimo de entre 20 y 30 años (Organización Meteorológica Mundial 2012). Un SPI positivo indica condiciones más húmedas que la media, mientras que un SPI negativo señala condiciones más secas.

Los datos del índice se obtuvieron a través la plataforma web de la CONAGUA, calculados por el Servicio Meteorológico Nacional a partir de un conjunto de estaciones de su Base de Datos Climatológica (CONAGUA 2022). Específicamente, se descargaron registros del SPI con una resolución temporal de tres meses, correspondientes a 25 estaciones climatológicas distribuidas a lo largo del estado de Jalisco. Para asegurar la máxima representatividad y confiabilidad de los datos, se eligieron aquellas estaciones con la menor cantidad de datos faltantes distribuidas geográficamente por todo el sitio de estudio. A partir de las 15

estaciones climatológicas seleccionadas, se calculó el promedio mensual del SPI para cada año del período de estudio.

Adicionalmente, se recopiló información acerca de las Normales Climatológicas del estado de Jalisco. Las Normales Climatológicas se refieren a estadísticas a largo plazo de las condiciones meteorológicas en una región, incluyendo variables como la temperatura y la precipitación. Estas normales representan valores promedio calculados a lo largo de un período de 30 años o más. Los datos de Normales Climatológicas se obtuvieron a través de la plataforma web de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y con el objetivo de analizar la temperatura en un contexto climático de largo plazo, se descargaron registros de temperatura máxima normal de las cuatro estaciones previamente seleccionadas para el análisis de series de tiempo, ubicadas en las cuatro provincias fisiográficas de la entidad.

5.3 Análisis de datos

5.3.1 Caracterización de incendios

Los patrones espacio-temporales de la incidencia de incendios en el área y periodo de estudio se describieron a partir de:

1. Número de incendios y superficie quemada por año y mes, para observar la variación interanual y estacionalidad de los incendios. La fecha de ocurrencia se obtuvo a partir del día juliano de la tabla de atributos de los archivos vectoriales.
2. Número de incendios y superficie quemada por tipo de vegetación. Para asociar cada incendio con una cobertura de suelo única, a partir de un Sistema de Información Geográfica se sobrepuso la capa vectorial de área quemada por evento con el ráster de vegetación, y posteriormente se extrajo el valor del pixel (que en este caso representaban una clase de cobertura vegetal) que coincidiera con la ubicación de las coordenadas del centroide de cada polígono de incendio (Figura 5.6). Los incendios con un centroide localizado dentro de un pixel de tipo tierras agrícolas o vegetación cultivada fueron considerados como *quemadas agropecuarias*, y se eliminaron aquellos eventos que coincidían con pixeles de tipo zona urbana/sin vegetación (las igniciones

en zonas urbanas no eran de interés para el análisis); el resto de los incendios se clasificaron como forestales.

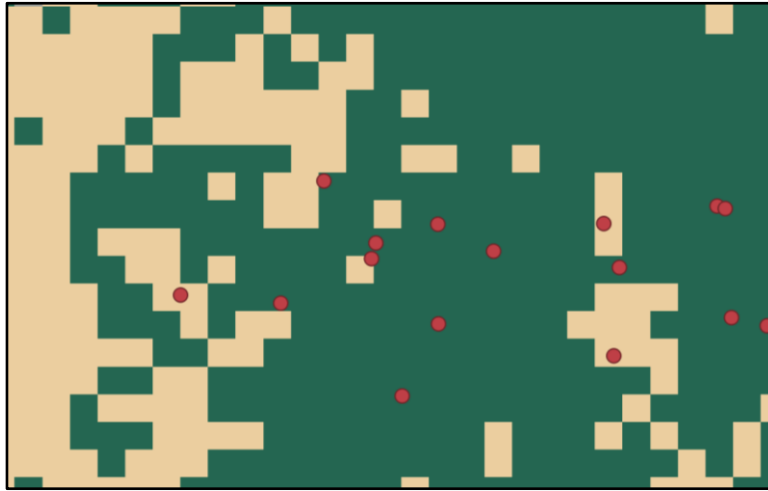


Figura 5.6. Representación gráfica de la asociación entre coordenadas de incendios y vegetación. La figura muestra la sobreposición de las coordenadas del centroide de cada incendio (puntos rojos) con la capa ráster de vegetación en una zona dentro del estado de Jalisco. Los píxeles en el ráster representan dos tipos de cobertura de suelo: terrenos de cultivo (color crema) y bosques de pino-encino (color verde). La resolución de la imagen es de 250 x 250 metros por píxel. Esta representación gráfica ilustra la metodología utilizada para asociar los valores de vegetación a un evento de incendio.

El análisis descriptivo de la superficie quemada se dividió en dos: superficie quemada total, y superficie quemada por evento de incendio. Utilizando una adaptación de la clasificación de Heinselman (1981) y del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA Forest Service por sus siglas en inglés) se clasificó a los incendios de acuerdo a su tamaño (Tabla 5.7); conocer el tamaño de los incendios era relevante, sobre todo, para identificar la presencia de incendios muy grandes y *mega incendios*, así como para conocer su distribución espacial y temporal.

Tabla 5.7. Clasificación de incendios por tamaño. Adaptado de USDA Forest Service (1987) y Heinselman (1981)

Superficie quemada (hectáreas)	Clasificación
< 40	Pequeño
40 - 400	Mediano
400 - 2,000	Grande
2,000 - 4,000	Muy grande
> 4,000	Mega incendio

5.3.2 Análisis Bottom-Up

Con el propósito de identificar la influencia de la heterogeneidad del paisaje en los patrones de incidencia de incendios en áreas con clima similar, se comparó la variabilidad de la ocurrencia y tamaño de los incendios en mismos tipos de vegetación distribuidas lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco. Las provincias fisiográficas fueron elegidas como unidades espaciales de comparación debido a que poseen una geomorfología característica y un origen geológico común, además de presentar paisajes y tipos de rocas semejantes. El hecho de que cada provincia posea condiciones particulares del paisaje a nivel local implica que, aunque se trate del mismo tipo de cobertura, ésta presentará variaciones dependiendo la región fisiográfica de origen. Al evaluar la incidencia de incendios en tipos de vegetación semejante, esto es en áreas con clima similar, se garantizó que la heterogeneidad en el comportamiento de los incendios fuera resultado de mecanismos que operan a nivel local (*Bottom-Up*).

La información de las provincias fisiográficas se obtuvo a partir de la capa vectorial del *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos* del INEGI al año base 2001. Para determinar la ubicación de los incendios en relación a las distintas provincias, se rasterizó la capa anterior y se sobrepuso con las coordenadas del centroide de cada evento. A continuación, se generó información acerca del número de incendios y superficie quemada por región fisiográfica y cobertura de vegetación con la finalidad de identificar patrones de heterogeneidad espacial en la incidencia del fuego.

Con el objetivo de analizar la relación entre las variables *Bottom-Up* y los patrones de variación espacio-temporal en la ocurrencia de incendios, se realizaron dos Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés). El primer análisis se llevó a cabo por provincia fisiográfica y tipo de vegetación con el fin de comparar la correlación e influencia de los distintos controles *Bottom-Up* dentro de un mismo ecosistema distribuido a lo largo del sitio de estudio. A partir de este análisis se generaron gráficos de correlación de variables con el objetivo de:

- a) Identificar correlaciones (positivas y negativas) entre las variables *Bottom-Up*
- b) Obtener la contribución las variables *Bottom-Up* a los primeros dos componentes principales, los cuales explican el mayor porcentaje de la varianza de los datos (Abdi 2010).

En el segundo PCA, se emplearon datos de todos los incendios registrados durante el periodo y sitio de estudio. Estos datos se visualizaron mediante diagramas de dispersión o *biplots*, donde la relación entre los incendios y las variables *Bottom-Up* se interpretó a partir de la proximidad de los puntos a los vectores representativos de cada variable. Asimismo, incendios con características similares se reflejaron como observaciones cercanas en el gráfico. Dentro de cada *biplot*, se realizó un análisis de clustering para identificar conjuntos de incendios con atributos compartidos, utilizando diversos criterios de agrupación. Este análisis permitió:

- a) Detectar asociaciones e interacciones entre las variables *Bottom-Up* y la ocurrencia de incendios
- b) Visualizar tendencias, similitudes y agrupaciones de los incendios explicadas a partir de la influencia de los controles *Bottom-Up*
- c) Observar correlaciones entre las variables *Bottom-Up*

La base de datos utilizada para los Análisis de Componentes Principales se generó siguiendo los pasos que se describen a continuación: 1) Desde la paquetería *raster* del entorno RStudio se sobrepuso la capa vectorial de los incendios con los ráster de todas las variables *Bottom-Up*; para las variables dinámicas (NDVI, precipitación, temperatura), de las cuales se tenía una capa por mes, se eligieron aquellas que coincidieran con el mes y año de ocurrencia de

los incendios; 2) Se extrajeron los valores de los píxeles de las variables *Bottom-Up* que coincidieran con la ubicación de las coordenadas del centroide de cada incendio y 3) Se construyó una tabla en la cual a cada incendio se le asignó un valor de cada factor *Bottom-Up* (Tabla 5.8). En esta tabla también se incluyeron los datos de cobertura de vegetación y provincias fisiográficas.

Tabla 5.8. Primeras filas y columnas de la tabla generada para el análisis *Bottom-Up*, donde cada evento de incendio se relacionó al tipo de cobertura de suelo, la provincia fisiográfica y a todas las variables *Bottom-Up* antes descritas

ID	Área quemada (ha)	Fecha	Cobertura de suelo	Elevación (m)	Pendiente	NDVI	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
1	377.957	11/03/2001	19	1706.72	1	0.21	2.92	42.44
2	156.969	13/03/2001	19	1491.10	1	0.24	2.44	38.85
3	5.815	23/03/2001	10	1384.70	2	0.29	2.74	37.79

Utilizando la tabla anterior también se elaboraron histogramas con el fin de examinar la distribución de las variables *Bottom-Up* en cada provincia fisiográfica, sin considerar la ocurrencia de incendios: desde un Sistema de Información Geográfica, se recortaron las capas ráster de las variables *Bottom-Up* a los límites geográficos de cada provincia. Este proceso se ilustra con un ejemplo en la Figura 5.7. A continuación, se generaron histogramas para observar la variabilidad de los valores de los píxeles en cada capa ráster; en el caso de los factores dinámicos (NDVI, precipitación, temperatura) se seleccionaron específicamente los meses de mayo y septiembre, los cuales son representativos de las estaciones de sequía y lluvia respectivamente, en un año aleatorio (2003).

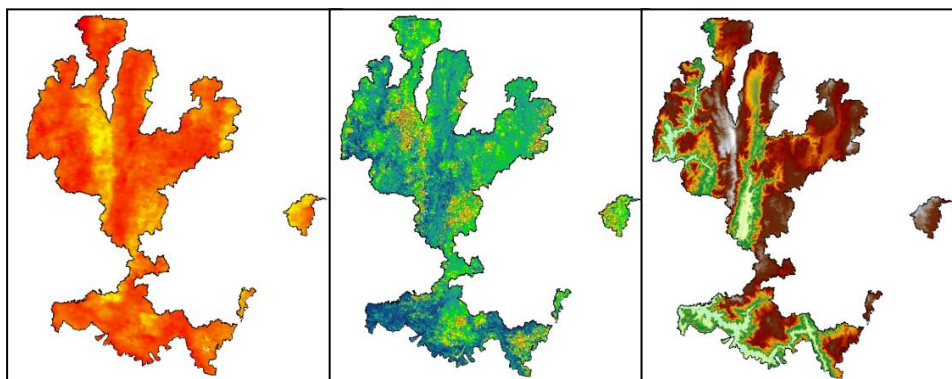


Figura 5.7. De izquierda a derecha, ráster de temperatura, NDVI y elevación recortados a los límites de la provincia de la Sierra Madre Occidental. A partir de esta nueva extensión se realizaron histogramas de los valores de los ráster en cada una de las regiones fisiográficas.

5.3.3 Análisis Top-Down

Para identificar la influencia de los controles *Top-Down* sobre el comportamiento del fuego, se compararon patrones de precipitación y temperatura máxima, así como de ocurrencia de incendios forestales y quemas agropecuarias, de los tres años con mayor y menor incidencia de incendios del periodo de estudio, y a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco. De esta manera fue posible detectar patrones de sincronía tanto a nivel regional como anual.

Para identificar tendencias climáticas y su relación con la incidencia de incendios, se analizaron series de tiempo de precipitación y temperatura máxima diaria con registros provenientes de las cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes provincias fisiográficas de Jalisco. Estos gráficos abarcaron dos periodos clave: la época previa a la temporada alta de incendios, que comprende los meses del año previo (de octubre a diciembre) y del año de interés (de enero a febrero), así como la época seca, que se extiende de marzo a junio. La inclusión de ambos periodos resultó relevante, ya que en la época previa se establecen las condiciones de humedad antecedentes a temporada de incendios, mientras que durante la época seca se definen las características del combustible y su susceptibilidad a incendiarse. Estos patrones diarios de precipitación y temperatura máxima se contrastaron con los valores promedio del SPI y las Normales Climatológicas. El objetivo principal de este análisis fue determinar si los años con alta y baja incidencia de incendios presentaron

condiciones de temperatura y humedad que se desviaron significativamente de los rangos históricos.

Adicionalmente, se utilizaron los mapas de NDVI previamente descargados en la sección *Bottom-Up* para realizar un análisis temporal descriptivo, con el fin de contrastar los valores de NDVI observados en años con alta incidencia de incendios frente a años con baja incidencia de incendios; se anticipaba que valores bajos del índice podrían estar más asociados a la presencia de incendios, los cuales reflejan condiciones de sequía y estrés hídrico en la vegetación, lo que la vuelve más susceptible a la ignición y propagación del fuego. A continuación, se generaron tablas por provincia fisiográfica, año y mes con información acerca de la superficie incendiada por incendios forestales y quemas agropecuarias, con las cuales se identificaron tendencias sincrónicas en el comportamiento del fuego.

La variabilidad interanual de la precipitación y temperatura también puede ser impulsada por fenómenos climáticos que operan a gran escala. El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es un mecanismo de forzamiento del clima caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del Océano Pacífico y de las condiciones de la atmósfera (Manzo-Delgado 2004). ENOS está conformado por tres fases: El Niño, La Niña y una fase neutra. Durante los episodios de El Niño hay un calentamiento a gran escala de las aguas superficiales de la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, así como cambios en la circulación atmosférica tropical; en contraste, durante la fase La Niña, hay una disminución de la temperatura en las aguas del Pacífico, sumado a una inversión de las condiciones de la atmósfera suprayacente (OMM 2014).

Diversos estudios han demostrado que ENOS afecta los patrones de precipitación y ocurrencia de incendios forestales en muchas partes del mundo (Yocom 2010). Con el propósito de detectar asociaciones entre la presencia del El Niño Oscilación del Sur y la alta o baja ocurrencia de incendios en los años seleccionados, se obtuvo información del Índice Multivariado del ENOS. Este índice analiza las seis variables principales observadas en el Océano Pacífico tropical, tal como la presión atmosférica a nivel del mar, los componentes zonal y meridional del viento y la temperatura superficial del mar (Azpra *et al.* 2018), y se calcula como el primer componente principal no rotado de los seis campos observados

combinados (Wolter & Timlin 1993). Los valores negativos del índice corresponden a la fase fría del ENOS (La Niña), mientras que los valores positivos representan la fase cálida (El Niño).

5.4 Modelo probabilístico

Con el propósito de analizar la distribución espacial de la superficie quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco, se implementó un modelo probabilístico mediante un enfoque Bayesiano, utilizando el tamaño de los incendios como variable de respuesta. Cabe destacar que las quemas agropecuarias no fueron consideradas en la modelación. A partir de los coeficientes del modelo ajustado, se identificaron factores significativos que explicaron la variabilidad espacial en el tamaño de los incendios, y se efectuaron predicciones con el fin de determinar las zonas de mayor riesgo dentro del sitio de estudio. Esta aproximación permitió tomar en cuenta el efecto de diversos controles en la distribución espacial de los patrones de incidencia de incendios forestales (Díaz-Avalos *et al.* 2016)

5.4.1 Inferencia Bayesiana

El ajuste del modelo predictivo se realizó dentro de un marco bayesiano. La principal ventaja de esta aproximación es que toma en cuenta una incertidumbre en las estimaciones, además de que cuenta con cierta flexibilidad y capacidad de tratar con problemas como datos faltantes (Cameletti & Blangiardo, 2015).

Bajo el enfoque bayesiano, se considera que los parámetros de un modelo son desconocidos; sin embargo, al tratarse de variables aleatorias, pueden obtenerse a partir de la estimación de la distribución a posteriori conjunta $\pi(\theta | \mathbf{y})$, es decir, la distribución conjunta de los parámetros θ condicionada a los datos observados \mathbf{y} (Giannini 2021). La estimación de la distribución a posteriori es el principal objetivo de la inferencia bayesiana y se obtiene a partir del teorema de Bayes:

$$\pi(\theta | \mathbf{y}) = \frac{\pi(\mathbf{y} | \theta)\pi(\theta)\pi(\mathbf{y})}{\pi(\mathbf{y})} \quad \dots [1]$$

Donde $\pi(\mathbf{y} | \theta)$ es la función de verosimilitud, $\pi(\theta)$ es la distribución a priori de los parámetros desconocidos y $\pi(\mathbf{y})$ es la verosimilitud marginal (Giannini 2021). Dado que $\pi(\mathbf{y})$ no depende de θ , es considerada como una constante de normalización, por lo que el teorema de Bayes a menudo se reporta como (Cameletti & Blangiardo, 2015):

$$\pi(\theta | \mathbf{y}) \propto \pi(\mathbf{y} | \theta)\pi(\theta) \quad \dots [2]$$

Con lo cual la distribución a posteriori se puede estimar integrando a uno el producto de la verosimilitud y la distribución a priori de los parámetros, la cual resume el conocimiento previo que se tenga acerca de la distribución de los parámetros a estimar (Giannini 2021). Una vez estimada la distribución a posteriori, se pueden obtener medidas que resuman los parámetros de interés en el modelo (Cameletti & Blangiardo, 2015).

Una de las aproximaciones más novedosas para realizar inferencia bayesiana fue propuesta por Havard Rue, Martino y Chopin (2009): INLA (*Integrated Nested Laplace Approximation*, por sus siglas en inglés), es una metodología que en lugar de estimar la distribución a posteriori conjunta $\pi(\theta | \mathbf{y})$, estima las distribuciones marginales a posteriori de cada parámetro del modelo $\pi(\theta_i | \mathbf{y})$ (Giannini 2021). A diferencia de otros enfoques, como las Cadenas Markovianas de Monte Carlo (MCMC por sus siglas en inglés), que pueden ser computacionalmente ineficientes si se incorporan componentes espacio-temporales o si se trabaja con grandes bases de datos, INLA ha resultado ser una alternativa eficiente (Cameletti & Blangiardo, 2015; Díaz-Avalos *et al.* 2016). Los modelos que INLA es capaz de ajustar están restringidos a aquellos modelos que pueden expresarse como un Campo Aleatorio Markoviano Gaussiano Latente (GMRF por sus siglas en inglés) (Havard Rue *et al.* 2009). No obstante, los GMRF cubren un amplio rango de modelos dando lugar a numerosas aplicaciones en análisis de datos espaciales (Cameletti *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2017)

Para un vector de variables aleatorias $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ con distribución perteneciente a la familia exponencial, la media μ_i para la observación y_i se encuentra asociada a un predictor lineal η_i mediante una función de enlace (Giannini 2021). El predictor lineal η_i se define como:

$$\eta_i = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m x_m + \sum_{l=1}^L f_l(Z_{li}) \dots [3]$$

Donde β_0 es un escalar que representa el intercepto, los coeficientes $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_M)$ cuantifican el efecto lineal de las covariables $x = (x_1, \dots, x_M)$ en la variable de respuesta, $f = \{f_1(\cdot), \dots, f_L(\cdot)\}$ es una colección de funciones definidas en términos de una serie de covariables $z = (z_1, \dots, z_L)$; los términos $f_l(\cdot)$ pueden asumir distintas formas, tales como efectos uniformes y no lineales de las covariables, tendencias en el tiempo y efectos estacionales, intercepto y pendiente aleatorias, así como efectos temporales y espaciales aleatorios (Cameletti & Blangiardo, 2015).

Para proponer estructuras espaciales de efectos aleatorios, una de las funciones más utilizadas es la función de correlación Matérn (Havard Rue & Tjelmeland, 2002). Lindgren, Rue y Lindström (2011b) propusieron un nuevo enfoque para representar la función de covarianza de Matérn como un GMRF; esta representación es posible a través de la solución de ecuaciones diferenciales estocásticas parciales (SPDE por sus siglas en inglés). El GMRF se define creando una malla sobre el dominio espacial utilizando la triangulación de Delaunay, lo que permite una combinación finita de funciones basadas en los parámetros de la covarianza de Matérn que se utilizan para llenar una matriz de precisión (Lindgren & Rue, 2015).

5.4.2 Aproximación estadística

Si asociamos a los incendios forestales con sus coordenadas espaciales, por ejemplo, la longitud y latitud del centroide del área quemada, junto con su instante temporal y otras covariables relacionadas a su ocurrencia, es posible identificarlos como la realización de un proceso estocástico espacio-temporal (Serra *et al.* 2014b).

Para construir el modelo probabilístico, asumimos que dentro de un dominio espacial W hay n eventos de incendios, con ignición en las ubicaciones $x_1; \dots; x_n$ y un área quemada $M_1; \dots; M_n$ asociada a cada ubicación, donde x_i y m_i son aleatorias (Díaz-Ávalos *et al.* 2016). Por lo tanto, un enfoque de modelación adecuado es considerar que los pares $\{(x_i, m_i), i = 1, \dots, n\}$ son resultado de un proceso puntual con marcas $X_m = \{(x, m_s) : x \in D, m_s \in \mathcal{M}\}$

en una ventana D (Días-Avalos *et al.* 2016; Diggle 2013), donde los puntos corresponden a la ubicación de ocurrencia de los incendios y el área quemada es utilizada como marca de estos puntos. En este caso, el área quemada condicionada a la ocurrencia de incendios se consideró como la variable de respuesta del modelo.

La modelación de procesos puntuales espaciales con marcas normalmente se efectúa bajo la suposición de que los puntos de ocurrencia $\{x_i : i = 1, \dots, n\}$ son independientes de las marcas $\{m_i, i = 1, \dots, n\}$ (Stoyan & Penttinen 2000), y que además se trata de un proceso estacionario e isotrópico (Días-Avalos *et al.* 2016).

En el área y periodo de estudio, el área quemada $M_1; \dots; M_n$ puede idealizarse como un campo no aleatorio con estructura no Gaussiana, con lo que puede considerarse el siguiente modelo jerárquico:

$$m_i | x_i, \beta, u_i, \theta \sim \text{Gamma}(a_i, b_i); \quad \mu_i = \frac{a_i}{b_i}; \quad \text{var}(m_i) = \frac{1}{\tau^2} = \frac{a_i}{b^2_i} \dots [4]$$

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j m_{ij} + \sum_{l=1}^L f_l(m_{il}) + u_i \dots [5]$$

$$u_i \sim \text{GRF}(0, \lambda^{-1} \Sigma) \dots [6]$$

Donde m_i es el área quemada total del i -ésimo incendio forestal en el sitio x_i ; μ_i y $\text{var}(m_i)$ son la media y la varianza de la distribución gamma de la cual se extrae m_i (Figura 5.8), con parámetros a_i (forma) y b_i (escala); β_0 es un intercepto aleatorio; $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_J)$ es un vector de coeficientes desconocidos que cuantifican el efecto lineal de las covariables en la variable de respuesta; $f = \{f_1(\cdot), \dots, f_L(\cdot)\}$ es una colección de funciones que pueden asumir efectos no lineales de las covariables, tendencias temporales y estacionales, y efectos aleatorios espaciales (Cameletti & Blangiardo, 2015); $\mathbf{u} = u_1, \dots, u_n$ representa el Campo Aleatorio Markoviano Gaussiano Latente, donde λ es la precisión del GMRF. Notar que [5] se deriva de [3].

En la formulación anterior τ^2_i es la precisión, que puede ser escrita como $\tau_i = (s\phi)/\mu^2_i$, tal que ϕ es un parámetro de precisión y s es un parámetro de escala ubicación independiente (Días-Avalos *et al.* 2016). Lo anterior resulta en una densidad *Gamma* parametrizada como:

$$\pi(m) = \frac{1}{\Gamma(s\phi)} \left(\frac{(s\phi)}{\mu}\right)^{s\phi} m^{(s\phi)-1} \exp\left\{- (s\phi) \frac{y}{\mu}\right\} \quad \dots [7]$$

Para la matriz de precisión Σ , se asumió una estructura de covarianza de Matérn, donde $h_{ij} = |x_i - x_j|$ denota la distancia entre dos incendios arbitrarios dentro de W ; la dependencia espacial entre marcas y ubicaciones es capturada por el GMRF (Días-Avalos *et al.* 2016).

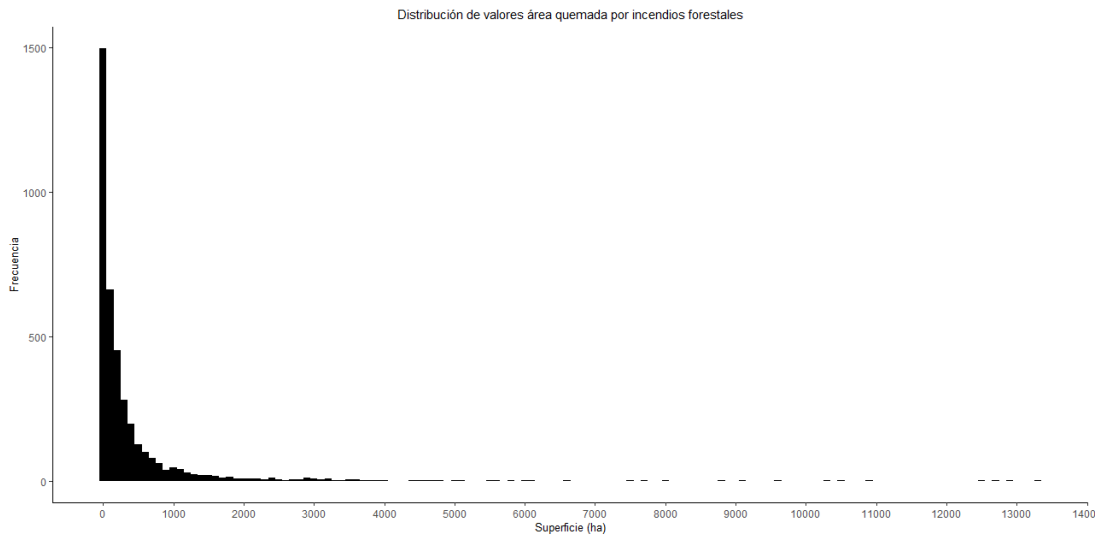


Figura 5.8. Distribución del área quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco para el periodo 2001-2020. La forma asimétrica de la distribución *gamma* es característica de la superficie quemada por incendios en vegetación silvestre (Alvarado 1992), con un alto porcentaje de incendios de tamaño pequeño y mediano, y un bajo número de incendios más grandes al extremo de la distribución.

5.4.3 Ajuste del modelo

Para el ajuste del modelo se utilizó la metodología INLA-SPDE que, como ya fue mencionado, proporciona un enfoque eficiente para ajustar Modelos Gaussianos Latentes, con dependencia de estructuras temporales y espaciales. La implementación de INLA se realizó a partir de la librería INLA (Lindgren & Rue, 2015) desarrollada en el software R.

Los datos utilizados para el proceso de ajuste fueron extraídos de la tabla creada en la sección 5.3.2, en donde cada registro de incendio se asoció a las coordenadas de su centroide, la fecha de su ocurrencia y su superficie quemada, así como a los valores de los controles *Bottom-Up*, los cuales se tomaron como covariables en el ajuste del modelo. El encabezado de estos datos se muestra en la Tabla 5.8.

La estimación del modelo se basó en datos recopilados durante el periodo 2001-2017, mientras que los años 2018, 2019 y 2020 se reservaron para la fase de validación. El porcentaje óptimo de datos destinados a entrenamiento y validación en un modelo puede variar en función del contexto y el tamaño del conjunto de datos. En estudios con una cantidad sustancial de datos, como es el caso de esta investigación, es común asignar alrededor del 80% de los datos para el entrenamiento y un 20% para la validación (Gholamy et al. 2018); en esta ocasión se optó por una división del 85% para entrenamiento y 15% para validación. La elección de los años 2018, 2019 y 2020 para la validación responde a la necesidad de evaluar la capacidad predictiva del modelo en condiciones más actuales. La consistencia y precisión de los resultados obtenidos en estos años pueden sugerir la posibilidad de proyectar el modelo hacia periodos posteriores y más recientes.

Las variables incorporadas en el modelo abarcaron diversos aspectos: 1) el intercepto; 2) el efecto lineal de las covariables, representado por los controles *Bottom-Up*, la cobertura de vegetación, el año y el mes; 3) el componente temporal, modelado como un *random walk* de primer orden, que interpreta los días (julianos) del período de estudio como una función no lineal del tiempo; 4) el componente espacial, que emplea la matriz de precisión para mapear el GMRF basado en una triangulación; y finalmente, 5) el efecto aleatorio, derivado de n variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (Cameletti & Blangiardo, 2015). La inclusión de estas variables consideró la influencia de regulación *Bottom-Up* (topografía, actividades humanas, condiciones meteorológicas), regulación *Top-Down* (año, mes y *random walk*, reflejando procesos temporales y variabilidad interanual o estacional) y la cobertura vegetal, todos dependientes de un contexto espacio-temporal.

Antes de incluir todas las variables, se probó el ajuste de distintos modelos con el fin de evaluar qué combinaciones de variables arrojaban los mejores resultados (Tabla 5.9). Para evaluar el rendimiento de cada uno de los modelos, se calcularon dos criterios de selección

de modelos: el criterio de información de Watanabe-Akaike (WAIC por sus siglas en inglés) y el criterio de información de desviación (DIC por sus siglas en inglés), ambos ampliamente utilizados en métodos bayesianos; además, también se calcularon el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés). En la elección del mejor modelo se priorizó el valor del WAIC (aquel con el valor más bajo) que, en el caso de los modelos bayesianos, refleja mejor la incertidumbre de las predicciones posteriores (Pimont 2020).

Para la estimación del componente espacial del modelo se implementó la aproximación SPDE. El enfoque SPDE se basa en discretizar el espacio mediante la construcción de una malla que crea un conjunto artificial de vecinos en el área de estudio, lo que permite calcular la autocorrelación espacial entre las observaciones (Lindgren & Rue, 2015). Dado que la configuración de la malla tendrá un impacto significativo en las inferencias y predicciones a realizar, se procedió a particionar el estado de Jalisco en distintas triangulaciones con el fin de encontrar la más adecuada para los datos (Figura 5.9). Una malla es adecuada cuando la triangulación en el dominio de interés es más fina, mientras que en la zona externa los triángulos deben ser más grandes; además, los puntos, en este caso las coordenadas de los incendios, deben coincidir con los vértices de los triángulos (Verdoy 2019).

Una vez elegido el mejor modelo se llevó a cabo el proceso de validación. El objetivo de la validación es que el modelo haga predicciones con base en nuevos valores de la variable de respuesta, es decir, utilizando observaciones independientes a las que se utilizaron para ajustar el modelo (Giannini 2021). En este caso los registros de área forestal quemada de los años 2018, 2019 y 2020 no fueron incorporados en el ajuste, por lo que se emplearon para realizar las predicciones. A partir de estas predicciones se evaluó el rendimiento del modelo, obteniendo el error de los valores estimados frente a los valores observados de los años que no se utilizaron en la construcción del modelo.

Finalmente, se generó una tabla con los coeficientes estimados por el modelo, a partir de los cuales fue posible extraer información acerca de la significancia de cada una de las covariables para explicar la distribución espacial del área quemada. También se elaboraron gráficos de las distribuciones posteriores marginales de los parámetros, y mapas de densidad

de área quemada, con los cuales se identificaron zonas críticas o con mayor superficie afectada del periodo de estudio.

Tabla 5.9. Estructura de los diferentes modelos ajustados a los datos de superficie quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco. Se probaron distintas combinaciones de las covariables con el fin de obtener el mejor resultado, empezando por los ajustes más simples a los más complejos.

Modelo	Términos
M1 a M11	Modelos por cada covariable
M12	Todas las covariables
M13	Solo componente espacial
M14	Solo componente temporal
M15	Covariables + aleatorio
M16	Covariables + espacial
M17	Covariables + temporal
M18	Covariables + espacial + temporal
M19	Covariables + espacial + temporal + aleatorio

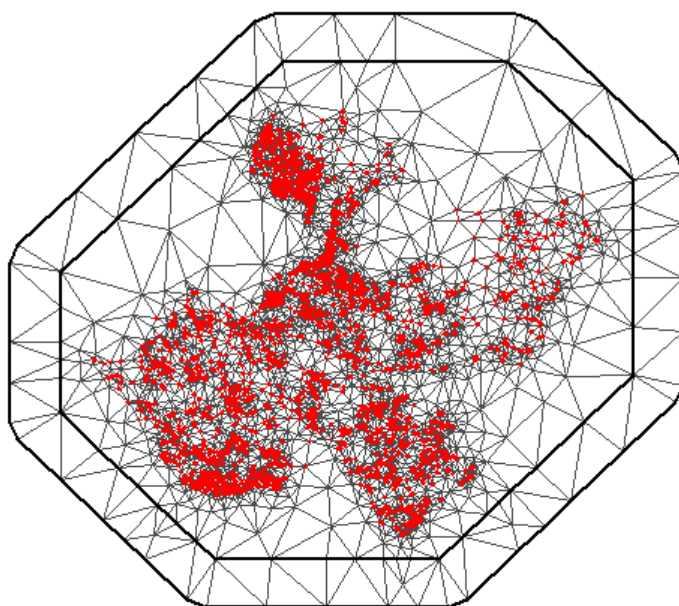


Figura 5.9. Configuración de la malla utilizada para el sitio de estudio. La figura muestra la malla utilizada para el dominio de interés en el estado de Jalisco. Se puede observar cómo la triangulación es más detallada dentro de los límites estatales, lo que permite una mayor resolución espacial en esta área. En contraste, en la zona exterior los triángulos son más amplios para abarcar el área circundante. Los puntos en color rojo indican las coordenadas del centroide de los incendios, los cuales coinciden con los vértices de los triángulos.

6. RESULTADOS

6.1 Caracterización de incendios

6.1.1 Ocurrencia y área quemada anual

La Tabla 6.1 presenta un resumen detallado de la incidencia de incendios anual en el área y periodo de estudio. Los datos reportados fueron obtenidos a partir del procesamiento de polígonos de incendios derivados de información satelital. Además de proporcionar el número de incendios y la superficie afectada total por año, se reporta el área quemada máxima registrada en un solo evento de incendio, el área quemada promedio anual y la ocurrencia de incendios de más de 2,000 y 4,000 hectáreas (*mega incendios*). Asimismo, se incluyó el promedio interanual con su respectivo coeficiente de variación.

Durante el periodo de estudio, se registró un promedio de 287 incendios ocurridos anualmente; no obstante, existió una notable variación interanual. El coeficiente de variación (66.64%) revela que algunos años presentaron una cantidad significativamente mayor o menor de incendios en comparación con el promedio anual. Los años 2005, 2011, 2016, 2017 y 2019 se destacaron por tener una alta frecuencia de incendios, siendo 2005 un año excepcionalmente elevado, con 922 siniestros registrados. Por otra parte, los años 2002, 2010, 2014, 2015 y 2020 presentaron un bajo número de igniciones; en 2014 y 2015 la incidencia fue la más baja del periodo de estudio.

Durante el periodo de estudio, en promedio se quemaron 297.34 hectáreas por incendio y 91,354.68 hectáreas al año. El coeficiente de variación para el área quemada total anual (89.15%) indica una alta variabilidad en la extensión afectada por incendios a lo largo del tiempo. En 2005, 2008, 2011, 2017 y 2019 el área quemada total estuvo por encima de la media, mientras que los años 2002, 2010, 2014, 2015 y 2020 exhibieron menor superficie incendiada. De manera similar, el área quemada máxima, que refleja el tamaño del incendio más grande ocurrido cada año, mostró una alta variabilidad interanual (76.91%), señalando que algunos años experimentaron incendios mucho más grandes que otros. Es interesante mencionar que los años con mayor área quemada máxima correspondieron a aquellos con una mayor superficie quemada total. Lo anterior fue particularmente notorio en 2005, 2011 y 2017, años con la mayor superficie incendiada del periodo estudiado, y la mayor cantidad de incendios de más de 2,000 y 4,000 hectáreas. En contraste, los años 2014 y 2015 se

caracterizaron por una menor superficie afectada total y un área quemada máxima por debajo de la media anual.

La ocurrencia de *mega incendios* en el sitio de estudio mostró la variabilidad más alta entre las variables analizadas (200.94%). Esta cifra refleja que, en ciertos años del periodo de estudio, el número de *mega incendios* fue considerable, mientras que en otros no hubo registro de dichos eventos. En promedio, se reportaron 1.85 *mega incendios* al año, siendo 2005 y 2017 casos excepcionales, con 16 y 7 *mega incendios*, respectivamente. Aunque 2005 presentó la mayor cantidad de eventos de esta magnitud, en 2017 se produjo el incendio más grande del período de estudio, abarcando un área de 17,381.10 hectáreas. A diferencia de los *mega incendios*, eventos entre 2,000 y 4,000 ha se dieron en casi todos los años, exceptuando 2014 y 2015.

El área quemada fue proporcional a la ocurrencia de incendios, sin embargo, un mayor número de eventos no siempre significó una mayor superficie afectada. Por ejemplo, 2016 presentó una alta frecuencia de incendios, pero un área quemada total por debajo de la media; lo opuesto se observó en 2008, que aún con una ocurrencia de incendios menor al promedio, mostró una superficie quemada por arriba de la media, dada la presencia de incendios de 2,000 a 4,000 ha y *mega incendios*. Lo anterior sugiere que los mecanismos que dan lugar a grandes incendios no necesariamente son los mismos que aquellos que originan un gran número de igniciones.

6.1.2 Ocurrencia y área quemada por tipo de vegetación

La incidencia de incendios en el estado de Jalisco no mostró homogeneidad a través de las diversas coberturas de vegetación. Los incendios acontecidos en bosques, selvas, matorrales, pastizales naturales y otras formaciones vegetales se consideraron como incendios forestales (Jardel *et al.* 2014), mientras que aquellos ocurridos en tierras agrícolas, vegetación cultivada y/o vegetación inducida fueron definidos como quemas agropecuarias.

La Figura 6.1 muestra la ocurrencia y área quemada anual por tipo de vegetación en el estado de Jalisco. A lo largo del período de estudio, se observó que los ecosistemas con mayor incidencia de incendios fueron el bosque de pino-encino y la selva subcaducifolia y caducifolia. En promedio, el 2.41% de la superficie total de bosque de pino-encino en el

estado de Jalisco se quemó anualmente, seguido por la selva subcaducifolia y caducifolia con el 0.74%, las tierras de cultivo con el 0.70%, el matorral y mezquital con el 0.43%, el pastizal con el 0.39%, la selva subperennifolia y perennifolia con el 0.11% y el humedal con el 0.002% (Figura 6.2).

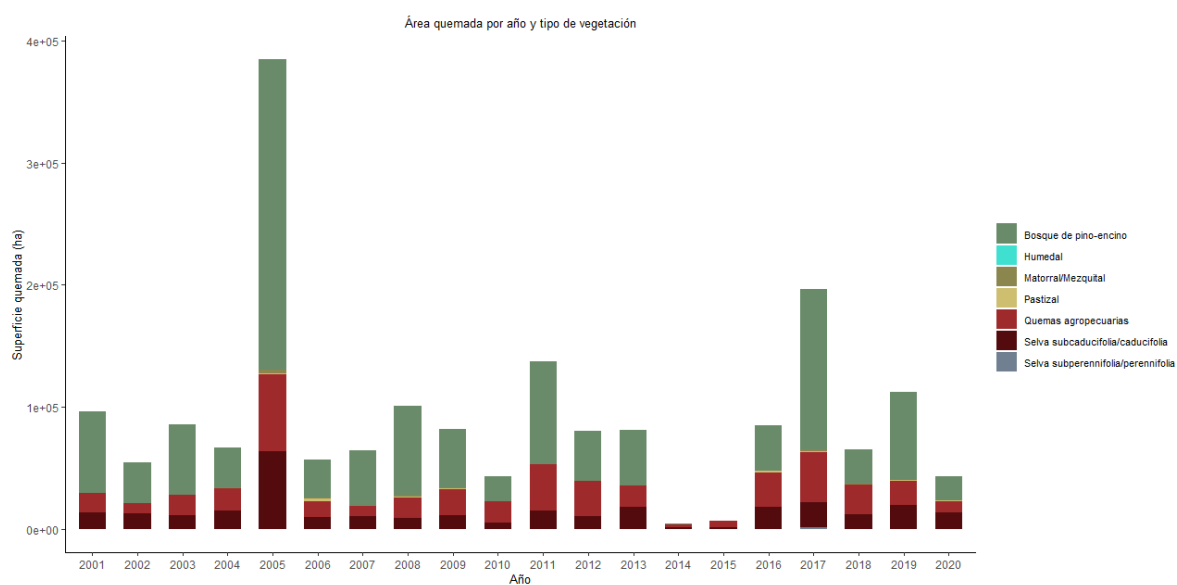
Tabla 6.1. Incidencia de incendios anual en el área y periodo de estudio. Los datos reportados se obtuvieron a partir del procesamiento de polígonos de incendios derivados de información satelital. PI = Promedio Interanual; CV= Coeficiente de Variación

Año	Número de incendios	Área quemada total (ha)	Área quemada máxima (ha)	Área quemada promedio (ha)	Número de incendios 2,000 - 4,000 ha	Número de mega incendios
2001	246	96,020.23	6,033.72	390.33	9	2
2002	113	34,258.86	6,648.10	480.17	5	1
2003	274	85,415.98	4,443.09	311.74	5	1
2004	259	66,522.00	3,541.18	256.84	6	0
2005	922	384,634.98	13,252.99	417.17	23	16
2006	210	57,052.40	2,731.92	271.68	4	0
2007	264	64,470.74	3,157.74	244.21	6	0
2008	283	101,046.25	12,667.76	357.05	5	2
2009	288	82,088.13	2,789.56	285.03	5	0
2010	195	43,159.15	3,164.75	221.33	2	0
2011	481	137,626.10	10,491.68	286.12	12	2
2012	295	80,510.28	8,033.48	272.92	4	1
2013	251	80,716.78	4,422.70	321.58	3	1
2014	32	4,144.16	302.32	129.51	0	0
2015	34	6,807.44	856.17	200.22	0	0
2016	344	85,192.26	5,026.00	247.65	3	1
2017	529	196,581.33	17,381.10	371.61	13	7
2018	237	65,302.53	3,217.56	275.54	2	0
2019	308	112,412.70	12,860.20	364.98	5	3
2020	178	43,131.38	2,294.72	242.31	2	0
PI	287.15	91,354.68	6,165.83	297.34	5.7	1.85
CV	66.64%	89.15%	76.91%	27.41%	92.85%	200.94%

El bosque de pino-encino no solo presentó la tasa más alta de área quemada anual, sino que también destacó como el tipo de vegetación con el mayor número de incendios y la mayor superficie incendiada total (Figura 6.3). Por otro lado, aunque las quemas agropecuarias contribuyeron significativamente al total de incendios registrados (32.85%), su proporción con respecto al área quemada total fue menor (22.32%) (Figura 6.3). Es importante notar que, en comparación con el resto de las coberturas forestales, la incidencia de incendios en el humedal y la selva subperennifolia/perennifolia fue casi nula, con tan solo 2 incendios en el humedal y 4 en la selva.

Debido a que la ignición del fuego depende en gran medida de las condiciones meteorológicas presentes en un tiempo determinado, la temporada alta de incendios está fuertemente influenciada por la estacionalidad del clima. En el área de estudio, el periodo más seco y caluroso del año abarca los meses de abril, mayo e inicios de junio, lo que resultó en una mayor incidencia de incendios forestales durante esta época (Figura 6.4). Por su parte, las quemas agropecuarias comenzaron en noviembre y alcanzaron su punto máximo también durante la temporada seca.

A)



B)

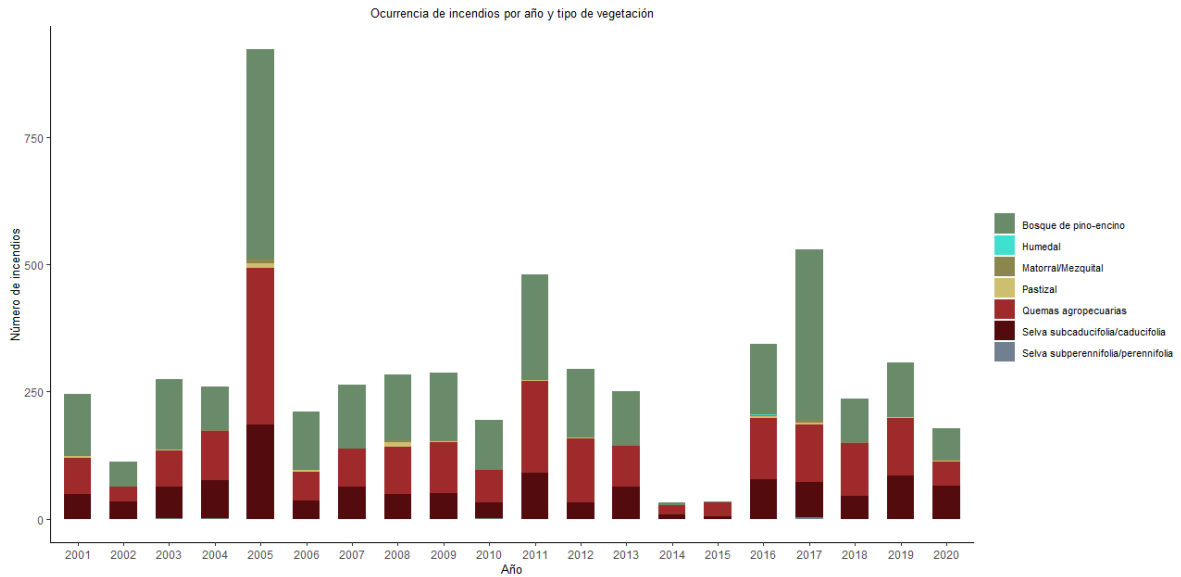


Figura 6.1. A) área quemada total y B) ocurrencia de incendios por año y tipo de vegetación. Las coberturas de vegetación representadas incluyen el bosque de pino-encino, la selva subcaducifolia/caducifolia, el matorral/mezquital, las tierras de cultivo, el pastizal, la selva subperennifolia/perennifolia y el humedal. Todos los años presentaron incendios en el bosque de pino-encino y la selva subcaducifolia/caducifolia, así como quemadas agropecuarias. Incendios en otros ecosistemas fueron menos frecuentes.

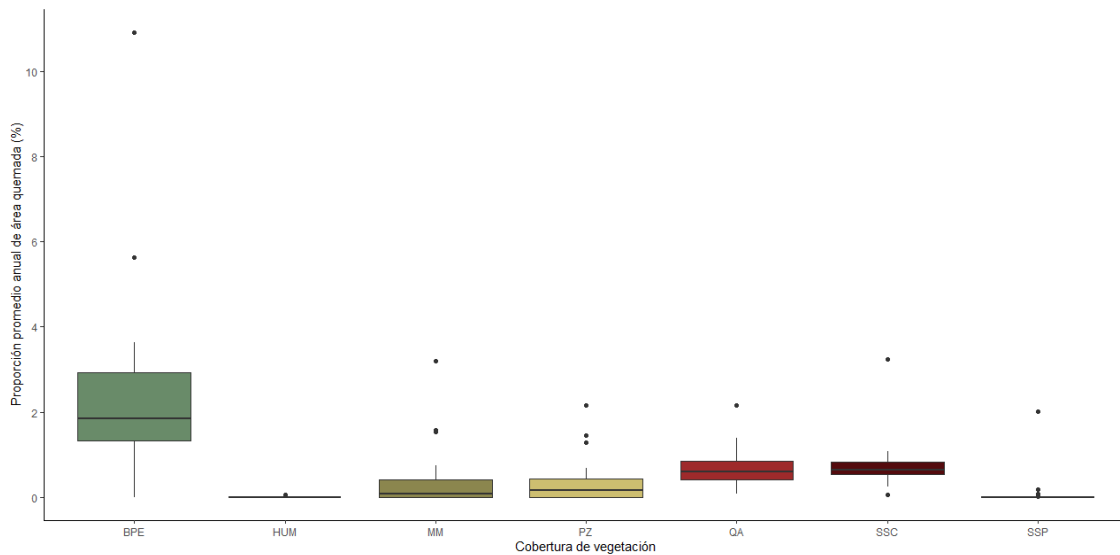


Figura 6.2. Proporción promedio anual de área quemada por cobertura de vegetación en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2020. Los puntos en color negro indican valores atípicos. El bosque de pino-encino destacó como el tipo de vegetación con el porcentaje más alto de área quemada anual. Las abreviaturas corresponden a BPE = bosque de pino-encino, HUM = humedal, PZ = pastizal, MM = matorral/mezquital, QA = quemadas agropecuarias, SSC = selva subcaducifolia/caducifolia, SSP = selva subperennifolia/perennifolia

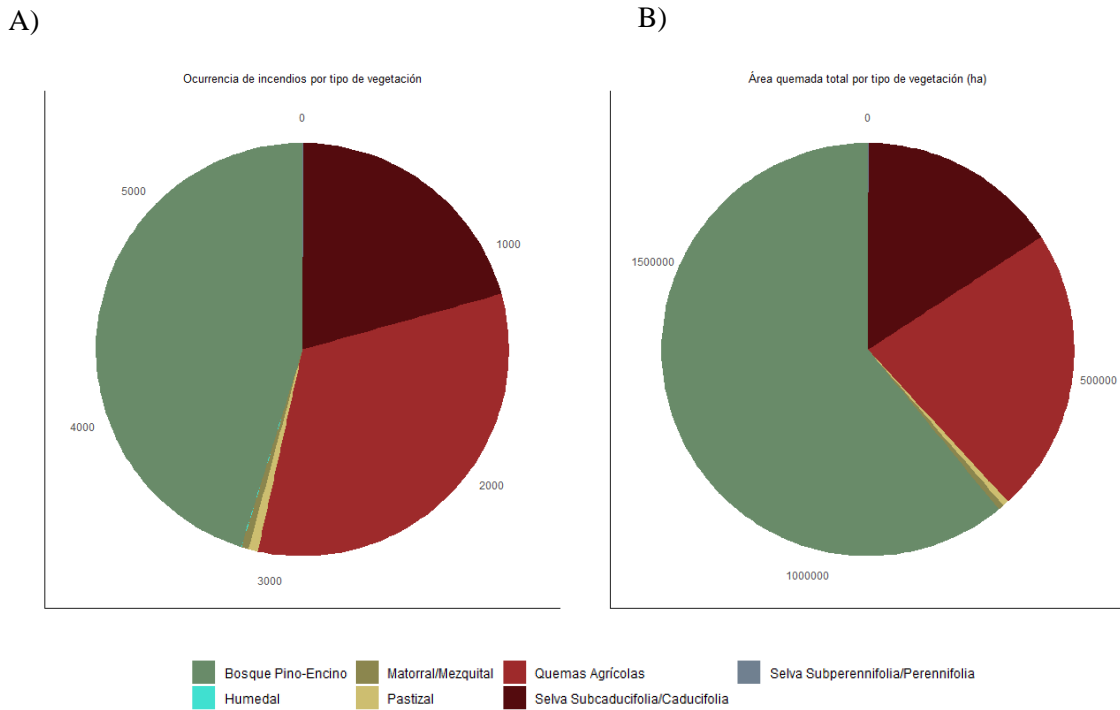


Figura 6.3. Proporción de A) número de incendios B) área quemada total por tipo de vegetación en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2020

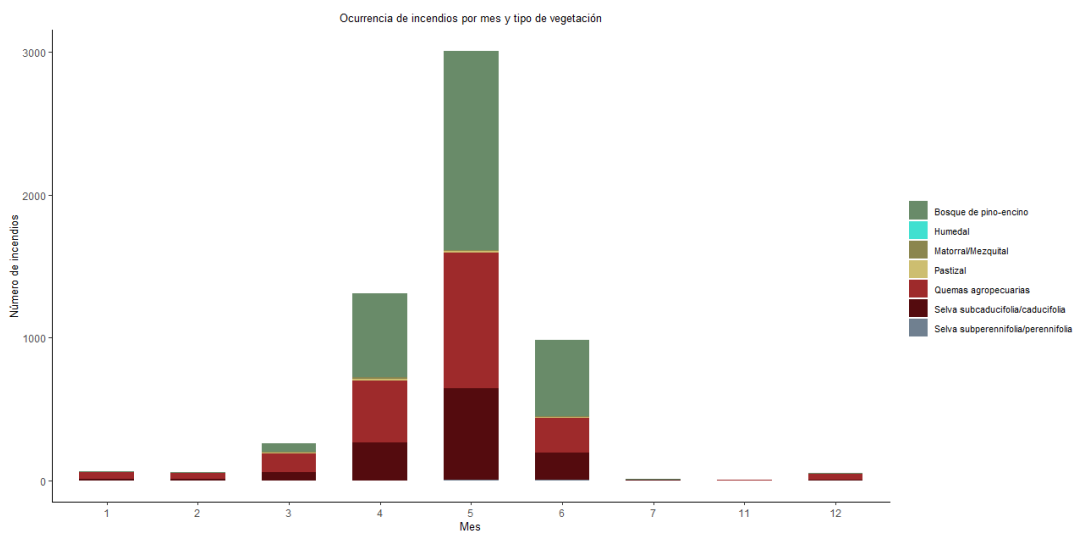


Figura 6.4. Distribución mensual del total de eventos de incendios forestales y quemas agropecuarias registradas en el período 2001-2020 en el estado de Jalisco.

Los resultados revelaron que diferentes tipos de vegetación en el estado de Jalisco experimentaron incendios de diferentes tamaños y frecuencias (Tabla 6.2). En todas las coberturas estudiadas, los incendios de pequeña y mediana escala (menores a 400 ha) fueron los más comunes; sin embargo, también se observaron diferencias significativas. Por ejemplo, el bosque de pino-encino presentó una alta frecuencia de eventos menores a 400 ha, (74.8%), mientras que los incendios de mayor magnitud representaron el 3.47% (entre 2,000 y 4,000 hectáreas) y el 1.19% (*mega incendios*) de los eventos.

La selva subcaducifolia y caducifolia tuvo una alta proporción de incendios de entre 40 y 400 hectáreas (50.68%), seguida por un 32.37% de eventos menores a 40 hectáreas; también se registraron algunos incendios de mayor escala, con un 15.68% de eventos entre 400 y 2,000 hectáreas, y un 1.27% de incendios de más de 2,000 ha. Al igual que la selva, las quemadas agropecuarias mostraron una mayor frecuencia de incendios de tamaño medio (40 a 400 ha) con un 58.04% de eventos en esta categoría. También se registró un número importante de eventos de pequeña escala (28.22%); los incendios de mayor magnitud fueron menos comunes, con el 0.74% de eventos superando las 2,000 ha.

En el matorral y mezquital, los incendios fueron predominantemente de tamaño medio (40 a 400 ha), con 65.63% de los eventos en esta categoría; no se registraron incendios mayores a 2,000 ha en esta cobertura. En el pastizal, aproximadamente la mitad de los incendios presentaron un tamaño menor a 40 hectáreas (44.19%), seguidos por un 39.53% de eventos de mediana escala. Además, se registraron algunos incendios de mayor magnitud, con un 13.95% ocurriendo entre 400 y 2,000 hectáreas y un 2.33% entre 2,000 y 4,000 hectáreas.

6.2 Análisis *Bottom-Up*

6.2.1 Heterogeneidad espacial en la incidencia de incendios

Al comparar la incidencia de incendios en mismos tipos de vegetación distribuidas a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco, se encontró que existió heterogeneidad en los patrones tanto de ocurrencia como de área quemada.

Tabla 6.2. Número de incendios por categoría de tamaño y cobertura de suelo en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2020. Las abreviaturas corresponden a BPE = bosque de pino-encino, HUM = humedal, PZ = pastizal, MM = matorral/mezquital, QA = quemas agropecuarias, SSC = selva subcaducifolia/caducifolia, SSP = selva subperennifolia/perennifolia

	< 40 ha	40 - 400 ha	400 - 2,000 ha	2,000 - 4,000 ha	> 4,000 ha
BPE	976 (37.61%)	965 (37.19%)	533 (20.54%)	90 (3.47%)	31(1.19%)
HM	2 (100%)	0	0	0	0
MM	6 (18.75%)	21 (65.63%)	5 (15.63%)	0	0
PZ	19 (44.19%)	17 (39.53%)	6 (13.95%)	1 (2.33%)	0
QA	532 (28.22%)	1094 (58.04%)	245 (13.00%)	13 (0.69%)	1(0.05%)
SSC	382 (32.37%)	598 (50.68%)	185 (15.68%)	10 (0.85%)	5 (0.42%)
SSP	2 (3.33%)	3 (50.00%)	1 (16.67%)	0	0

La Tabla 6.3 resume la distribución proporcional y total de superficie incendiada en las principales coberturas de suelo del sitio de estudio. Los resultados destacan que las diferentes coberturas de vegetación se quemaron de manera diferenciada dependiendo la provincia fisiográfica en la que se ubicaron. El bosque de pino-encino, con un coeficiente de variación del 54%, mostró la mayor variabilidad entre regiones. Específicamente, la Sierra Madre Occidental resultó ser la provincia más afectada, con 74.68% de sus bosques incendiados a lo largo del periodo de estudio, seguida de la Sierra Madre del Sur, con 37.57%. En el caso de la selva subcaducifolia y caducifolia, con una variación del 29%, la Sierra Madre del Sur fue la provincia con mayor proporción de selva quemada (16.92%), seguida por el Eje Neovolcánico (14.29%). En contraste, las quemas agropecuarias presentaron un patrón más homogéneo, con una variación del 16%; tanto la Sierra Madre del Sur como la Sierra Madre Occidental tuvieron la misma proporción de quemas (13.36%), similar al Eje Neovolcánico (14.08%), mientras que la provincia más afectada fue la Mesa del Centro (18.29%).

Dentro de cada cobertura de vegetación, la heterogeneidad espacial en la incidencia de incendios está asociada a la variabilidad local de los componentes estructurales del paisaje; a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del sitio de estudio, la distribución de los controles *Bottom-Up* fue diversa. Los histogramas de estas variables por región fisiográfica pueden encontrarse en el Anexo.

Tabla 6.3. Superficie quemada total (hectáreas) y porcentual (entre paréntesis) por cobertura de vegetación y provincia fisiográfica en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2020. Se reporta el coeficiente de variación (CV) como indicador de la variabilidad relativa de la superficie quemada entre las diferentes provincias y tipos de cobertura. Las abreviaturas corresponden a BPE = bosque de pino-encino, SSC = selva subcaducifolia/caducifolia, QA = quemas agropecuarias

	Superficie incendiada (ha)		
	BPE	SSC	QA
Eje Neovolcánico	359,724.6 (48.03%)	85,832.06 (14.79%)	280,641.9 (14.08%)
Mesa del Centro	8,186.5 (17.20%)	1,088.66 (8.47%)	29,240.64 (18.29%)
Sierra Madre del Sur	390,393.63 (37.57%)	153,581.94 (16.92%)	71,414.14 (13.36%)
Sierra Madre Occidental	366,909.2 (74.68%)	50,652.14 (11.28%)	30,393.8 (13.36%)
Coeficiente de Variación	53.91%	29.08%	16.04%

6.2.2 Correlación e influencia de variables *Bottom-Up* por tipo de vegetación

Los gráficos de correlación de variables se obtuvieron para los dos tipos de vegetación con mayor incidencia de incendios en el sitio y periodo de estudio: el bosque de pino-encino y la selva subcaducifolia y caducifolia. Las quemas agropecuarias se excluyeron de este análisis dado que su incidencia en las distintas provincias fue más homogénea.

Los gráficos están compuestos por 1) el círculo de correlación, el cual representa la correlación entre variables *Bottom-Up* asociadas a incendios: variables que se encuentran agrupadas están positivamente correlacionadas, mientras que variables negativamente correlacionadas se posicionan en cuadrantes opuestos; 2) los histogramas de contribución, los cuales ilustran el porcentaje de contribución de cada factor *Bottom-Up* a los dos primeros componentes principales: cuanto mayor sea el valor de la contribución, mayor importancia de la variable al explicar la variabilidad en el comportamiento de los incendios. Las contribuciones también pueden observarse en el gradiente de color del círculo de correlación. La línea discontinua en color rojo en los histogramas indica la contribución promedio esperada; aquellas variables con una contribución mayor a este límite se consideran relevantes en el componente dado.

Al comparar los gráficos de correlación del bosque de pino-encino en las cuatro provincias fisiográficas (Figura 6.5 A-D) se observaron ciertas similitudes en la configuración y contribución de las variables; por ejemplo, se encontró que en las cuatro provincias la temperatura siempre fue de los factores más importantes (contribución al primer componente principal por encima del umbral), además de que no se correlacionó positivamente con ninguna otra variable y, al contrario, fue antagónica, principalmente al NDVI. Otro patrón común en las cuatro regiones fue la correlación positiva de las variables antrópicas (distancia a caminos y distancia a campos agrícolas); asimismo, ambos factores se correlacionaron positivamente con alguna variable topográfica en el Eje Neovolcánico, la Mesa del Centro y la Sierra Madre Occidental, mientras que en la Sierra Madre del Sur lo hicieron con el NDVI y la precipitación.

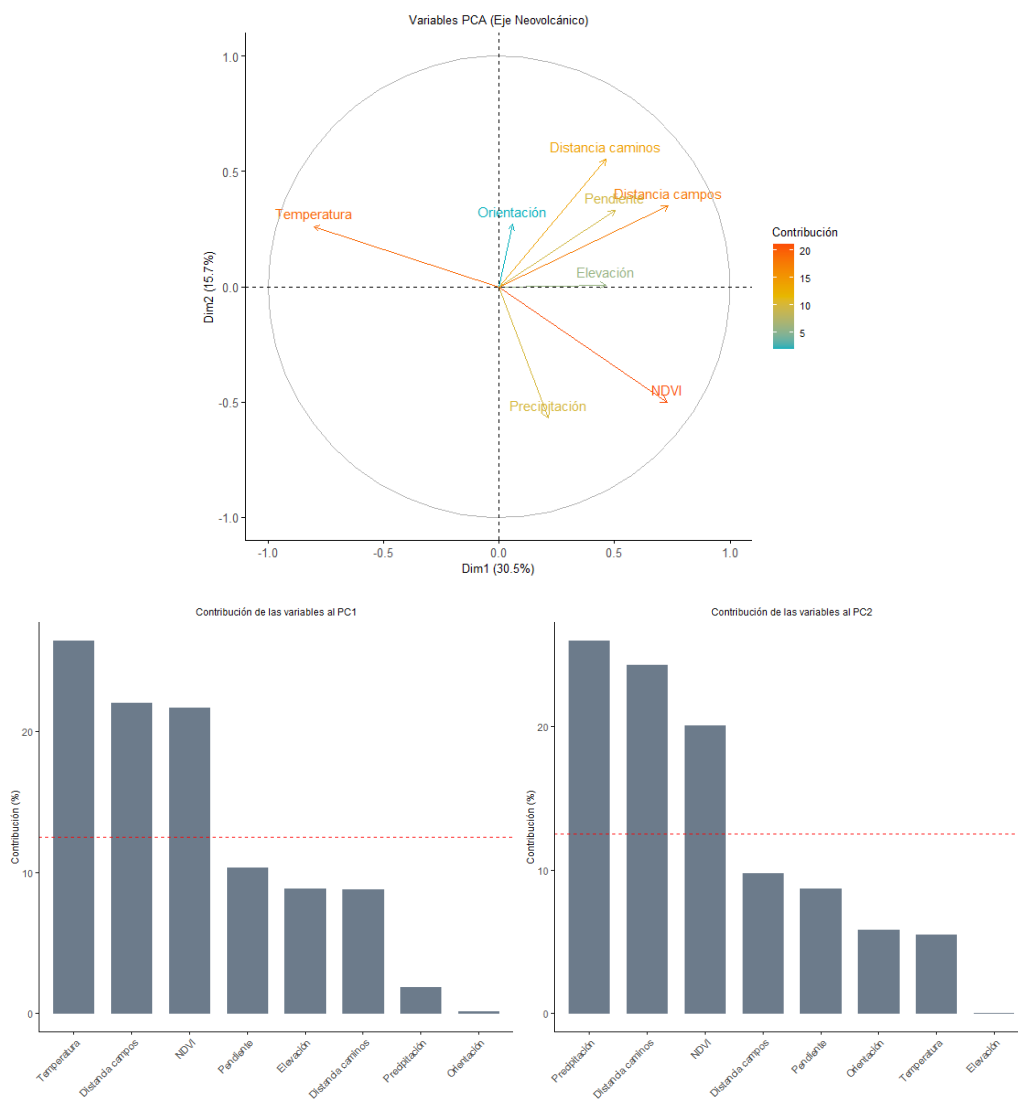
Además de la temperatura, el NDVI fue el otro factor que contribuyó de manera significativa a explicar la variación de los incendios en todas las provincias fisiográficas; en el Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur, la contribución de esta variable estuvo por encima de la contribución promedio esperada en ambos componentes principales. Por el contrario, la orientación de ladera no fue relevante dado que tuvo una contribución por debajo del promedio esperado en todos los casos.

La correlación de las variables *Bottom-Up* en la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre Occidental fue variable; sin embargo, sus contribuciones fueron casi idénticas: en la Sierra Madre Occidental las variables con mayor relevancia (en orden) fueron la temperatura, el NDVI y la distancia a campos agrícolas en el primer componente principal, y la elevación, pendiente y precipitación en el segundo; para la Sierra Madre del Sur, el orden de las contribuciones fue la siguiente: temperatura, NDVI y distancia a caminos en el primer componente principal, y elevación, precipitación, pendiente y NDVI en el segundo. Lo que difirió entre ambas provincias fue el tipo de factor antrópico (distancia a caminos en Sierra Madre del Sur vs distancia a campos agrícolas en Sierra Madre Occidental), y que la pendiente y precipitación contribuyen en diferente orden al segundo componente principal.

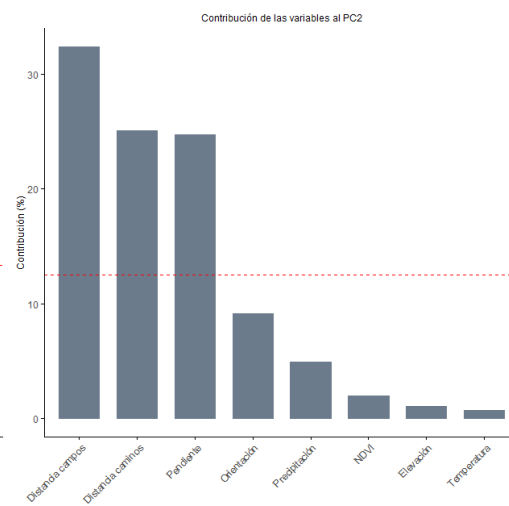
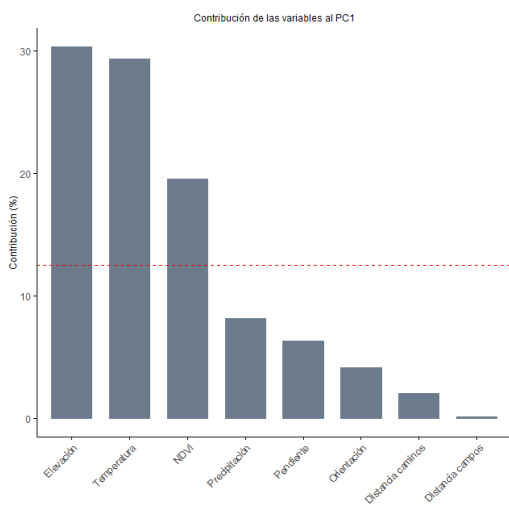
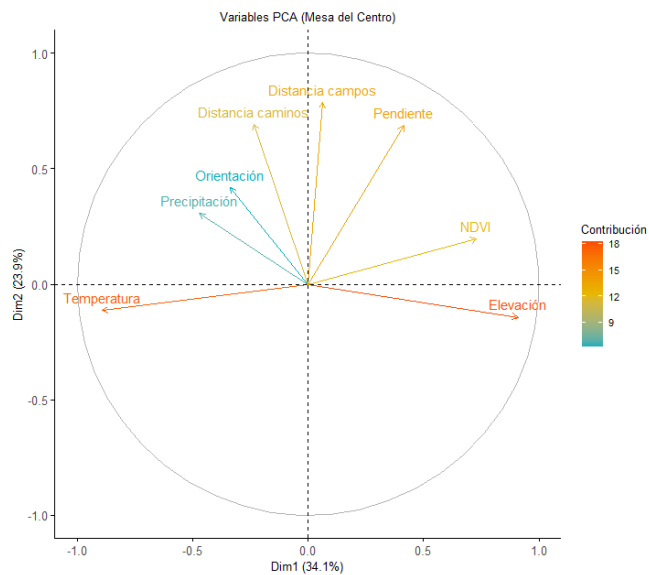
En comparación con la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Occidental, en la Mesa del Centro y el Eje Neovolcánico los dos factores antrópicos (distancia a campos agrícolas y distancia a caminos) estuvieron entre las variables con mayor contribución a los primeros

dos componentes principales, lo que sugiere que la presencia de actividades humanas está fuertemente asociada a la variabilidad de los incendios en los bosques de pino-encino en ambas provincias. Las provincias presentaron diversidad sobre todo en la manera en la que se agruparon y correlacionaron los controles *Bottom-Up*. No obstante, entre las disimilitudes más evidentes se encontró que en el Eje Neovolcánico ninguna de las variables topográficas contribuyó de manera relevante a los dos primeros componentes principales; es decir, la topografía no fue significativa al momento de explicar la variabilidad de los datos de incendios en los bosques de pino-encino de esta región.

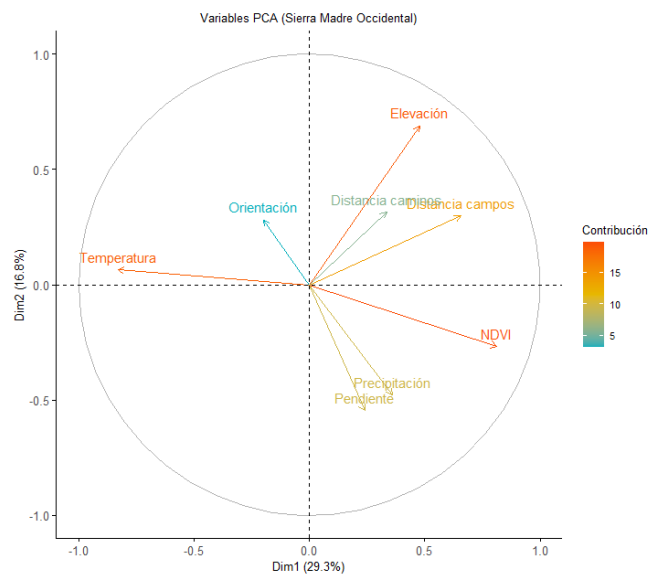
A)

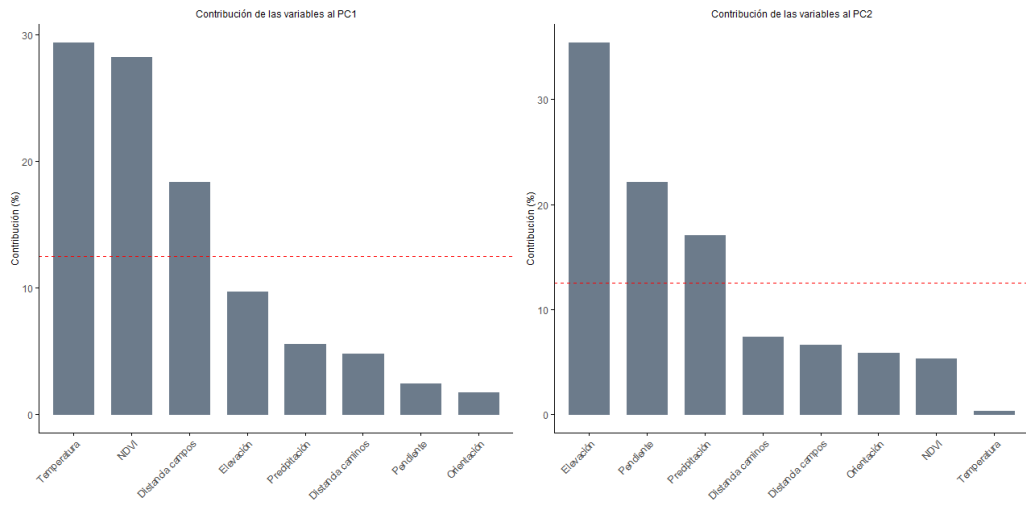


B)



C)





D)

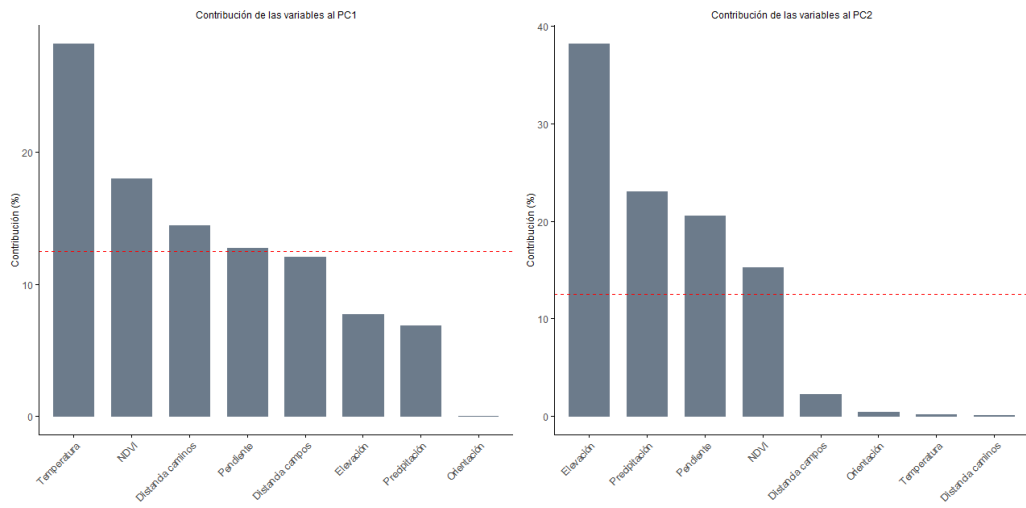
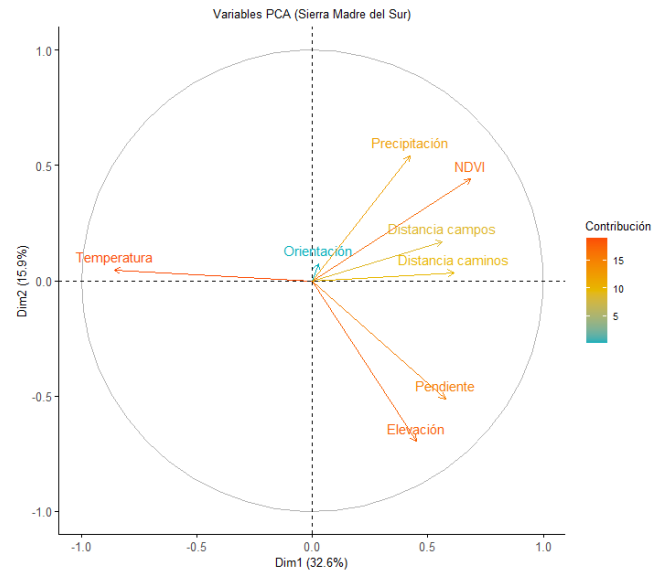


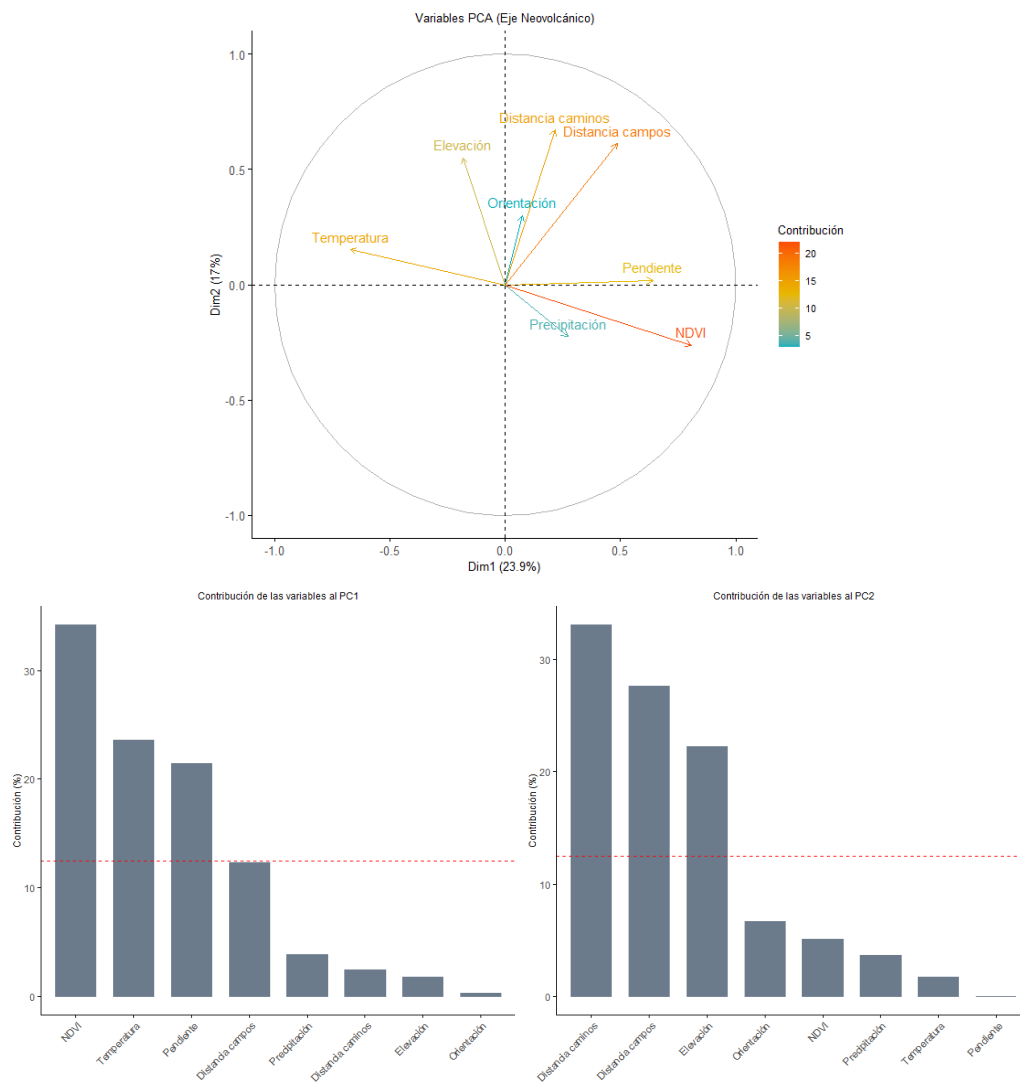
Figura 6.5. Correlación y contribución de las variables *Bottom-Up* asociadas a incendios forestales en los bosques de pino-encino de las provincias fisiográficas del estado de Jalisco: A) Eje Neovolcánico; B) Mesa del Centro; C) Sierra Madre Occidental; D) Sierra Madre del Sur. El círculo de correlación representa la correlación entre las variables *Bottom-Up*; variables con una correlación positiva tienden a agruparse en regiones cercanas del círculo, mientras que las correlaciones negativas las sitúan en lados opuestos. Los histogramas de contribución indican el porcentaje de contribución de cada variable a los dos primeros componentes principales; las variables con contribuciones superiores a la contribución promedio (línea discontinua) se consideran más relevantes en el componente correspondiente. Las contribuciones también se reflejan en el gradiente de color del círculo de correlación.

La Figura 6.6 A-D muestra los resultados para la selva subcaducifolia y caducifolia. Al igual que en el bosque de pino-encino, la configuración (agrupación) de las variables *Bottom-Up* en el círculo de correlación fue lo más contrastante entre provincias. Por ejemplo, el NDVI se correlacionó positivamente con variables topográficas en el Eje Neovolcánico (pendiente) y Mesa del Centro (pendiente y elevación), mientras que en la Sierra Madre del Sur lo hizo con la precipitación; en la Sierra Madre Occidental el NDVI no se correlacionó con ninguna variable. Por otro lado, y de manera semejante al bosque de pino-encino, se observó que en todas las regiones fisiográficas la temperatura no se correlacionó positivamente con ninguna variable, y la correlación negativa más fuerte sucedió con el NDVI (y en algunos casos con la precipitación).

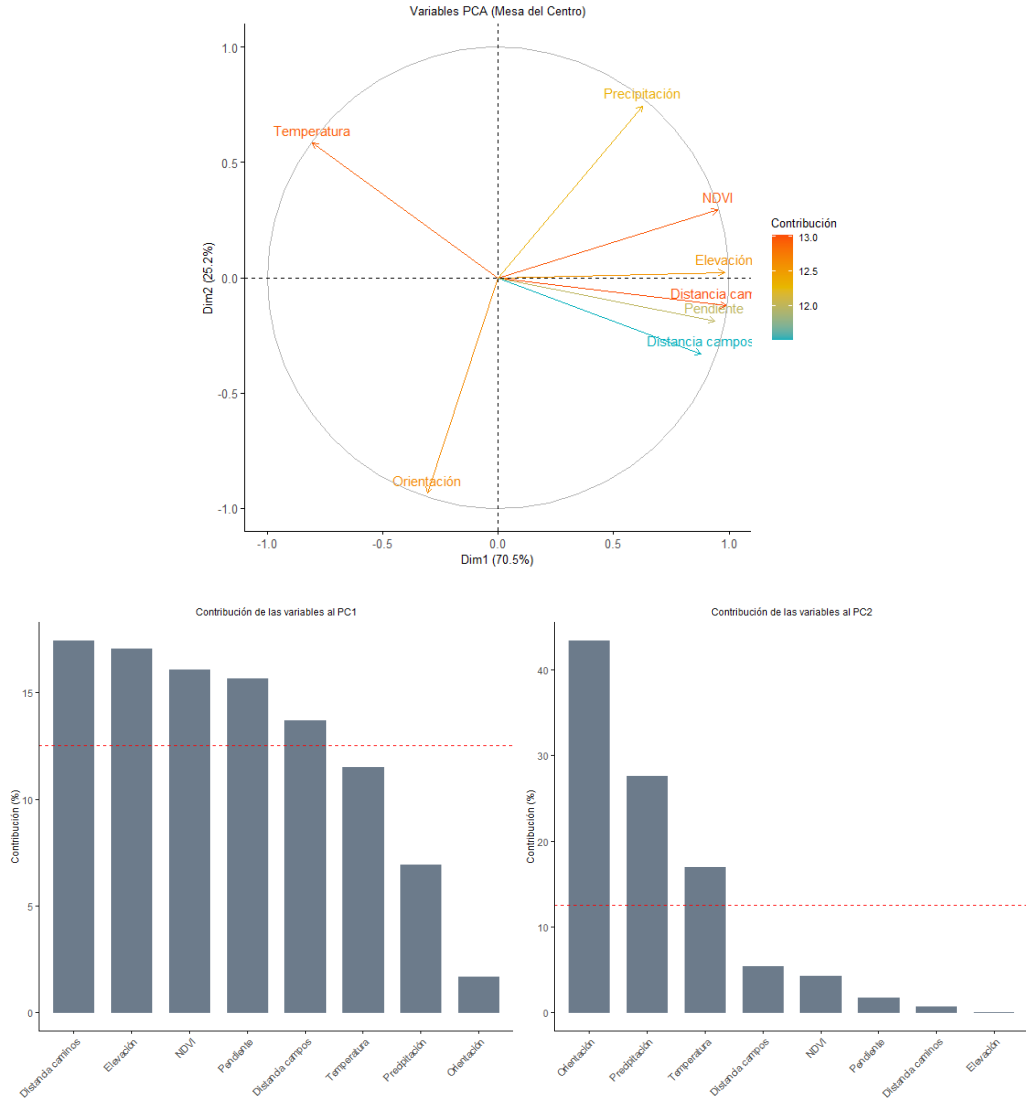
Con respecto a las contribuciones, algunos patrones presentes en la selva subcaducifolia y caducifolia fueron análogos a los del bosque de pino-encino. Nuevamente la temperatura y el NDVI fueron los controles más importantes. De igual modo, los dos factores antrópicos (distancia a caminos y distancia a campos agrícolas) se encontraron positivamente correlacionadas en todas las provincias con excepción de la Sierra Madre del Sur; además ambas variables presentaron contribuciones significativas en el Eje Neovolcánico y la Mesa del Centro, a diferencia de la Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur, en donde sólo fue importante la distancia a campos agrícolas. La tendencia de las contribuciones relativas de los factores no fue tan parecida entre la Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur, no obstante, los tres controles más importantes (no en el mismo orden) en ambas provincias fueron la temperatura, el NDVI y la distancia a campos agrícolas.

En comparación con el bosque de pino-encino, la topografía desempeñó un papel más evidente al explicar la variabilidad en el comportamiento de los incendios en la selva subcaducifolia y caducifolia. La pendiente y elevación contribuyeron de manera significativa a alguno de los primeros dos componentes principales en todas las provincias fisiográficas; en la Sierra Madre Occidental la elevación contribuyó por encima del promedio esperado en ambos componentes. La orientación de ladera también fue importante en la Mesa del Centro y la Sierra Madre Occidental.

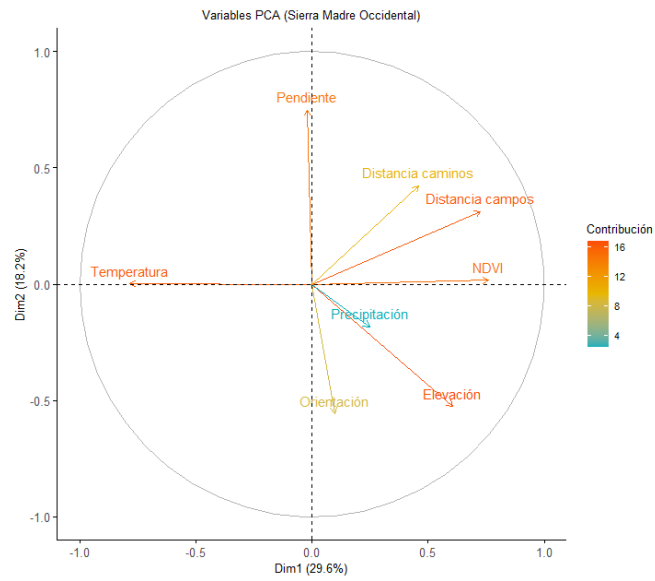
A)

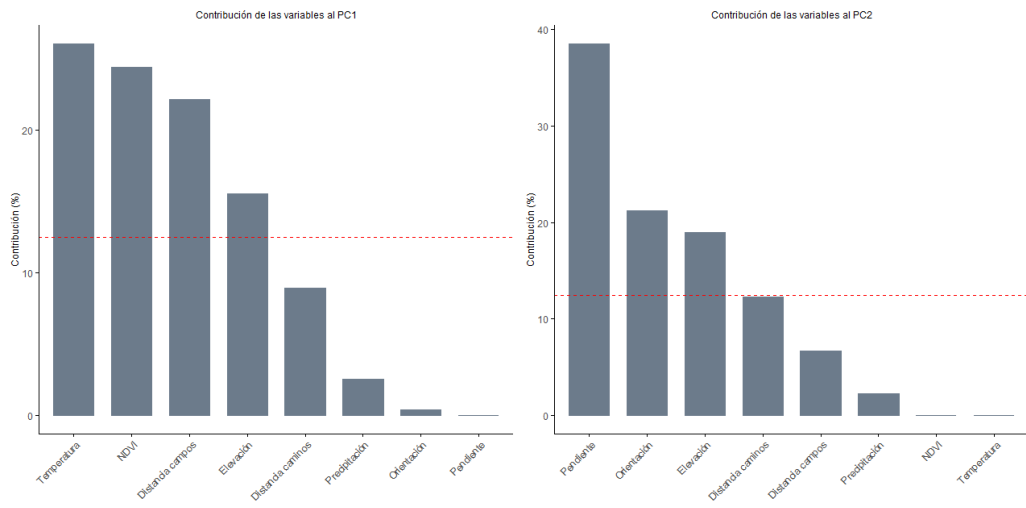


B)



C)





D)

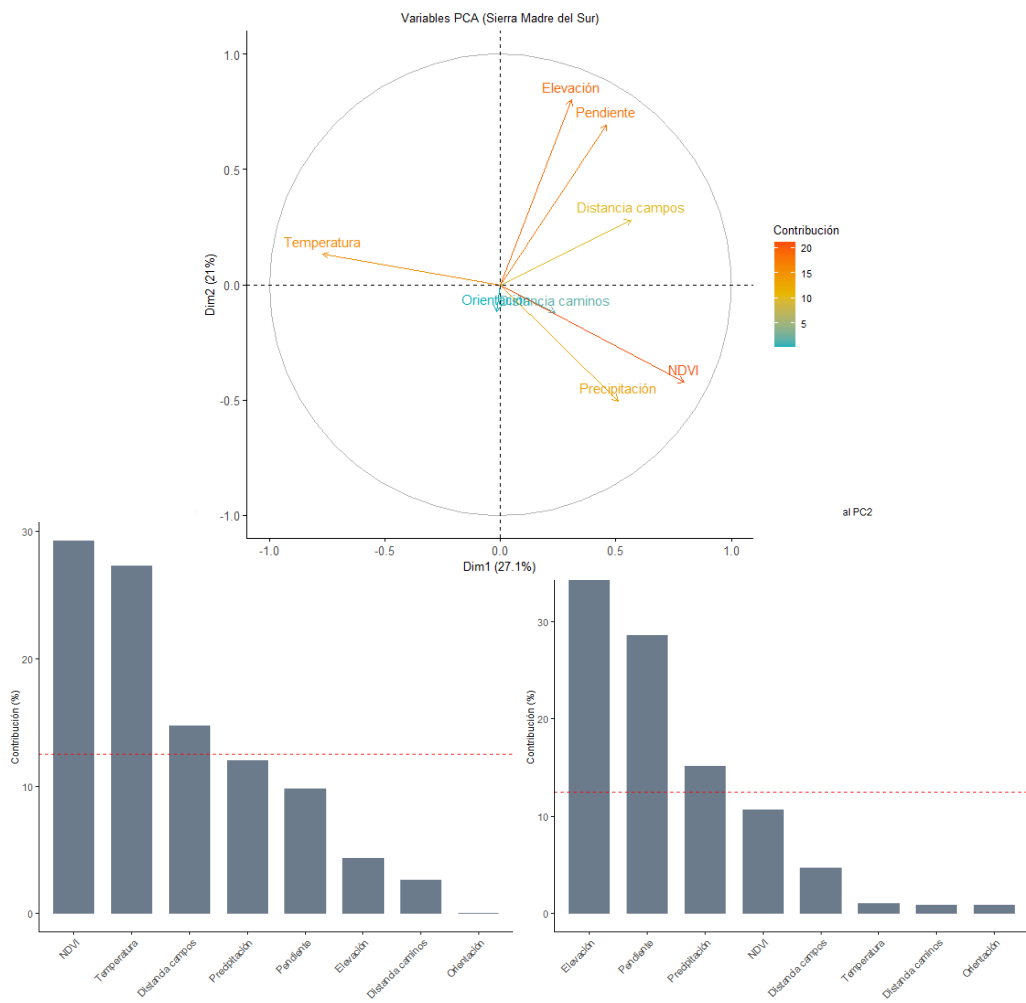


Figura 6.6. Correlación y contribución de las variables *Bottom-Up* asociadas a incendios forestales en la selva subcaducifolia y caducifolia de las provincias fisiográficas del estado de Jalisco: A) Eje Neovolcánico; B) Mesa del Centro; C) Sierra Madre Occidental; D) Sierra Madre del Sur. El círculo de correlación representa la correlación entre las variables *Bottom-Up*; variables con una correlación positiva tienden a agruparse en regiones cercanas del círculo, mientras que las correlaciones negativas las sitúan en lados opuestos. Los histogramas de contribución indican el porcentaje de contribución de cada variable a los dos primeros componentes principales; las variables con contribuciones superiores a la contribución promedio (línea discontinua) se consideran más relevantes en el componente correspondiente. Las contribuciones también se reflejan en el gradiente de color del círculo de correlación.

6.3.3 Asociación entre incendios y variables *Bottom-Up*

Los gráficos de dispersión o *biplots* (Figuras 6.7 a 6.12) muestran la representación conjunta de los incendios (puntos) y los factores *Bottom-Up* (vectores) sobre los dos primeros componentes principales. Alrededor del 46% de la varianza es explicada por ambos componentes en todos los gráficos generados. Dado que no se utilizaron subconjuntos de datos para el análisis, la configuración de los factores *Bottom-Up*, representados por vectores, se mantuvo constante en todos los *biplots* generados. Por su proyección aislada, la temperatura resultó ser la variable con menor correlación positiva a otros factores, similar a lo encontrado en los gráficos de correlación por tipo de vegetación; el ángulo opuesto con respecto al NDVI representa una alta correlación negativa con esta variable, y el ángulo pequeño con el primer componente principal implica que la contribución de la temperatura a este eje fue alta. Por su proximidad y ángulo pequeño, se observan dos conjuntos de variables correlacionadas positivamente: NDVI y precipitación, por un lado, y distancia a campos agrícolas, distancia a caminos y pendiente por el otro. La elevación y orientación de ladera no se correlacionaron con otros factores (ángulo $\sim 90^\circ$), sin embargo, entre ellas existió correlación negativa (cuadrantes opuestos); la longitud reducida del vector de orientación de ladera señala que la variabilidad capturada por los gráficos no fue adecuada, es decir, la influencia de esta variable sobre la incidencia de incendios no está bien representada por los primeros dos componentes principales.

La Figura 6.7 muestra la distribución de las observaciones correspondientes a incendios forestales y quemas agropecuarias. Se observa una clara distinción entre ambos tipos de eventos: la mayoría de los puntos pertenecientes a quemas agropecuarias (gris) se agruparon entre la temperatura y la precipitación, con una mayor concentración hacia la temperatura. Por otro lado, los incendios forestales mostraron asociaciones con todas las variables *Bottom-Up*, con una densa agrupación de puntos cercanos a la temperatura y el origen, representando una influencia conjunta de varios factores de manera simultánea.

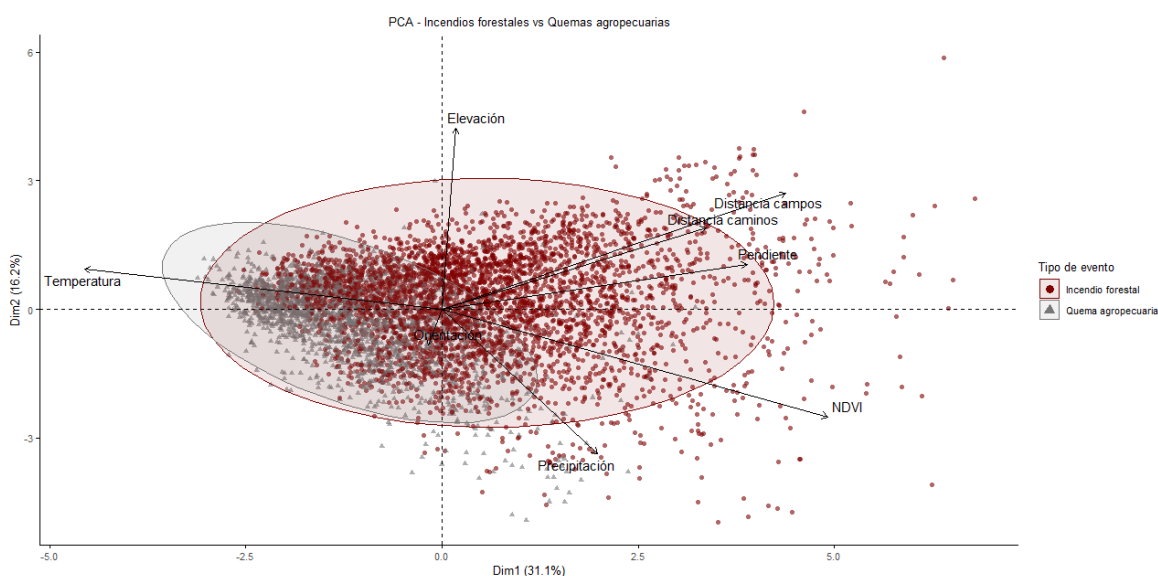


Figura 6.7. Biplot del Análisis de Componentes Principales de incendios (puntos) y variables *Bottom-Up* (vectores). Las elipses de color (tamaño determinado por un nivel de confianza de 0.95) representan las observaciones agrupadas por tipo de evento (incendios forestales vs quemas agropecuarias)

Dejando de lado las quemas agropecuarias, al agrupar los incendios forestales por tipo de vegetación (Figura 6.8) se observó que las igniciones ocurridas en el matorral/mezquital y pastizal se asociaron principalmente a la temperatura. A su vez, la mayoría de los incendios en la selva subcaducifolia y caducifolia se agruparon entre la temperatura, la precipitación y cerca del origen, representando contribución de varios controles a la vez; un menor porcentaje de estos puntos se ubicaron próximos al NDVI, pendiente, distancia a campos agrícolas y distancia a caminos. Por último, los incendios del bosque de pino-encino, los más numerosos en el área y periodo de estudio, fueron influenciados por todas las variables: un

conglomerado importante de observaciones se ubicó en los alrededores de la temperatura y del origen, mientras que otra porción más dispersa se encontró cerca del resto de las variables. Este gráfico puede interpretarse como un continuo, desde la temperatura, pasando por el origen, elevación y precipitación, hasta las distancias antrópicas, la pendiente y el NDVI. En el extremo de la temperatura se situaron los incendios ocurridos en el matorral/mezquital, y pastizal, seguidos por los incendios en la selva subcaducifolia y caducifolia, agrupados en una posición intermedia, y finalmente aquellos ocurridos en el bosque de pino-encino, la cobertura con más incendios relacionados a factores antrópicos, pendiente y NDVI, y con mayor cantidad de puntos extremos o atípicos.

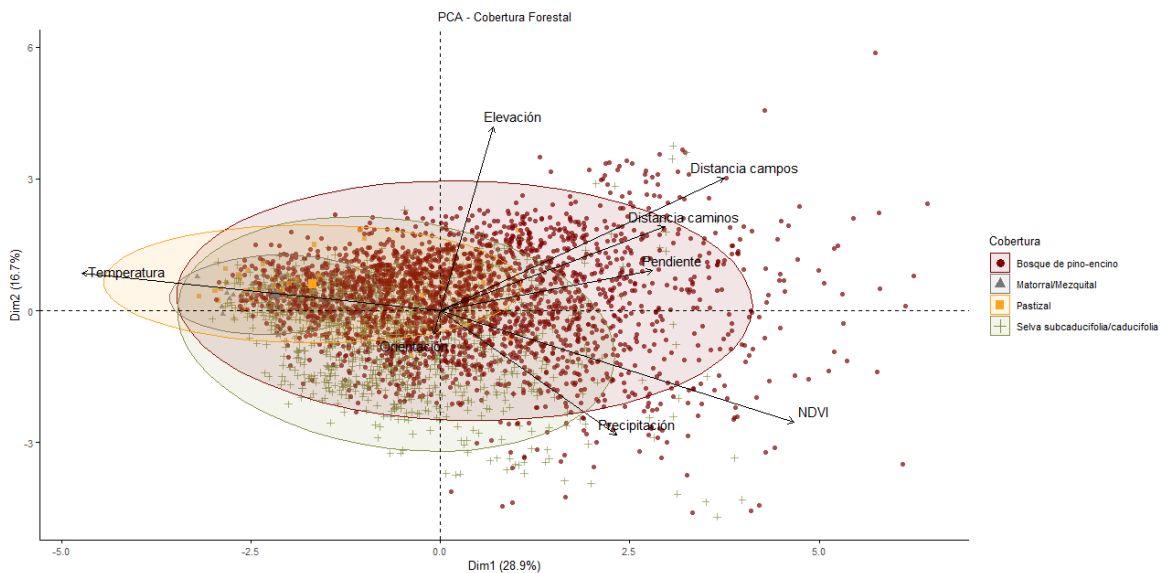


Figura 6.8. Biplot de Análisis del Componentes Principales de incendios forestales (puntos) y variables Bottom-Up (vectores). Las elipses de color (tamaño determinado por un nivel de confianza de 0.95) representan las observaciones agrupadas por cobertura de vegetación.

Al relacionar las agrupaciones de incendios por cobertura de vegetación con las agrupaciones por provincia fisiográfica (Figura 6.9) se observa que casi la totalidad de igniciones ocurridas en matorrales/mezquiales y pastizales también ocurrieron en el Eje Neovolcánico y la Mesa del Centro; la nube de puntos asociada a estas dos provincias está más orientada hacia la temperatura, aunque hay varias observaciones del Eje Neovolcánico próximas a componentes topográficos (elevación y pendiente) y antrópicos (distancias). Muchos incendios pertenecientes a la Sierra Madre Occidental también estuvieron asociados a la

temperatura, pero en conjunto se encontraron más desplazados hacia la elevación, pendiente, distancia a campos agrícolas y distancia a caminos. En contraste, la Sierra Madre del Sur reunió más observaciones orientadas hacia el NDVI y la precipitación: se trata de la provincia con menor influencia de la temperatura y elevación, y mayor influencia de la precipitación y el NDVI (así como orientación de ladera, considerando su poca contribución al gráfico); muchos incendios en esta región también se agruparon cerca de la pendiente y distancias antrópicas. Comparando con la Figura 6.8 (coberturas de vegetación) se observa que la mayoría de los incendios atípicos o extremos ocurrieron en los bosques de pino-encino de la Sierra Madre del Sur y Eje Neovolcánico.

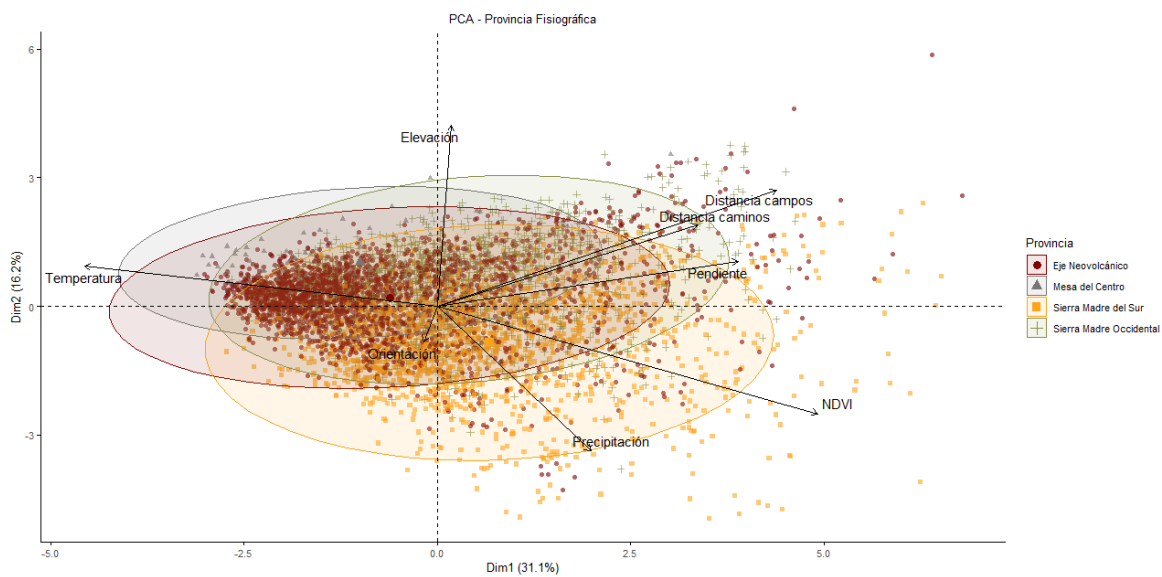


Figura 6.9. Biplot del Análisis de Componentes Principales de incendios forestales (puntos) y variables *Bottom-Up* (vectores). Las elipses de color (tamaño determinado por un nivel de confianza de 0.95) representan las observaciones agrupadas por provincia fisiográfica

Otro criterio utilizado para agrupar a los incendios forestales fue su tamaño (Figura 6.10). En general, no se observaron patrones bien definidos relacionados al tamaño de los eventos, ya que los *clusters* se superpusieron, dificultando su interpretación. Esto sugiere que a partir de los controles *Bottom-Up* no se pueden distinguir a los incendios por su tamaño, es decir, que las variables *Bottom-Up* por si solas no son suficientes para explicar la variabilidad en el tamaño de los incendios forestales.

Para observar la variabilidad temporal de los incendios en función de la regulación *Bottom-Up*, el análisis también se realizó considerando el mes y año como criterio de agrupación. La Figura 6.11 ilustra el comportamiento de los incendios forestales ocurridos en los meses de marzo a junio (temporada alta de incendios) y su relación con los controles *Bottom-Up*. La tendencia general observada fue que conforme avanzaron los meses, los incendios se desplazaron desde los vectores de temperatura y elevación, hacia los de NDVI y precipitación.

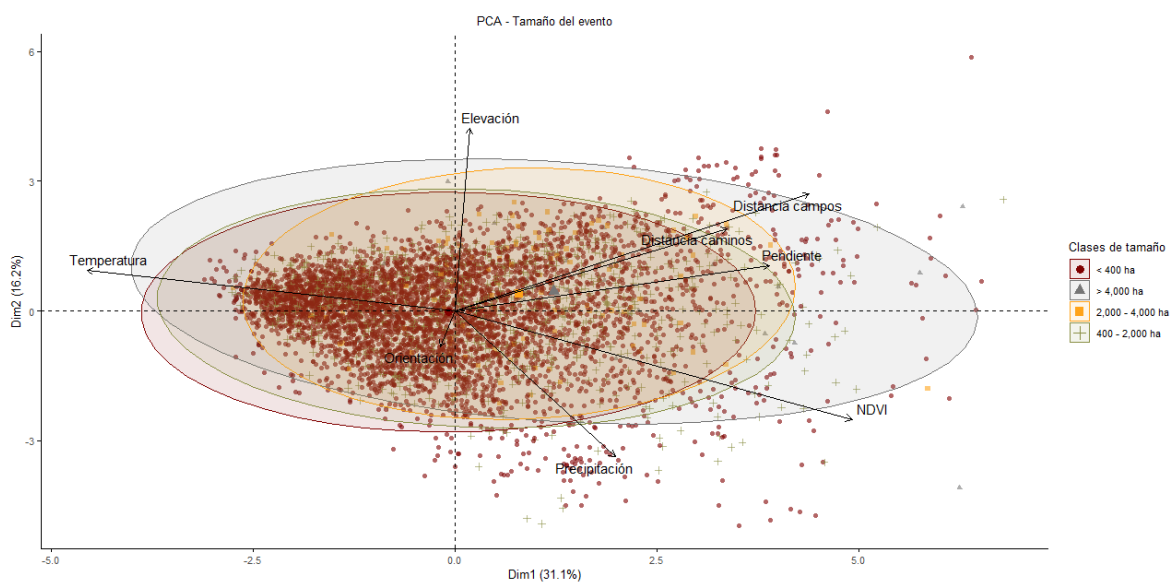


Figura 6.10. Biplot del Análisis de Componentes Principales de incendios forestales (puntos) y variables *Bottom-Up* (vectores). Las elipses de color (tamaño determinado por un nivel de confianza de 0.95) representan las observaciones agrupadas por clases de tamaño.

En marzo, la variable con mayor influencia en la ocurrencia de incendios fue la temperatura puesto que la mayoría de las observaciones se concentraron cerca de esta variable. En abril el patrón fue similar; sin embargo, variables topográficas como la elevación y pendiente, y variables antrópicas como la distancia a caminos y campos agrícolas, cobraron más relevancia; en consecuencia, la elipse de este mes se posicionó ligeramente más desplazada hacia estos factores en comparación con las observaciones de marzo. La nube de puntos en mayo, el mes con mayor incidencia de incendios en el sitio y periodo de estudio, se concentró alrededor de la temperatura, orientación de ladera y el origen; de igual forma, muchos eventos en este mes se relacionaron a las distancias agrícolas y pendiente. Por último, las

observaciones más cercanas al NDVI y precipitación correspondieron a los incendios ocurridos en junio; otros puntos también se aproximaron a la temperatura, la distancia a campos agrícolas, distancia a caminos y pendiente. Junio es un mes de transición entre la época seca y la época lluvias, por lo que es congruente pensar que tanto la precipitación como el NDVI jugaron un papel importante en la incidencia de incendios de este mes.

Contrastando con las agrupaciones por cobertura de vegetación y provincia fisiográfica, se advierte que los incendios en el matorral/mezquital y pastizal se originaron principalmente entre abril y mayo, mientras que los incendios en el bosque de pino-encino y selva subcaducifolia y caducifolia ocurrieron durante toda la temporada seca. En junio los incendios sucedieron principalmente en las selvas subcaducifolias/caducifolias y bosques de pino-encino de la Sierra Madre del Sur (observaciones más cercanas al NDVI y precipitación) y Sierra Madre Occidental (observaciones más cercanas al centro del gráfico).

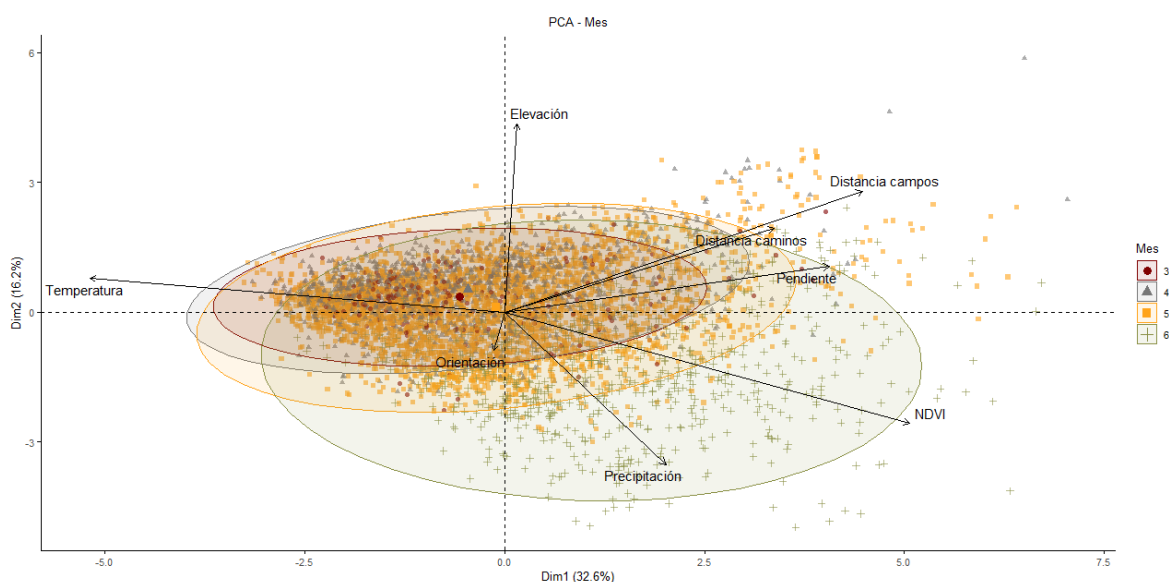


Figura 6.11. Biplot del Análisis de Componentes Principales de incendios forestales (puntos) y variables *Bottom-Up* (vectores). Las elipses de color (tamaño determinado por un nivel de confianza de 0.95) representan las observaciones agrupadas por los meses de la temporada alta de incendios: marzo (3), abril (4), mayo (5) y junio (6).

Con respecto a la variabilidad anual (Figura 6.12), se eligieron únicamente los años más contrastantes del periodo de estudio: 2002, 2014 y 2015 (años con menor incidencia), y 2005,

2011 y 2017 (años con mayor incidencia). La baja frecuencia de incendios en 2014 y 2015 favoreció la conformación de *clusters* bien definidos; en 2015 la precipitación explicó la mayor variabilidad en el comportamiento de los incendios y en 2014 las observaciones se localizaron cerca de la precipitación, pero también de la temperatura. Estos patrones indican que las variables meteorológicas desempeñaron una función importante en años con baja ocurrencia de incendios. En 2002, el tercer año con menor número de eventos, otras variables además de las meteorológicas, como el NDVI, pendiente y distancia a campos agrícolas, cobraron importancia. En general, conforme aumentó el número de igniciones, también lo hizo el número de variables con influencia sobre los incendios; los registros de años con alta incidencia de incendios (2005, 2011 y 2017) se distribuyeron a lo largo de todo el gráfico. Adicionalmente, muchas observaciones atípicas estuvieron asociadas a años con una alta frecuencia de igniciones.

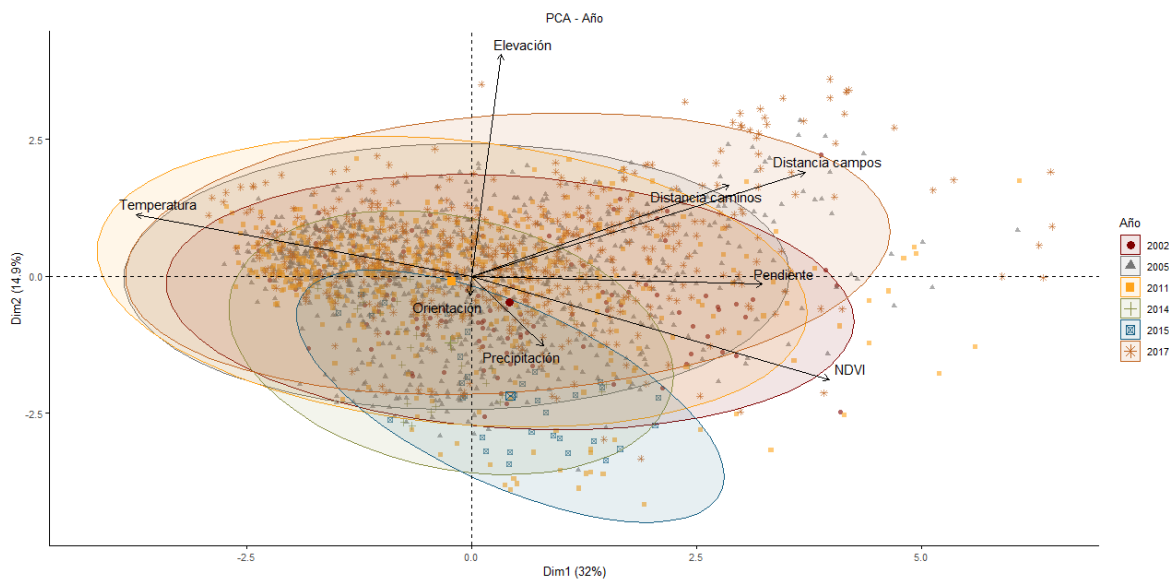


Figura 6.12. Biplot del Análisis de Componentes Principales de incendios forestales (puntos) y variables *Bottom-Up* (vectores). Las elipses de color (tamaño determinado por un nivel de confianza de 0.95) representan las observaciones agrupadas por años con alta y baja incidencia de incendios.

6.3 Análisis Top-Down

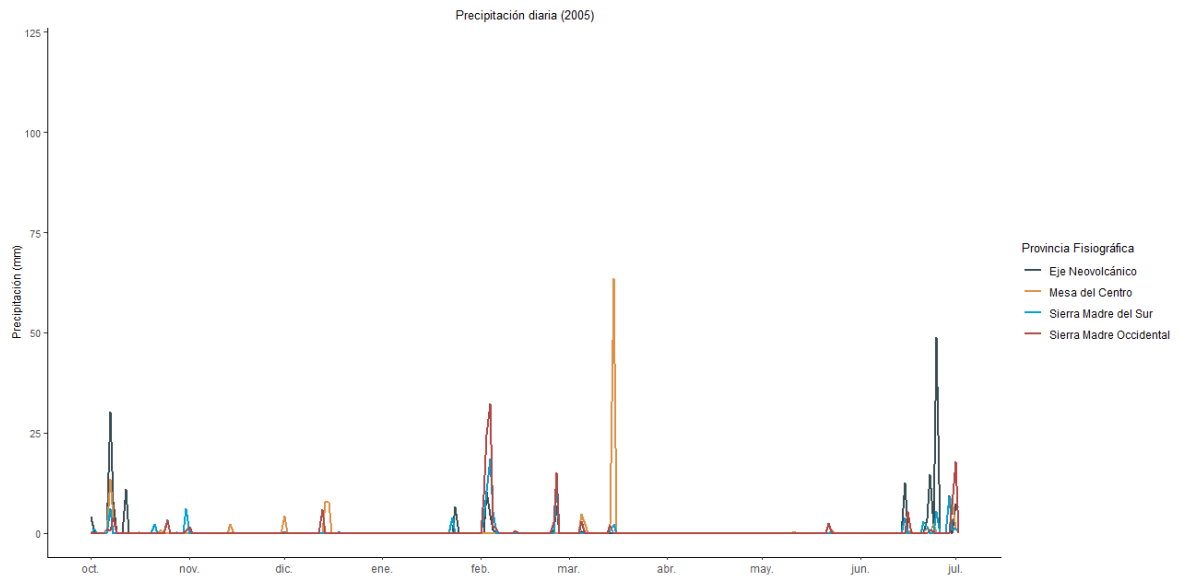
6.3.1 Patrones climáticos

La climatología de los años seleccionados evidenció que en la mayoría de los casos hubo una sincronía anual en los patrones de precipitación y temperatura diaria de las distintas provincias fisiográficas. Asimismo, se observó que el comportamiento de la temperatura y precipitación fue contrastante entre años con alta y baja incidencia de incendios.

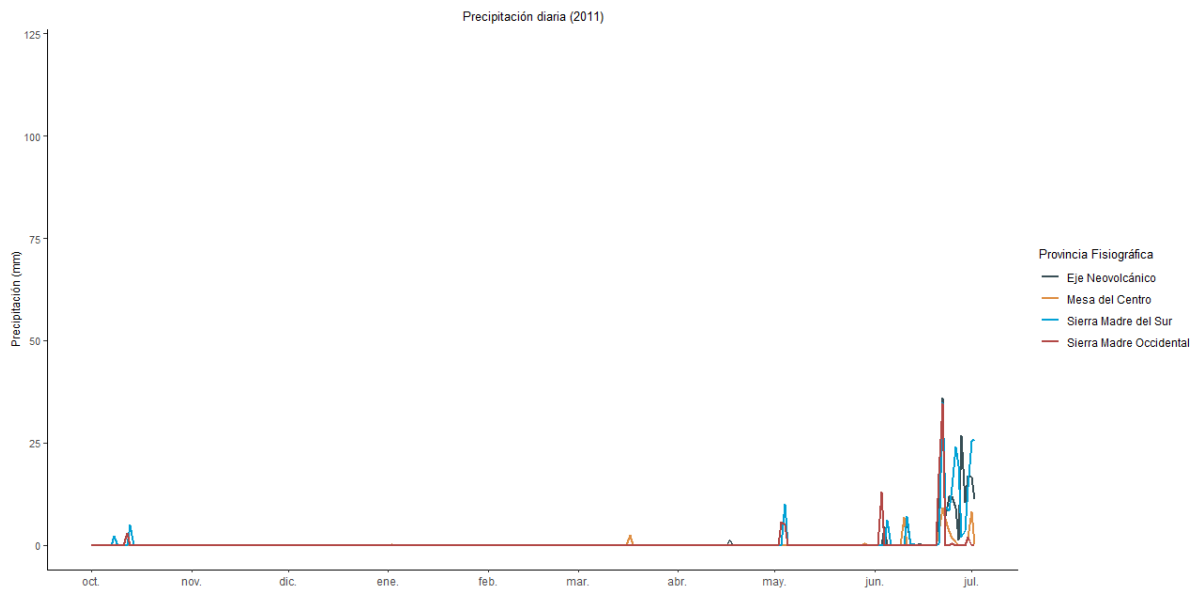
Las Figuras 6.13 A-B muestran la precipitación diaria de los años con mayor incidencia de incendios del periodo de estudio. En 2005 las cuatro regiones fisiográficas recibieron poca precipitación en los meses previos a la época seca (octubre a febrero), principalmente en el periodo de noviembre a enero (Figura 6.14 A). Durante la temporada seca, únicamente se registraron lluvias a mediados de marzo en la región de la Mesa del Centro, mientras que en los meses subsiguientes no se observaron eventos de precipitación, lo cual apunta a una sequía marcada en este año. Adicionalmente, se encontró que, a lo largo del estado, las primeras precipitaciones se registraron hacia finales de junio; este patrón contrasta con datos históricos que indican que generalmente la temporada de lluvias da inicio a finales de mayo o principios de junio (CONAGUA 2022), sugiriendo que en 2005 se experimentó una prolongación atípica de la temporada seca.

En 2011 (Figura 6.13 B) las condiciones de sequía fueron muy evidentes y prevalecieron durante casi toda la primera mitad del año: la precipitación fue nula durante los meses antecedentes a la época seca y durante la época seca, con excepción de lluvias poco abundantes a inicios de mayo. En este caso la época lluviosa comenzó a principios de junio, aunque eventos de mayor magnitud ocurrieron hasta julio. La sequía observada en este año se presentó por igual en las cuatro provincias del estado de Jalisco. En el caso de 2017, la sequía no fue tan pronunciada como en 2011 ni tan prolongada como en 2005 (Figura 6.13 C); sin embargo, la precipitación fue escasa a lo largo de todos los meses analizados. En la época antecedente (octubre a diciembre de 2016) se registraron lluvias por debajo de los 25 mm diarios, seguidas por precipitaciones menores a 10 mm desde enero hasta mayo, con eventos poco frecuentes y numerosos días sin lluvia. En este año la temporada de lluvias comenzó a mediados de junio, aunque con eventos de baja magnitud.

A)



B)



C)

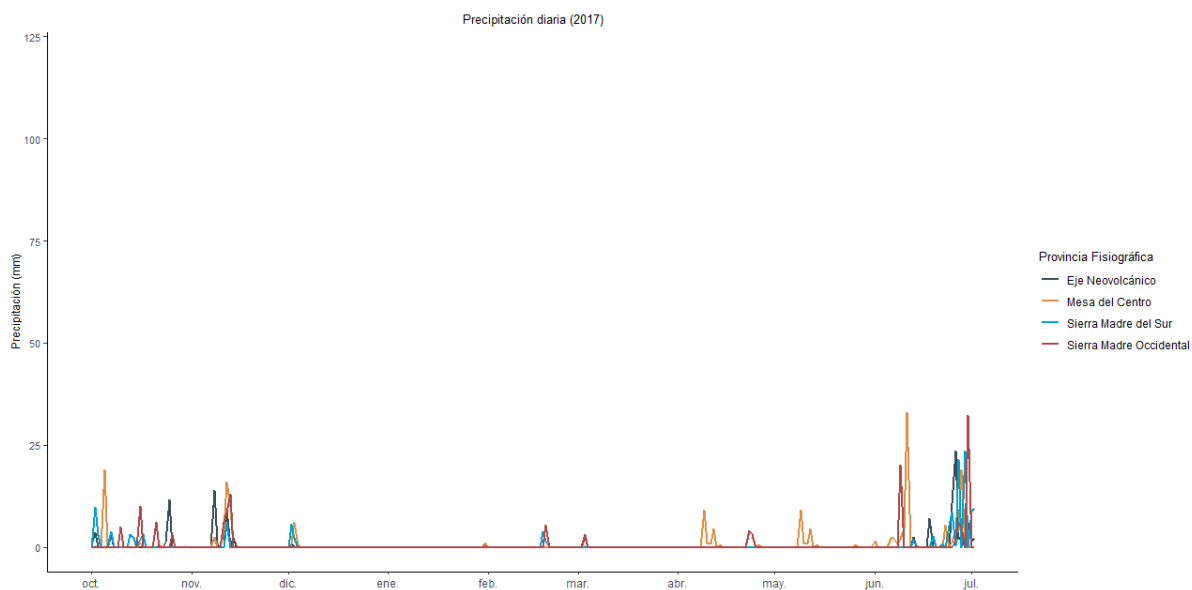


Figura 6.13 A-C. Precipitación diaria en los meses de la época de final de lluvias (octubre a febrero) y de la época seca (marzo a junio) de años con alta incidencia de incendios A) 2005, B) 2011 y C) 2017.

La información proviene de cuatro estaciones climatológicas localizadas a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco.

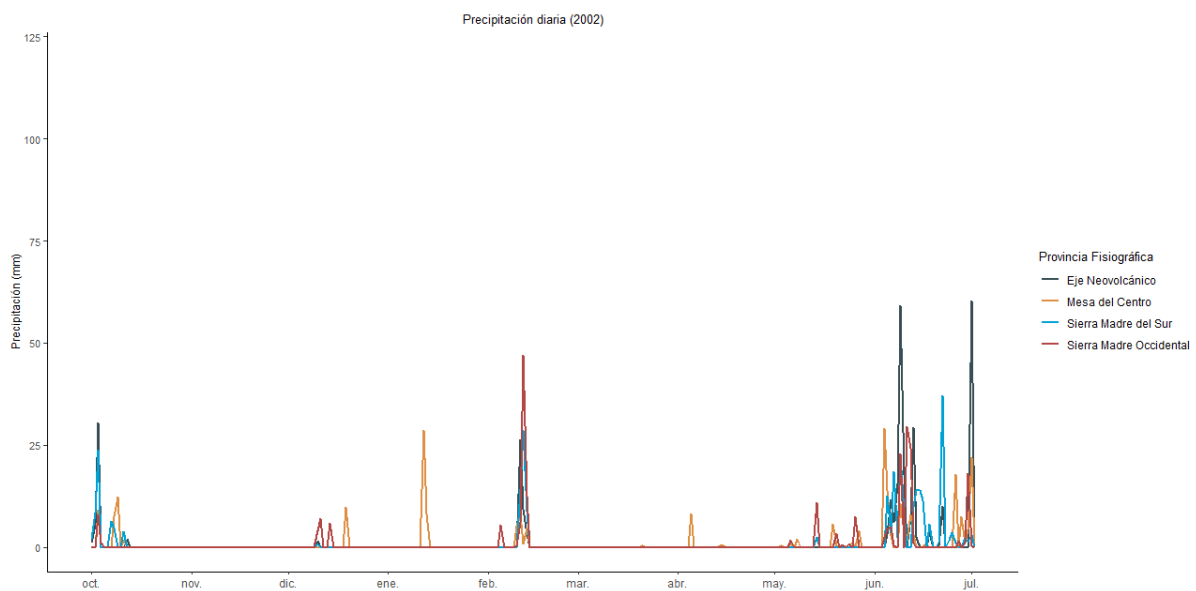
La variabilidad temporal de la precipitación en años con baja incidencia de incendios (Figuras 6.14 A-C) resultó ser muy distinta a la descrita anteriormente. Especialmente en 2014 y 2015, años con una frecuencia de incendios muy por debajo de la media, los patrones de precipitación presentaron un marcado contraste con lo observado en 2005, 2011 y 2017. En 2014 (Figura 6.14 A) la precipitación antecedente (octubre a noviembre de 2013) superó los 25 mm diarios, con eventos que se presentaron de manera consecutiva; asimismo, a finales de diciembre (2013) y principios de enero, las lluvias rebasaron los 40 mm por día. Si bien las lluvias fueron escasas de febrero a abril, en mayo se registraron precipitaciones asociadas al inicio de la temporada lluviosa.

El análisis de la serie de precipitación diaria en 2015 revela un año marcado por condiciones húmedas (Figura 6.14 B). De octubre a febrero, se registraron lluvias frecuentes en todas las provincias fisiográficas, superando los 30 mm diarios. En marzo, al inicio de la temporada de incendios, se observaron precipitaciones significativas, alcanzando 110 mm diarios en la

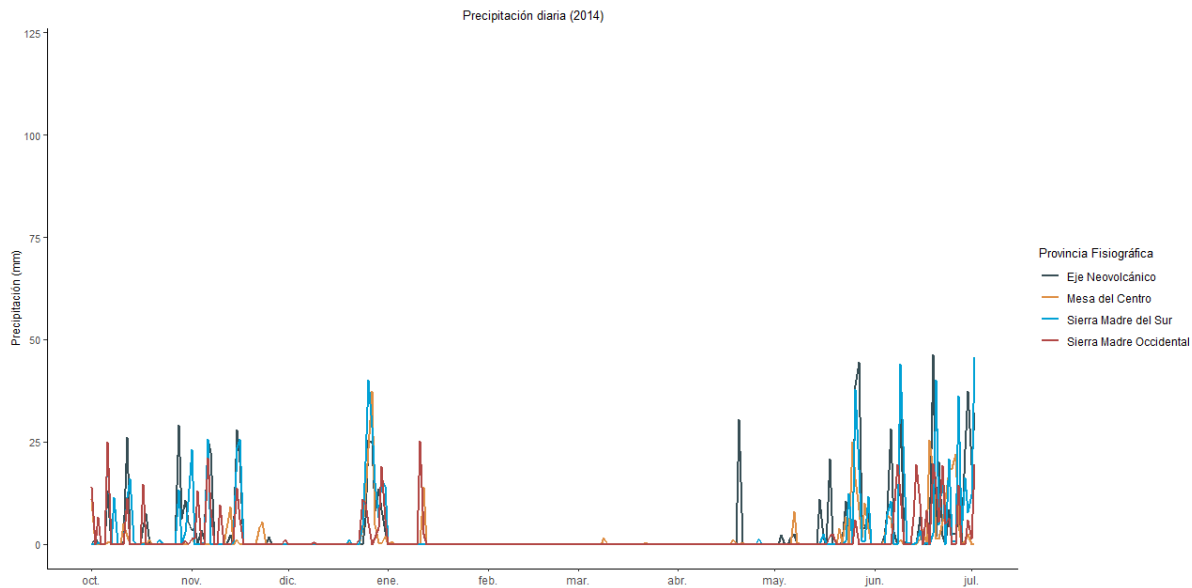
Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico, y alrededor de 45 mm diarios en la Mesa del Centro y Sierra Madre Occidental. Abril presentó lluvias ligeras, mientras que mayo marcó el comienzo de la temporada de lluvias, similar al patrón observado en 2014.

Dado que en 2022 las lluvias no fueron tan abundantes, el contraste con años de alta incidencia de incendios fue menos evidente (Figura 6.14 C). La mayor precipitación antecedente (octubre a diciembre de 2021; enero a febrero de 2022) ocurrió en los meses de octubre y febrero, este último con eventos de hasta 50 mm diarios. La precipitación fue poco abundante durante marzo y abril a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas, pero al igual que en 2014 y 2015, mayo marcó el inicio de la temporada de lluvias.

A)



B)



C)

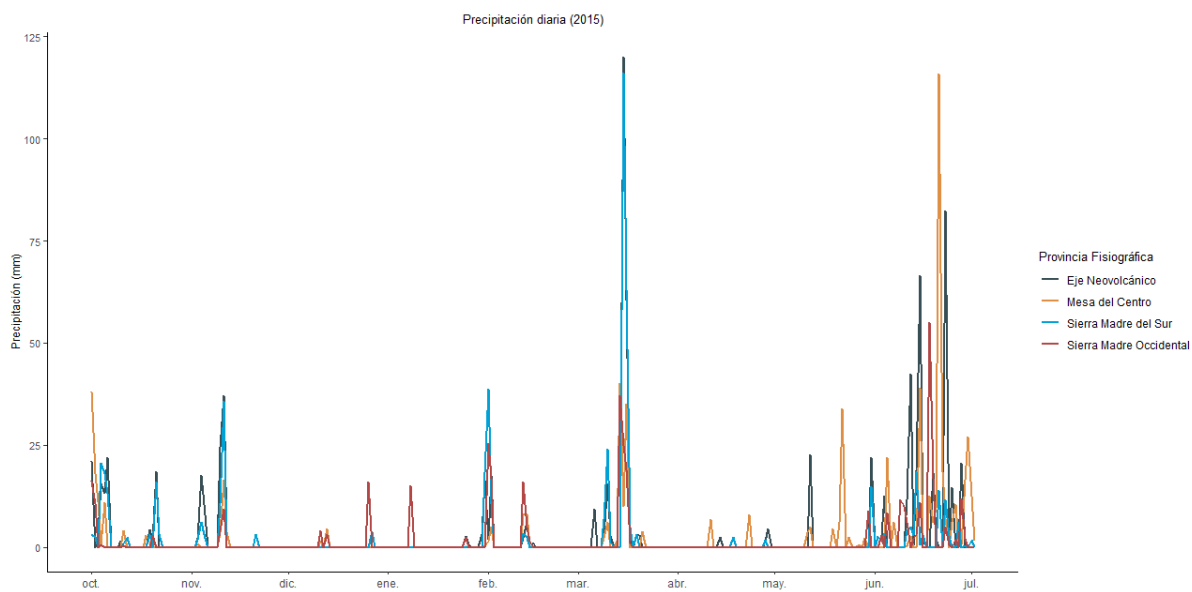


Figura 6.14 A-C. Precipitación diaria en los meses de la época de final de lluvias (octubre a febrero) y de la época seca (marzo a junio) de años con baja incidencia de incendios A) 2014, B) 2015 y C) 2002.

La información proviene de cuatro estaciones climatológicas localizadas a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco.

Los valores del SPI (Standardized Precipitation Index) obtenidos para cada mes de los años analizados corroboraron los patrones previamente identificados en las series de tiempo de precipitación diaria (Figura 6.15). Siguiendo la clasificación de Giddings et al. (2005), se encontró que en 2014 los meses antecedentes a la época seca presentaron condiciones muy húmedas ($+1.5 < \text{SPI} < +2.0$), y húmedas ($+1.0 < \text{SPI} \leq +1.5$), reflejando una humedad notoria antes de la llegada de la temporada de sequía. Además, durante la época seca, los meses de marzo y abril exhibieron condiciones normales ($-0.5 \leq \text{SPI} \leq +0.5$), mientras que mayo y junio se clasificaron como meses húmedos. Por otro lado, en 2015 la mayoría de los meses previos a la temporada seca presentaron condiciones normales o ligeramente húmedas ($+0.5 < \text{SPI} \leq +1.0$); sin embargo, destaca el aumento significativo en la humedad durante la época seca, en los meses de marzo a mayo. En este período, los valores del SPI alcanzaron niveles que califican como muy húmedos y extremadamente húmedos ($\text{SPI} \geq 2.0$), indicando un patrón anómalo de condiciones de humedad. En comparación con el año anterior, 2014, donde los meses antecedentes fueron más húmedos, 2015 mostró un aumento notorio en la humedad durante la temporada seca.

En el año 2002, se observó que a lo largo de la época previa a la temporada seca (octubre a febrero), los valores del SPI fueron predominantemente negativos, indicando condiciones ligeramente secas ($-1.0 \leq \text{SPI} < -0.5$) a normales. Sin embargo, a medida que se acercó la temporada de incendios, los valores del SPI mostraron un aumento en la humedad, sugiriendo condiciones ligeramente húmedas. Este patrón de variación en 2002 resalta que, a pesar de comenzar con condiciones relativamente secas en la época antecedente, el año experimentó un cambio hacia condiciones más húmedas a medida que se acercaba la temporada de incendios. En contraste, los valores del SPI en 2005 revelaron un comportamiento opuesto: condiciones ligeramente húmedas se presentaron en los meses de noviembre y diciembre del año previo, y durante el periodo de enero a abril el comportamiento fue similar a 2002. No obstante, en mayo y junio las condiciones fueron secas ($-1.5 \leq \text{SPI} < -1.0$) y muy secas ($-2.0 \leq \text{SPI} < -1.5$) respectivamente, marcando un cambio abrupto en la tendencia y estableciendo un contraste distintivo entre ambos años, lo que se reflejó en la incidencia de incendios.

El patrón de valores del SPI en 2011 destaca por las condiciones secas y, en algunos casos, de sequía extrema ($\text{SPI} \leq -2.0$) en los meses antecedentes a la temporada de incendios. En

particular, en diciembre del año previo (2010), se registró un valor del SPI de -2.27, el más bajo entre los años analizados. Aunque en los meses de la temporada alta de incendios (marzo a junio) los valores del SPI no llegaron a ser tan bajos como en 2017 y 2005, las condiciones secas previas fueron lo suficientemente pronunciadas como para crear un ambiente propicio para la ignición y propagación del fuego.

Finalmente, los valores del SPI para 2017 indican que este año estuvo mayormente caracterizado por condiciones de humedad relativa cercanas a la normalidad o ligeramente secas. Los meses de la época antecedente (octubre a febrero), así como gran parte de la época seca, mostraron valores negativos de SPI cercanos al cero, sugiriendo condiciones normales o una ligera tendencia hacia la sequía. No obstante, en mayo los valores del SPI mostraron un cambio hacia condiciones más secas, y junio se clasificó como un mes muy seco. Similar a lo observado en 2005, la transición hacia condiciones de sequedad durante mayo y junio, meses críticos para la incidencia de incendios, podría haber influido en la alta incidencia de incendios forestales durante ese período.

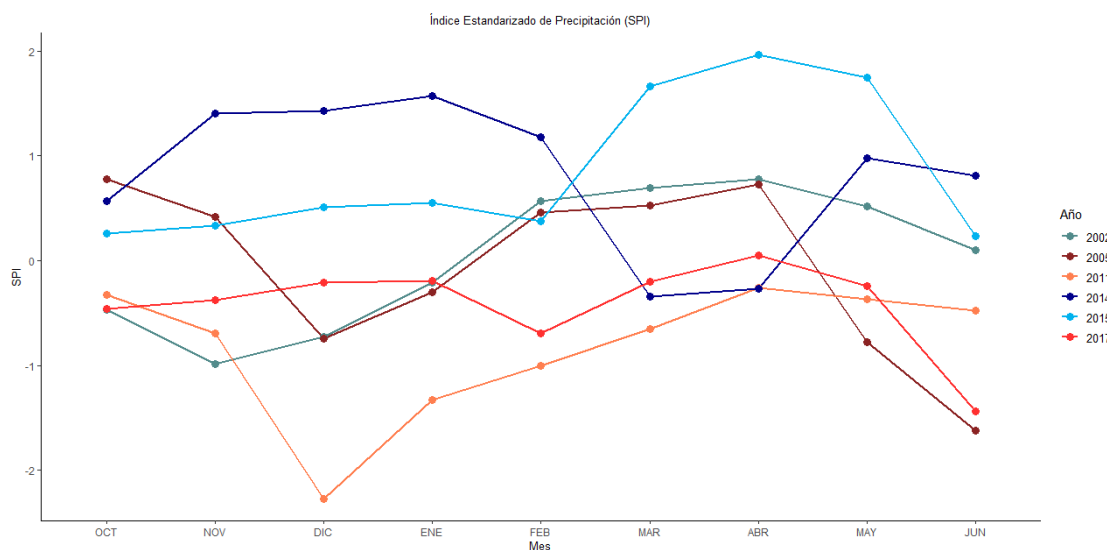


Figura 6.15 Valores mensuales promedio del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) de 15 estaciones climatológicas distribuidas a lo largo del estado de Jalisco. Cada punto en el gráfico representa el valor del SPI en un mes; las líneas de diferentes colores indican los años analizados. Los años con alta incidencia de incendios forestales se muestran en tonos rojos, mientras que los años con

baja incidencia se muestran en tonos azules. La figura ilustra la distinción entre ambos tipos de años en términos de los valores del SPI.

En lo que respecta a la temperatura, se identificó un comportamiento similar en los valores máximos diarios a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas de Jalisco. En términos generales, se observó que durante los años con una alta incidencia de incendios (2005, 2011 y 2017), el promedio de temperatura máxima superó a los años con baja incidencia de incendios (2002, 2014, 2015). Asimismo, resultó evidente que, en la mayoría de los casos, los años con alta incidencia de incendios presentaron promedios de temperatura máxima mensual por encima de las normales climatológicas, tanto durante la época seca (marzo a junio) como en la época antecedente (octubre a febrero) (Tabla 6.4). Por el contrario, años con baja incidencia de incendios exhibieron promedios de temperatura máxima mensual por debajo de las normales climatológicas para ambas épocas.

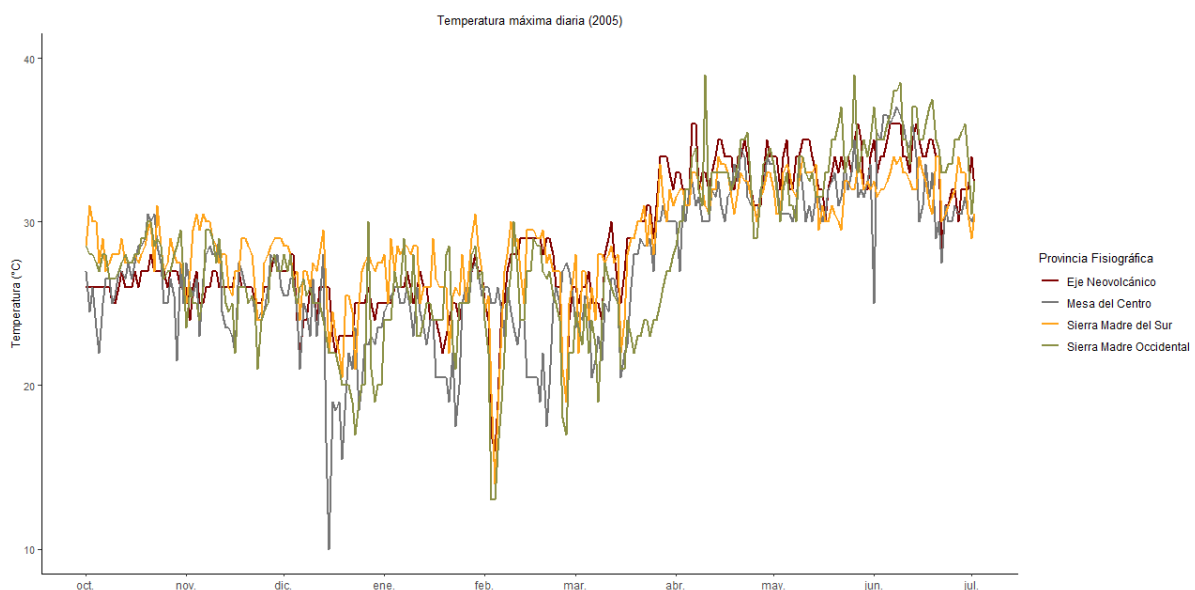
En 2005 (Figura 6.16 A) se observó un incremento pronunciado de las temperaturas máximas diarias en las cuatro provincias fisiográficas al comienzo de la época seca (aproximadamente mediados de marzo), alcanzando los 40°C. Un aspecto destacado de este año fue la persistencia de altas temperaturas máximas durante mayo y junio. En junio, el promedio mensual de temperatura máxima alcanzó su punto máximo y superó notablemente las normales climatológicas (Tabla 6.4). Este fenómeno enfatiza que la temporada de sequía en este año se extendió hasta julio, en línea con lo observado en el gráfico de SPI. Estos meses de sequía extrema y altas temperaturas contribuyeron a crear condiciones propicias para la incidencia de incendios forestales en la región.

A diferencia de 2005, en 2011 no se observó un contraste tan pronunciado entre las temperaturas máximas diarias de los meses de la época seca (marzo a junio) frente a los meses de la época antecedente (octubre a febrero) (Figura 6.16 B). Lo anterior se debió a que los meses previos a la temporada alta de incendios experimentaron temperaturas máximas elevadas, superando consistentemente a las normales históricas en las cuatro provincias de Jalisco (Tabla 6.4). Como se mencionó anteriormente, 2011 se caracterizó por la escasa precipitación y condiciones anormalmente secas durante el periodo de octubre a febrero, lo cual también se reflejó en las altas temperaturas máximas promedio durante estos meses. Asimismo, el año 2011 destacó como el más cálido de todos los años analizados

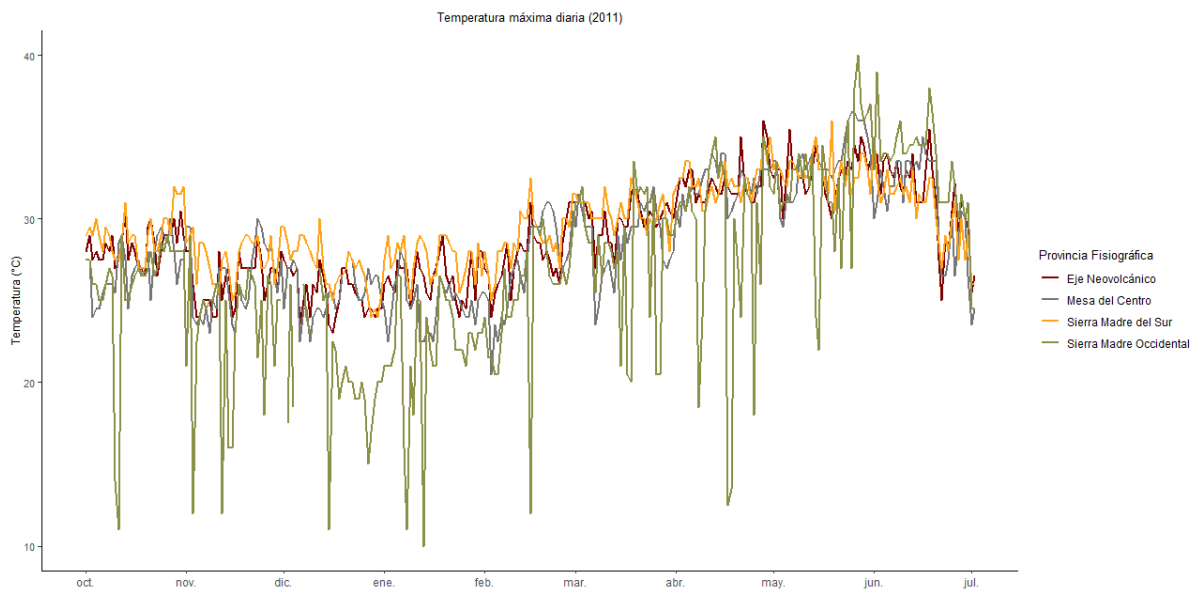
A lo largo de los meses de la época antecedente de 2017, se observó una mayor variabilidad en los valores de temperatura máxima en las cuatro provincias fisiográficas (Figura 16.6 C). Sin embargo, al iniciar la temporada seca en marzo, se estableció un patrón sincrónico en todo el estado, con valores que alcanzaron los 40°C. Es relevante señalar que, con la excepción de un registro en la estación ubicada en la provincia de la Mesa del Centro, las temperaturas máximas promedio superaron de manera constante las normales climatológicas, tanto durante los meses previos (octubre a febrero) como durante la temporada alta de incendios (marzo a junio) (Tabla 6.4).

Similar a lo observado en 2005, en 2002 la temperatura máxima diaria mostró un incremento significativo a partir de marzo en todas las provincias fisiográficas (Figura 6.17 A). No obstante, en contraste con 2005, las temperaturas máximas diarias comenzaron a descender en mayo, indicado el comienzo de la temporada de lluvias. Asimismo, durante la época antecedente (enero y febrero), existieron dos picos inversos de bajas temperaturas máximas (alrededor de 10°C), poco antes del inicio de la temporada alta de incendios. En este año, las temperaturas máximas promedio se situaron por debajo de las normales históricas en todas las provincias, excepto en la Mesa del Centro, y durante la época seca en el Eje Neovolcánico (Tabla 6.4).

A)



B)



C)

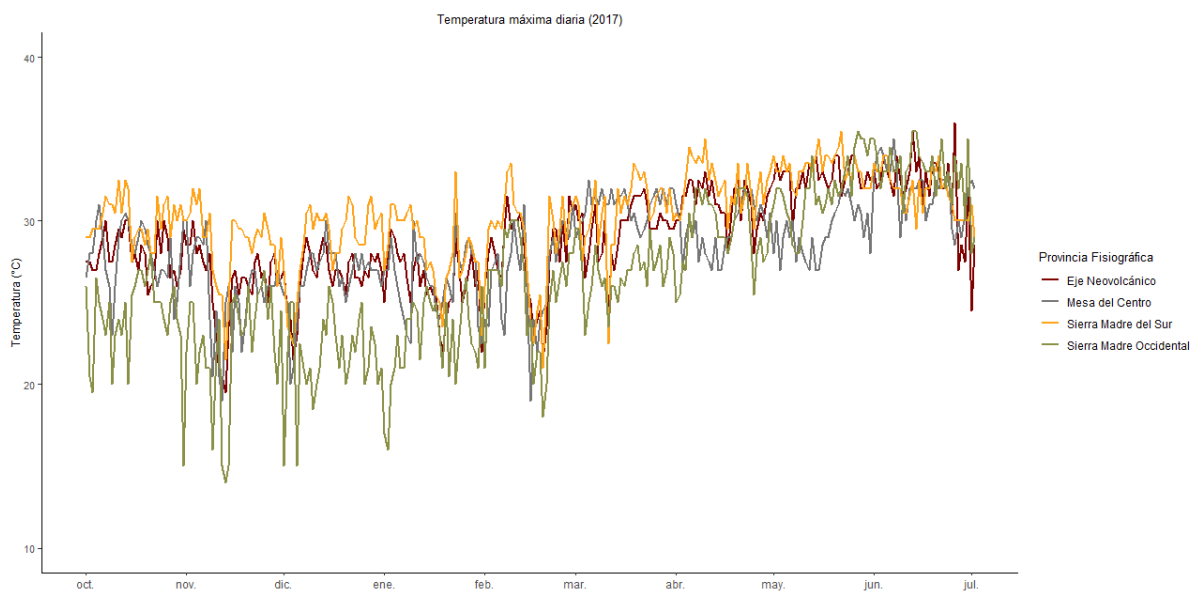
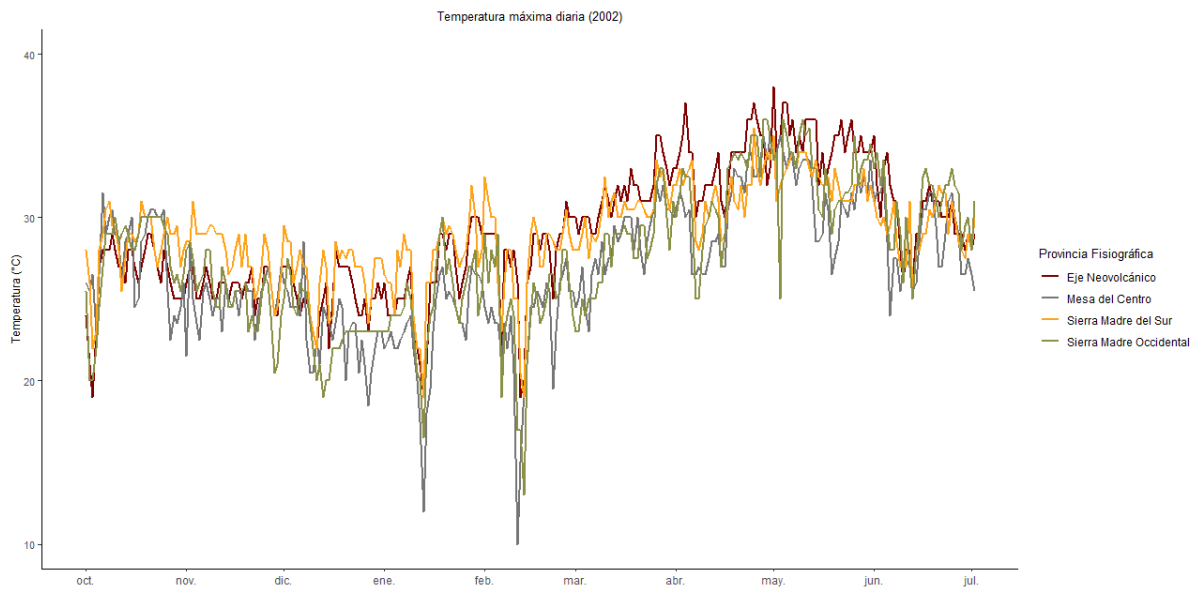


Figura 6.16 A-B. Temperatura máxima diaria en los meses de la época de final de lluvias (octubre a febrero) y de la época seca (marzo a junio) de años con alta incidencia de incendios A) 2005, B) 2011 y C) 2017. La información proviene de cuatro estaciones climatológicas localizadas a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco.

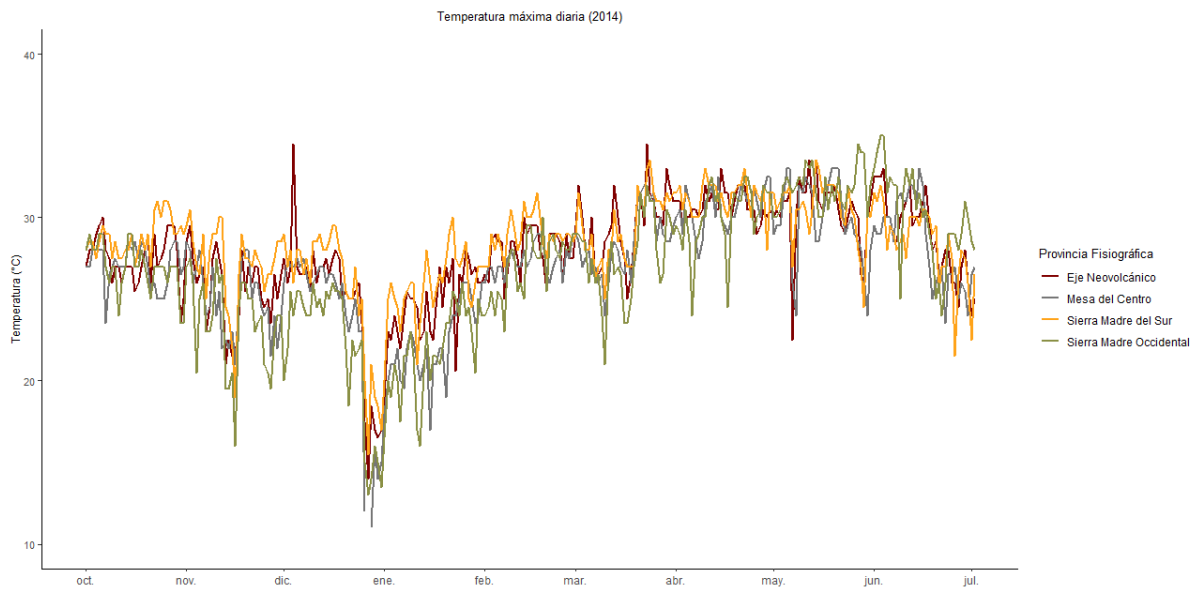
En 2014 y 2015 el contraste con años de alta incidencia de incendios fue mucho más evidente (Figura 6.17 B-C). La variación en la temperatura máxima diaria en 2014 fue semejante en las cuatro provincias fisiográficas y, en general, el promedio estuvo por debajo de las normales climáticas en las cuatro estaciones meteorológicas analizadas, particularmente durante el periodo previo a la temporada seca (octubre a febrero) (Tabla 6.4). Lo anterior coincide con la alta humedad registrada en estos meses de acuerdo al SPI. Específicamente, a finales de diciembre del 2013 se observó una marcada disminución en la temperatura máxima diaria en todas las regiones. Además, la reducción de la temperatura máxima promedio en junio (que se situó por debajo de la normal climatológica en la mayoría de las provincias) coincidió con el inicio de las lluvias en mayo.

Finalmente, en 2015 se observaron las temperaturas máximas promedio más bajas del periodo analizado, la mayoría de las cuales se situaron por debajo de las normales históricas, lo que fue especialmente evidente durante la época seca (Tabla 6.4). Este fenómeno se alinea con la alta humedad registrada con el SPI de marzo a mayo. En particular, marzo experimentó una disminución sincrónica de las temperaturas en todo el estado de Jalisco (Figura 6.17 C), coincidiendo con un evento de precipitación que superó los 100 mm (Figura 6.16 C). Similar a los años 2002 y 2014, las temperaturas máximas promedio en junio se encontraron por debajo de las normales climatológicas debido al inicio de las lluvias en mayo. En estos años, la precipitación abundante y las bajas temperaturas, tanto en los meses antecedentes como en los de la época seca, crearon condiciones frías y húmedas que limitaron la propagación del fuego.

A)



B)



C)

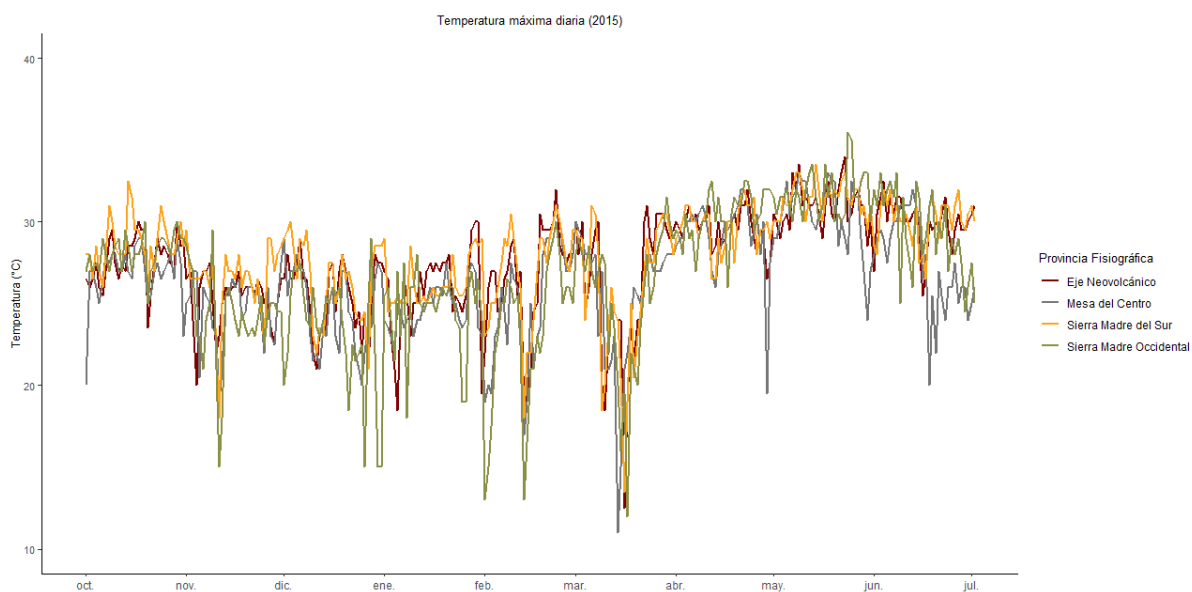


Figura 6.17 A-B. Temperatura máxima diaria en los meses de la época de final de lluvias (octubre a febrero) y de la época seca (marzo a junio) de años con baja incidencia de incendios A) 2002, B) 2014 y C) 2015. La información proviene de cuatro estaciones climatológicas localizadas a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco.

6.3.2 Variabilidad temporal del NDVI

La variabilidad temporal del NDVI mostró una estrecha relación con los patrones de precipitación y temperatura observados durante los años de estudio. De igual manera, el contraste entre años con alta y baja incidencia de incendios se vio bien reflejado en la dinámica del NDVI. Las figuras 6.18, 6.19 y 6.20 muestran los mapas de NDVI correspondientes a los años 2015 (baja incidencia de incendios), 2011 y 2005 (alta incidencia de incendios) durante tres meses representativos del periodo de interés: febrero (época antecedente), mayo (época seca) y junio (transición hacia la época de lluvias). Aunque no se realizó un análisis detallado de los valores de NDVI, estas imágenes revelaron patrones generales significativos.

Primero, se observó que conforme fue avanzando la época seca, el contraste entre los valores de NDVI de 2015 (año húmedo) en comparación con 2011 y 2005 (años secos) fue

incrementando, reflejando las variaciones en las condiciones de humedad; destaca que 2015 fue el año con los valores más elevados de NDVI en los tres meses analizados.

Tabla 6.4. Normales Climatológicas de temperatura máxima (°C) y temperatura máxima promedio (°C) de años con baja (2002, 2014, 2015) y alta (2005, 2011, 2017) incidencia de incendios. Los registros provienen de las cuatro estaciones meteorológicas de las provincias fisiográficas de Jalisco durante los períodos de octubre-febrero (época antecedente), marzo-mayo (época seca) y junio (época de transición)

Sierra Madre Occidental				Eje Neovolcánico			
	OCT-FEB	MAR-MAY	JUN		OCT-FEB	MAR-MAY	JUN
Normal	31.8	38.1	38	Normal	28.5	32.4	30.7
2002	31.7	37.9	37.2	2002	28.3	33.5	30.1
2005	32.0	38.2	41.4	2005	28.3	33.6	34.6
2011	31.9	40.7	40.5	2011	29.3	34.0	31.5
2014	30.5	39.0	37.7	2014	27.9	31.9	29.6
2015	31.7	36.3	36.2	2015	28.3	30.8	29.6
2017	33.0	39.9	41.8	2017	29.3	32.8	31.2

Mesa del Centro				Sierra Madre del Sur			
	OCT-FEB	MAR-MAY	JUN		OCT-FEB	MAR-MAY	JUN
Normal	20.0	25.3	25.5	Normal	28.4	28.4	30.3
2002	20.2	26.0	26.1	2002	27.7	27.4	28.7
2005	20.6	26.4	28.4	2005	29.9	30.0	32.8
2011	21.0	27.5	25.8	2011	29.0	30.6	32.1
2014	19.4	24.0	23.4	2014	28.2	30.4	32.0
2015	19.0	20.1	23.2	2015	28.3	27.0	27.9
2017	20.6	25.1	26.5	2017	30.1	29.7	30.4

A pesar de que el contraste fue más evidente entre 2015 y los años 2005 y 2011, también se observaron diferencias entre los años de alta incidencia de incendios. En 2005, se identificaron valores más bajos de NDVI a lo largo de la costa (provincia de la Sierra Madre del Sur) durante el mes de mayo, lo que sugiere una mayor sequía y estrés hídrico en la vegetación. Este patrón coincide con el valor promedio del SPI en mayo de 2005, que fue clasificado como "seco"; por otro lado, mayo de 2011 se categorizó como un mes "normal". Finalmente, junio reveló el contraste más notable entre los tres meses. En 2015, la vegetación mostró una marcada vigorosidad en todo el estado de Jalisco, reflejando condiciones de humedad elevada. En 2011, gran parte del estado ya presentaba valores altos de NDVI,

indicando la presencia de lluvias. Por el contrario, en 2005, los valores bajos de NDVI persistieron, mostrando la prolongación de las condiciones de sequía encontradas anteriormente. Estos hallazgos respaldan la idea de que el NDVI puede ser un indicador valioso para predecir y comprender la ocurrencia de incendios forestales en la región.

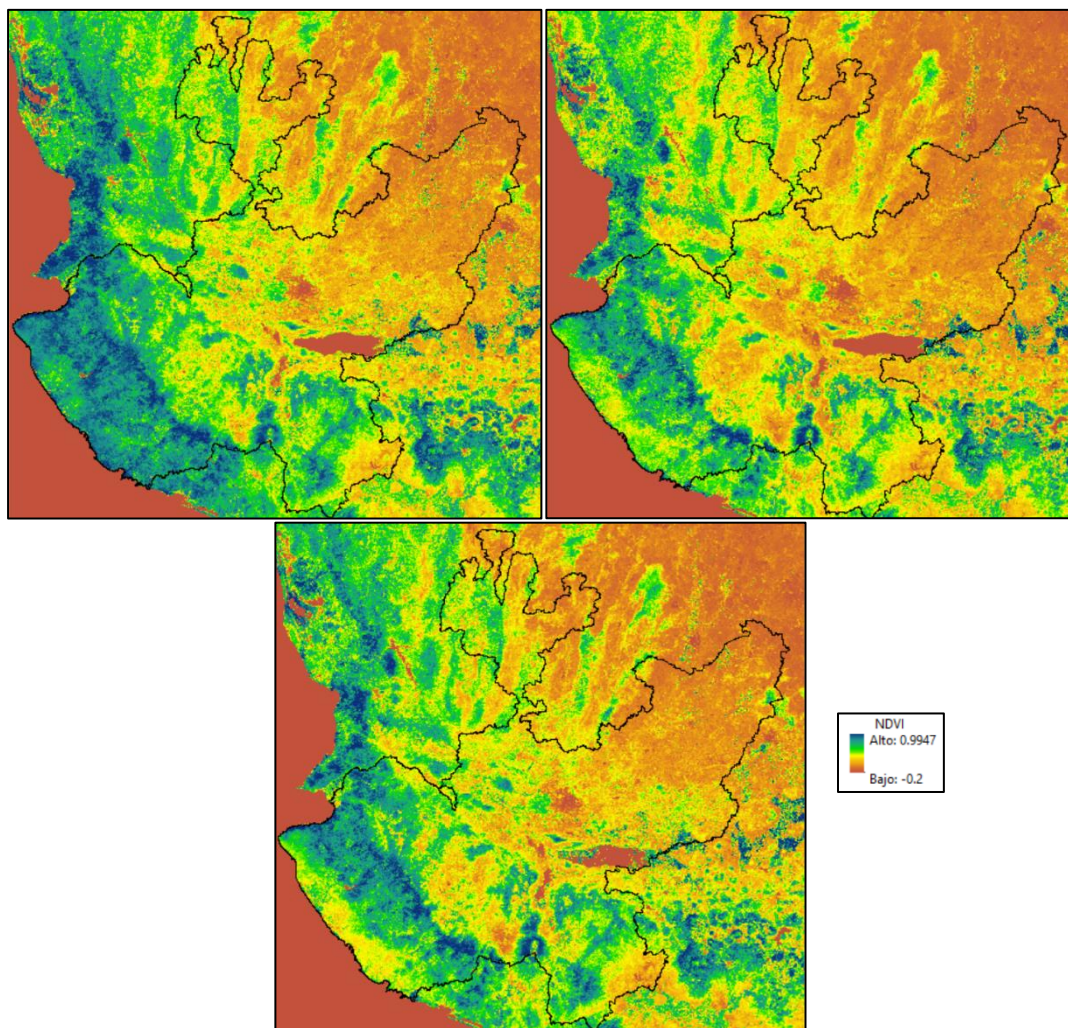


Figura 6.18. Ráster de NDVI correspondiente al mes de febrero en 2015 (arriba izquierda), 2011 (arriba derecha) y 2005 (abajo centro). Las imágenes ilustran las variaciones en la actividad fotosintética de la vegetación durante el periodo previa al inicio de la temporada de incendios, destacando las diferencias en las condiciones de humedad y verdor de la vegetación en cada año. Valores altos de NDVI indican un mayor verdor y humedad de la vegetación, mientras que valores bajos reflejan condiciones de menor humedad.

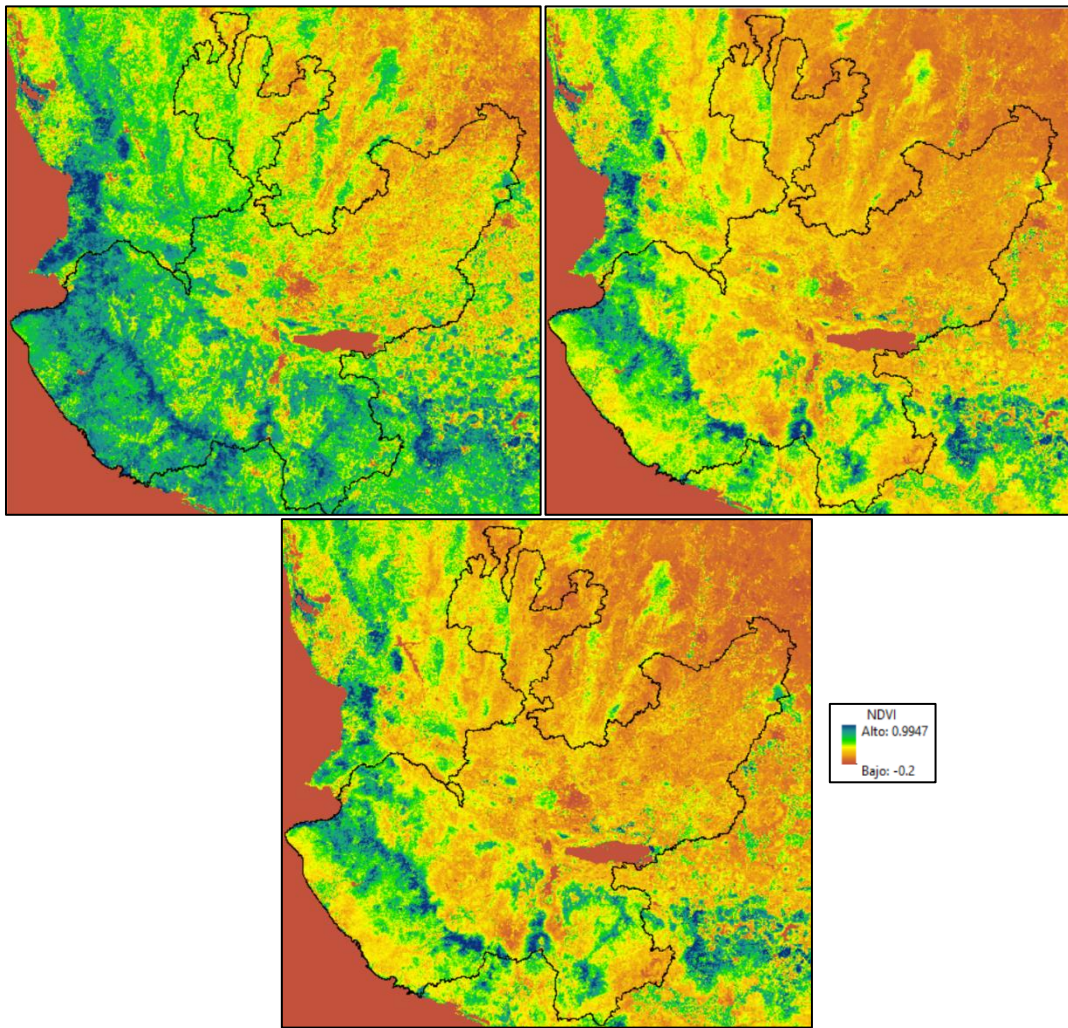


Figura 6.19. Ráster de NDVI correspondiente al mes de mayo en 2015 (arriba izquierda), 2011 (arriba derecha) y 2005 (abajo centro). Las imágenes ilustran las variaciones en la actividad fotosintética de la vegetación durante la época de sequía, destacando las diferencias en las condiciones de humedad y verdor de la vegetación en cada año. Valores altos de NDVI indican un mayor verdor y humedad de la vegetación, mientras que valores bajos reflejan condiciones de menor humedad

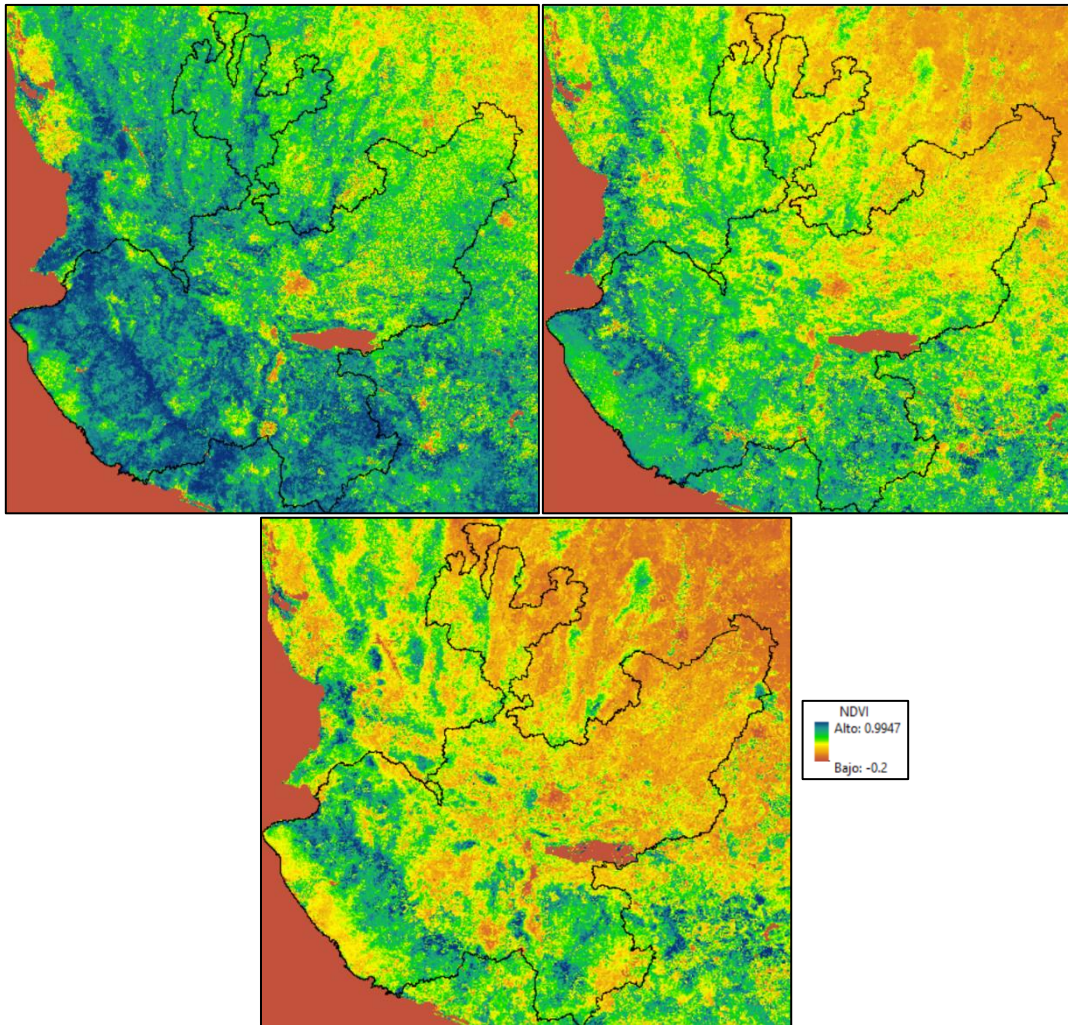


Figura 6.20. Ráster de NDVI correspondiente al mes de junio en 2015 (arriba izquierda), 2011 (arriba derecha) y 2005 (abajo centro). Las imágenes ilustran las variaciones en la actividad fotosintética de la vegetación durante el periodo de transición entre la época seca y la época de lluvias, destacando las diferencias en las condiciones de humedad y verdor de la vegetación en cada año. Valores altos de NDVI indican un mayor verdor y humedad de la vegetación, mientras que valores bajos reflejan condiciones de menor humedad

6.3.3 Patrones de incidencia de incendios

Los mecanismos *Top-Down* que dieron lugar a los patrones de precipitación, temperatura y NDVI observados, también ocasionaron sincronía anual en la incidencia de incendios a lo largo del estado de Jalisco. Durante los años seleccionados, tanto incendios forestales como quemas agropecuarias se vieron influenciados por la variabilidad climática a gran escala.

La baja incidencia de incendios en 2002, 2014 y 2015 se extendió a lo largo de las distintas provincias fisiográficas de Jalisco. De los 3,858 incendios forestales totales registrados durante el periodo de estudio, en 2002 ocurrieron 26 eventos en el Eje Neovolcánico, 27 en la Sierra Madre del Sur y 9 en la Sierra Madre Occidental (1.61%). En 2014, solamente se reportaron 2 incendios forestales en el Eje Neovolcánico, 10 en la Sierra Madre del Sur y 3 en la Sierra Madre Occidental (0.39 %). Por último, en 2015, tan solo se documentaron 6 eventos en la Sierra Madre del Sur (0.16%). La tendencia fue similar en lo que respecta a las quemadas agropecuarias: de las 1,885 quemadas agropecuarias totales registradas durante el periodo de estudio, en 2002 se originaron 15 quemadas en el Eje Neovolcánico, 2 en la Mesa del Centro, 7 en la Sierra Madre del Sur y 3 en la Sierra Madre Occidental (1.43%); en 2014, hubo 7 quemadas en el Eje Neovolcánico, 4 en la Mesa del Centro, 5 en la Sierra Madre del Sur y 2 en la Sierra Madre Occidental (0.95%); finalmente, en 2015 se registraron 7 quemadas en el Eje Neovolcánico, 1 en la Mesa del Centro, 16 en la Sierra Madre del Sur y 2 en la Sierra Madre Occidental (1.38%).

Por otro lado, la alta incidencia de incendios en 2005, 2011 y 2017 estuvo presente a lo largo de todo el estado de Jalisco. La Tabla 6.5 muestra la superficie quemada total por incendios forestales en las tres principales provincias fisiográficas de la entidad durante los meses de la época seca, así como el porcentaje que esta superficie representó del total incendiado en cada región. Los incendios forestales ocurridos entre 2005, 2011 y 2017 representaron un porcentaje significativo del área quemada total en cada una de las provincias: el 40% en el Eje Neovolcánico, el 32.55% en la Sierra Madre del Sur y el 45.84% en la Sierra Madre Occidental.

La sincronía más evidente se observó en 2005, reflejada en la similitud de los patrones de área quemada en todo el sitio de estudio. Este año destacó por registrar la mayor cantidad de hectáreas forestales incendiadas en todas las provincias fisiográficas, con aproximadamente un 20% de área quemada total en cada caso. Adicionalmente, debido a la persistencia de condiciones de sequía en 2005, junio de ese año presentó una mayor extensión de área incendiada a lo largo de Jalisco en comparación con 2011 y 2017. Es relevante señalar que en 2005, la Sierra Madre del Sur experimentó la mayor superficie quemada en el período de un año. El segundo año con más hectáreas totales incendiadas fue 2017, aunque con una

variabilidad mayor que en 2005, representando entre el 6.65% y el 13.26% del total incendiado en cada provincia; en este caso, el Eje Neovolcánico fue la provincia más afectada. A pesar de las altas temperaturas registradas en 2011 y la escasa precipitación en los meses antecedentes a la temporada alta de incendios, en 2011 se quemaron menos hectáreas forestales que en 2017 y 2005, patrón observado en las tres regiones fisiográficas analizadas. En este año, la variación en la proporción de superficie incendiada por provincia fue similar a 2017, oscilando entre el 6.45% y el 11.25%, siendo la provincia de la Sierra Madre Occidental la más afectada. Cabe destacar que, a lo largo de los tres años analizados, mayo resultó ser el mes más afectado.

Tabla 6.5. Superficie incendiada total (hectáreas) por incendios forestales durante los meses de la época seca, desglosada por provincia fisiográfica y para los años con mayor incidencia de incendios del periodo de estudio (2005, 2011 y 2017). También se reporta el porcentaje de superficie incendiada en cada año con respecto al área quemada total dentro cada provincia fisiográfica del estado de Jalisco.

Eje Neovolcánico					
	marzo	abril	mayo	junio	Porcentaje del total (%)
2005	1,063.74	12,411.06	74,038.15	11,200.98	21.63
2011	2,470.04	5,646.95	19,405.48	1,912.64	6.45
2017	4,091.38	18,754.13	34,893.09	2,767.21	13.26
Sierra Madre del Sur					
	marzo	abril	mayo	junio	Porcentaje del total (%)
2005	188.05	24,719.16	75,635.24	17,835.41	21.72
2011	0	3,758.03	13,037.04	5,982.58	4.18
2017	134.64	5,871.99	27,580.40	2,682.28	6.65
Sierra Madre Occidental					
	marzo	abril	mayo	junio	Porcentaje del total (%)
2005	1,051.59	15,440.48	41,360.17	40,774.56	23.48
2011	0	1,243.29	28,294.57	17,730.38	11.25
2017	247.90	1,587.40	20,114.88	24,718.31	11.11

Durante 2005, 2011 y 2017, las quemas agropecuarias representaron un porcentaje menor del área quemada total en cada provincia fisiográfica en comparación con los incendios forestales: 30.69% del área quemada en el Eje Neovolcánico, el 36.52% en la Sierra Madre del Sur y el 27.77% en la Sierra Madre Occidental. Nuevamente en 2005 se registró la mayor

área quemada total, con porcentajes similares en las tres provincias fisiográficas (entre 12.66% y 15.11%), reflejando sincronía a lo largo de Jalisco. Contrariamente a lo observado para los incendios forestales, en 2011 la extensión afectada por quemas agropecuarias fue mayor que en 2017, con porcentajes que oscilaron entre el 6.95% y el 20.57%; asimismo, en 2011 la Sierra Madre del Sur presentó mayor superficie quemada que en 2005. En comparación con los incendios forestales, 2017 presentó un porcentaje incendiado por quemas bajo (4.74% a 6.95%), aunque dentro de un rango similar en todas las provincias analizadas. En este contexto, mayo volvió a destacar como el mes más afectado, y a diferencia de los incendios forestales, no se evidenció una influencia significativa de la sequía en las quemas agropecuarias en junio de 2005, ya que la cantidad de superficie incendiada no fue mayor que en otros años.

Tabla 6.6 Superficie incendiada total (hectáreas) por quemas agropecuarias durante los meses de la época seca, desglosada por provincia fisiográfica y para los años con mayor incidencia de incendios del periodo de estudio (2005, 2011 y 2017). También se reporta el porcentaje de superficie incendiada en cada año con respecto al área quemada total dentro cada provincia fisiográfica del estado de Jalisco.

Eje Neovolcánico					
	marzo	abril	mayo	junio	Porcentaje del total (%)
2005	3,805.54	8,801.41	22,344.27	7,451.71	15.11
2011	3,642.62	8,094.31	17,283.21	1,414.26	10.84
2017	1,480.75	3,170.22	7,170.31	1,476.94	4.74
Sierra Madre del Sur					
	marzo	abril	mayo	junio	Porcentaje del total (%)
2005	0	831.99	7,504.53	707.11	12.66
2011	64.27	390.15	13,037.04	1,199.67	20.57
2017	0	491.60	1,703.74	151.41	3.29
Sierra Madre Occidental					
	marzo	abril	mayo	junio	Porcentaje del total (%)
2005	0	487.34	1,903.80	1,795.44	13.77
2011	271.21	353.71	742.06	1,015.31	6.95
2017	429.57	1,695.75	11.60	5.80	7.05

6.3.4 Efecto de El Niño Oscilación del Sur sobre la incidencia de incendios

El análisis del efecto de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sugirió que la fase negativa del ENOS (La Niña) estuvo asociada a una mayor incidencia de incendios: años clasificados con alta ocurrencia y superficie incendiada, también presentaron valores negativos del Índice Multivariado del ENOS. Por el contrario, durante la fase positiva (El Niño), la tendencia fue hacia una disminución en la frecuencia de incendios. El efecto del ENOS también dependió de la intensidad y el periodo en el cual sucedió el fenómeno. La Figura 6.21 ilustra la variación del Índice Multivariado del ENOS a lo largo del periodo de estudio. Los periodos de mayor intensidad se registraron en 2007-2008 (fase negativa), 2010-2011 (fase negativa) y 2015-2016 (fase positiva). Dos de estos periodos coincidieron con años clasificados con muy alta (2011) y muy baja (2015) incidencia de incendios.

En el caso del ciclo 2010-2011, a partir de junio del 2010 y hasta diciembre del 2011, el índice presentó valores menores a 0.5, representando una fase intensa y prolongada de La Niña. De igual manera, desde mediados de 2007 y a lo largo de 2008, el ENOS se mantuvo en una fase negativa La Niña; aunque 2008 no se incluyó en el análisis previo, fue uno de los años con mayor incidencia de incendios del periodo de estudio, con 283 eventos y un área quemada total de 101,046.25 ha. Por otro lado, durante el ciclo 2015-2016 el índice tomó valores mayores a 0.5 desde abril de 2015 hasta abril de 2016, por lo que se trató de la etapa más fuerte de El Niño del periodo de estudio. El segundo ciclo más intenso se observó de septiembre del 2009 a abril del 2010, siendo este último año de los más bajos en número de incendios (195) y superficie afectada (43,159.15 ha) del periodo de estudio.

Otro año catalogado con baja frecuencia de incendios fue 2002, considerado un año de El Niño por mantener valores superiores a 0.5 desde julio hasta diciembre, no obstante, no se trató de una fase positiva intensa. En 2005 ocurrió el mayor número de incendios del periodo de estudio, muchos de más de 2,000 ha; de acuerdo a este índice, la mayor parte de este año permaneció en una fase neutra, con valores positivos de enero a marzo y valores negativos de septiembre a diciembre. Las condiciones previas a 2005 estuvieron asociadas a una fase positiva del ENOS, registrada de junio a diciembre de 2004. De los otros años tomados en cuenta en el análisis, 2014 resultó ser un año neutro y 2017 un año La Niña, aunque este último fue de intensidad moderada.

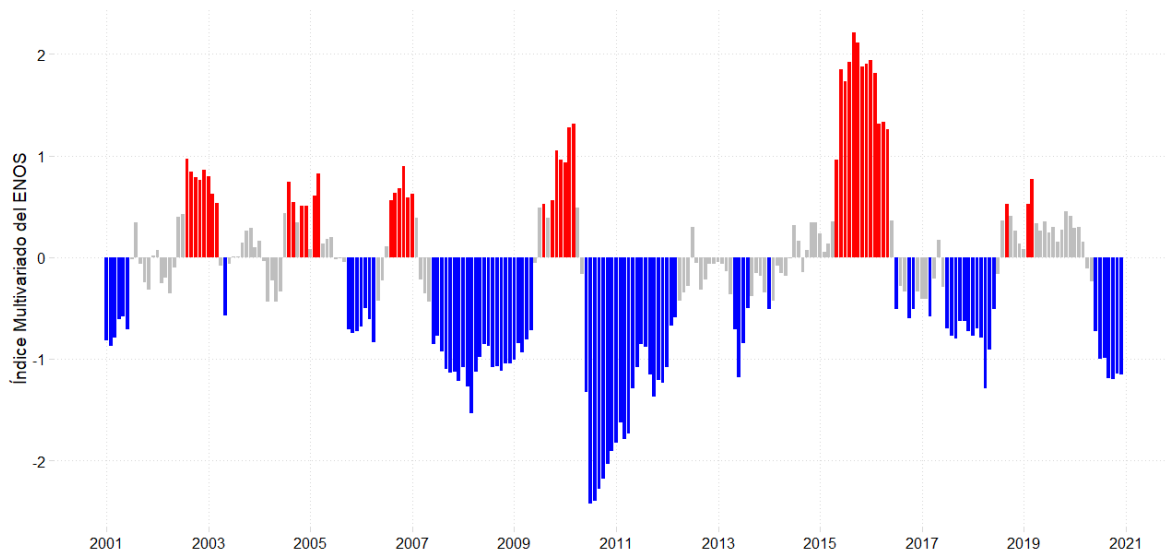


Figura 6.21. Variabilidad del Índice Multivariado del ENOS durante el periodo de estudio. En rojo, valores mayores a 0.5 correspondientes a la fase positiva del ENOS (El Niño); en azul, valores menores a -0.5 correspondientes a la fase negativa del ENOS (La Niña); en gris valores entre 0.5 y -0.5 correspondientes a la fase neutral del ENOS. Elaborado con datos de la NOAA.

6.4 Modelo de predicción espacial

En la Tabla 6.7 se enlistan los modelos ajustados a los datos de área quemada, junto con los criterios de selección correspondientes. De acuerdo al criterio WAIC, el M19 resultó ser el mejor modelo; éste también fue el modelo con mayor complejidad, donde se incorporaron todas las covariables, el componente espacial, el componente temporal y el componente aleatorio. En general se observó que el ajuste fue mejorando conforme los modelos se hicieron más complejos, y un patrón común surgió al probar distintas combinaciones de variables: al eliminar la precipitación, elevación y pendiente, el rendimiento del modelo aumentaba. El segundo mejor modelo, donde se añadieron todos los componentes salvo estas tres variables, tuvo un valor del criterio WAIC muy cercano al primero y, en términos del DIC, fue el mejor ajuste; sin embargo, al considerar otros criterios como el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE), se concluyó que el ajuste era más adecuado si no se descartaban estos tres factores.

A partir de los coeficientes estimados por el modelo M19 se extrajo información acerca de la influencia de las covariables sobre el área quemada por incendios forestales (Tabla 6.7).

De todas las covariables incorporadas en el ajuste, sólo unas cuantas resultaron ser estadísticamente significativas: ciertas clases de cobertura de suelo, la orientación de ladera, la temperatura, el NDVI y la distancia a campos agrícolas y caminos urbanos.

Para las variables categóricas que contienen varios niveles, existe una restricción de identificabilidad de los coeficientes $\sum_j B_j = 0$, donde B_j representa el coeficiente asociado a cada factor de la variable categórica (Díaz-Avalos *et. al* 2016). Es decir que el modelo toma una de las clases de la variable como categoría de referencia, la cual funciona como control para interpretar al resto de las categorías; por lo tanto, el intercepto absorbe el efecto estimado para la categoría descartada, y los coeficientes de las otras clases se convierten en desviaciones de este efecto (Starkweather 2018). En el caso de la cobertura de suelo, el humedal (clase 8) y la selva subcaducifolia y caducifolia (clase 10) resultaron significativos, mientras que el bosque de pino-encino (clase 1) se tomó como la categoría de referencia; el signo negativo de los coeficientes del humedal y la selva implica que, en comparación con el bosque de pino-encino, los incendios forestales en ambos tipos de vegetación son de menor tamaño, lo cual coincide con lo encontrado previamente. Cabe resaltar que, aunque ambos coeficientes fueron negativos, el coeficiente del humedal fue mucho menor (-2.591) que el de la selva (-0.307), indicando que los humedales se incendian en proporciones mucho más bajas que las selvas subcaducifolias y caducifolias.

Por otro lado, todas las categorías de la orientación de ladera resultaron significativas. El signo negativo de los coeficientes de las clases 2, 3 y 4 (este, sur y oeste) señala que en estas orientaciones la superficie quemada es menor en comparación con la orientación hacia el norte. Cabe destacar que los coeficientes de las orientaciones hacia el este, oeste y sur presentaron magnitudes semejantes, en un intervalo de -0.74 a -0.65.

Entre las variables continuas evaluadas, la temperatura, el NDVI, la distancia a campos agrícolas y la distancia a caminos urbanos y carreteras resultaron significativas. Todos estos factores mostraron coeficientes positivos, lo que implica una relación directa con la extensión de áreas afectadas por incendios forestales. Es importante destacar que el coeficiente significativo más alto correspondió al NDVI, con un valor de 0.997, convirtiéndolo en uno de los componentes más importantes del modelo. Esto sugiere una fuerte asociación entre la distribución espacial del NDVI y el tamaño de los incendios.

Tabla 6.7. Modelos ajustados a los datos de área quemada y criterios de selección correspondientes, enlistados de acuerdo al valor WAIC. El término - *epp* se refiere a la exclusión de las variables elevación, precipitación y pendiente del ajuste.

MODELO	DIC	WAIC	R ²	RMSE
M19 Covariables + Espacial + Temporal + Aleatorio	10535.24	11426.45	0.94	4.28
M19.1 Covariables + Espacial + Temporal + Aleatorio - epp	10535.14	11426.80	0.93	4.43
M16.1 Covariables + Espacial - epp	10586.85	11462.56	0.93	4.58
M18.1 Covariables + Espacial + Temporal - epp	10622.90	11465.22	0.93	4.59
M18 Covariables + Espacial + Temporal	10566.28	11467.02	0.93	4.61
M16 Covariables + Espacial	10590.56	11475.13	0.93	4.58
M17.1 Covariables + Temporal - epp	12927.21	13010.58	0.29	8.51
M17 Covariables + Temporal	12932.90	13020.46	0.30	8.50
M12.1 Covariables - epp	13057.66	13084.60	0.21	8.70
M12 Covariables	13063.83	13096.71	0.21	8.69
M14 Temporal	13114.20	13166.26	0.21	8.71
M11 Distancia caminos	13202.59	13205.65	0.11	8.84
M10 Uso Suelo	13206.25	13209.10	0.10	8.85
M9 Año	13221.09	13233.66	0.11	8.84
M8 Distancia campos agrícolas	13264.70	13267.66	0.04	8.89
M7 NDVI	13266.08	13268.66	0.05	8.88
M6 Mes	13284.66	13290.98	0.04	8.89
M5 Orientación	13287.20	13293.82	0.04	8.88
M4 Elevación	13292.05	13294.50	0.01	8.89
M3 Temperatura	13292.37	13295.29	0.00	8.89
M2 Precipitación	13292.17	13295.49	0.01	8.89
M1 Pendiente	13291.81	13298.47	0.03	8.89
M15 Covariables + Aleatorio	11815.55	13360.80	0.98	4.86
M13 Espacial	133271.10	66413891	0.95	9.48

En contraste, ninguna de las covariables indicativas del tiempo (año y mes) resultaron significativas. A pesar de la evidente estacionalidad de los incendios forestales, y de la variabilidad interanual en la cantidad de superficie incendiada, el modelo no logró capturar su importancia; no obstante, tanto la variación estacional como interanual de los incendios fue incorporada a partir del componente temporal no lineal descrito más adelante. De igual

forma, de acuerdo al modelo el único elemento de la topografía que afectó de manera significativa al tamaño de los incendios fue la orientación de ladera; ni la elevación ni la pendiente fueron relevantes. La precipitación tampoco fue estadísticamente significativa, lo que se atribuye principalmente a la calidad de los datos utilizados para el ajuste, provenientes de un ráster con menor resolución que el resto de las covariables.

Por otro lado, el efecto no lineal fue capturado por el componente espacio-temporal del modelo. La Figura 6.22 representa la media marginal posterior de ambos efectos aleatorios: el eje horizontal del componente espacial (Figura 6.22 A) representa los 6,538 nodos de la triangulación de la malla SPDE utilizada en el modelo, mientras que en el componente temporal (Figura 6.22 B) se muestra la variación de la media marginal posterior del efecto del tiempo a lo largo de los 6,205 días de los años incorporados en el ajuste del modelo (periodo 2001-2017).

Tabla 6.8. Coeficientes estimados a partir del modelo M19. En la tabla se presentan los coeficientes correspondientes a las covariables incluidas en el modelo. El coeficiente 'm' representa el intercepto. Cada uno de los coeficientes se calculó junto con su desviación estándar (SD) y se evaluó su significancia estadística utilizando cuantiles extremos. Las covariables se identifican de la siguiente manera: 'Mes' corresponde a los meses del año, iniciando con enero (Mes 1). 'Cobertura de suelo' se refiere a las diferentes categorías de cobertura del suelo con las siguientes claves: 4=matorral/mezquital, 6=selva subperennifolia/perennifolia; 8= humedal; 10 = selva subcaducifolia/caducifolia; 18= pastizal. 'Orientación de ladera' se especifica con las siguientes claves: 2=Este; 3= Sur; 4=Oeste. 'Pendiente' se especifica con las siguientes claves: 1= Suave; 2= Moderada; 3= Inclinada; 4=Fuerte; 5= Muy fuerte. Las unidades de 'Distancia a caminos' y 'Distancia agrícola' se indican en km. Las líneas realizadas en color indican los coeficientes que resultaron estadísticamente significativos.

Covariables	Media	SD	Cuartil 0.25	Cuartil 0.975
m	-0.616	0.609	-1.830	0.583
Mes 2	0.753	0.551	-0.328	1.834
Mes 3	0.319	0.460	-0.585	1.222
Mes 4	-0.054	0.458	-0.954	0.844
Mes 5	-0.051	0.462	-0.959	0.854
Mes 6	-0.099	0.476	-1.034	0.834
Mes 7	0.575	0.870	-1.133	2.281
Mes 11	0.254	1.211	-2.125	2.630
Mes 12	0.068	0.617	-1.145	1.279

Año 2002	0.200	0.471	-0.749	1.125
Año 2003	-0.297	0.626	-1.573	0.934
Año 2004	-0.056	0.752	-1.522	1.493
Año 2005	0.058	0.861	-1.607	1.845
Año 2006	0.083	0.956	-1.773	2.061
Año 2007	-0.055	1.048	-2.087	2.115
Año 2008	0.234	1.125	-1.964	2.552
Año 2009	0.025	1.206	-2.307	2.530
Año 2010	0.047	1.277	-2.451	2.674
Año 2011	-0.333	1.337	-3.020	2.344
Año 2012	-0.209	1.404	-3.019	2.616
Año 2013	-0.215	1.467	-3.191	2.691
Año 2014	-1.093	1.578	-4.289	2.021
Año 2015	-0.333	1.711	-3.781	3.039
Año 2016	-0.541	1.642	-3.883	2.705
Año 2017	-0.131	1.700	-3.545	3.280
Cobertura Suelo 4	-0.382	0.296	-0.964	0.200
Cobertura Suelo 6	-0.089	0.598	-1.263	1.085
Cobertura Suelo 8	-2.591	1.261	-5.068	-0.117
Cobertura Suelo 10	-0.307	0.082	-0.467	-0.146
Cobertura Suelo 18	-0.517	0.284	-1.075	0.040
Elevación	0.067	0.079	-0.088	0.223
Pendiente 2	-0.001	0.089	-0.175	0.173
Pendiente 3	-0.045	0.088	-0.218	0.128
Pendiente 4	-0.048	0.109	-0.262	0.165
Pendiente 5	-0.177	0.199	-0.568	0.213
Orientación 2	-0.715	0.285	-1.274	-0.156
Orientación 3	-0.652	0.282	-1.204	-0.099
Orientación 4	-0.743	0.285	-1.302	-0.185
Precipitación	0.001	0.005	-0.009	0.011
Temperatura	0.045	0.012	0.021	0.070
NDVI	0.997	0.443	0.128	1.866
Distancia caminos	0.249	0.038	0.175	0.323
Distancia agrícola	0.124	0.056	0.014	0.235

La Figura 6.23 muestra los parámetros de covarianza espacial κ y τ , los cuales tuvieron una media de 84.33 y 2.22 respectivamente, e ilustra la distribución marginal posterior de ambos hiperparámetros para el campo aleatorio espacial. Utilizando κ y τ se obtuvo el valor del rango nominal de la covarianza $r = 3.736$ km, el cual indica que existe una asociación espacial entre el tamaño de los incendios forestales a distancias menores de 3.7 km; lo anterior sugiere que dentro de este rango el área quemada por incendios forestales tiende a ser de tamaño

similar, mientras que incendios a más de 3.7 km pueden ser de tamaños muy diferentes. La distribución marginal posterior del rango nominal se muestra en la Figura 6.24.

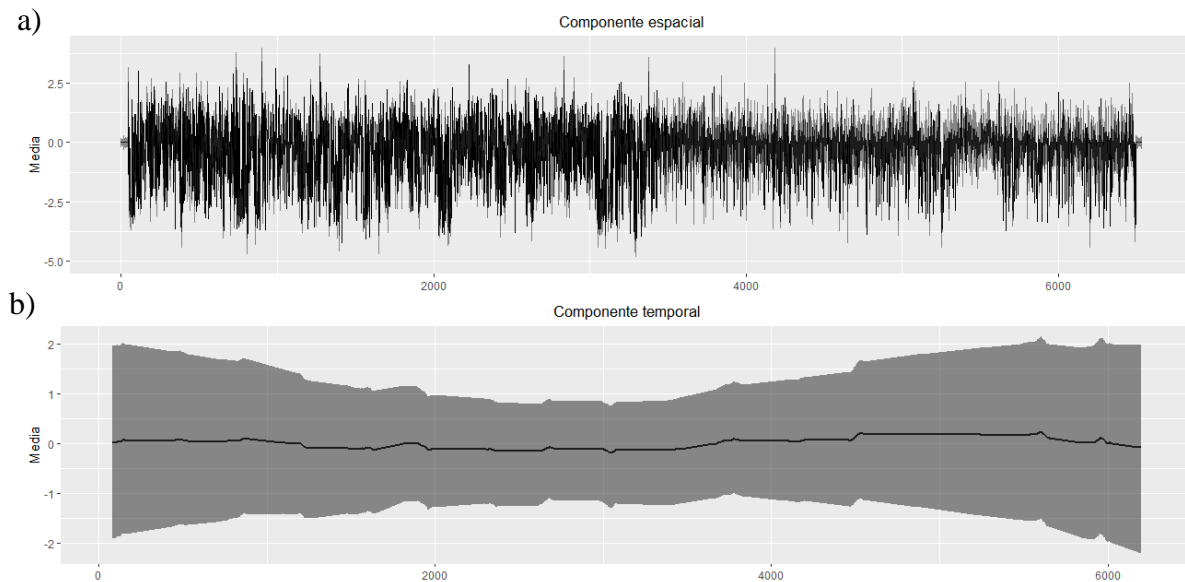


Figura 6.22. Media marginal posterior del efecto aleatorio a) espacial y b) temporal

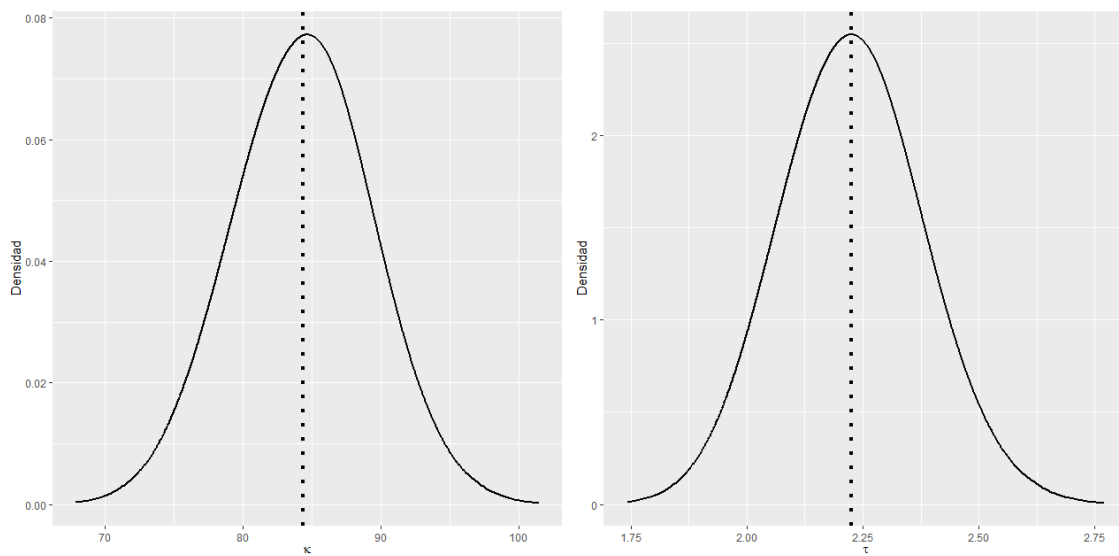


Figura 6.23. Distribución marginal posterior los hiperparámetros κ (izquierda) y τ (derecha) con media $\kappa = 84.33$ y $\tau = 2.22$.

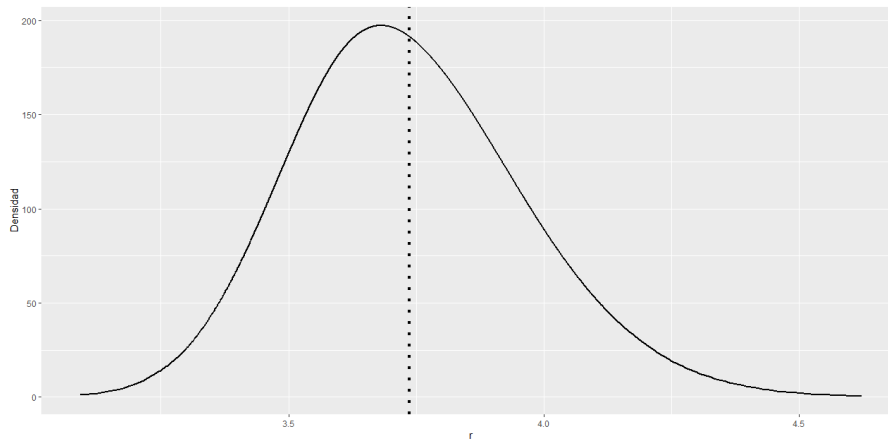
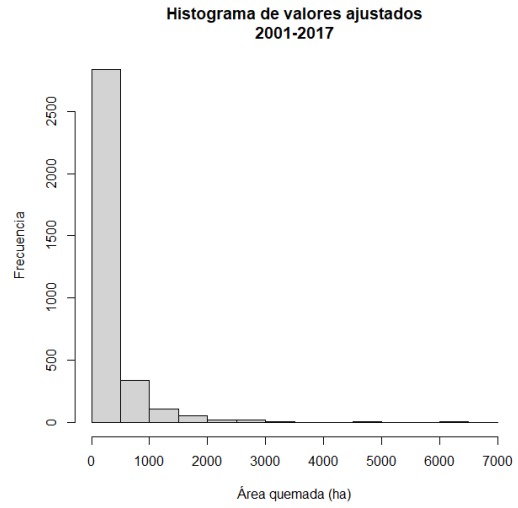
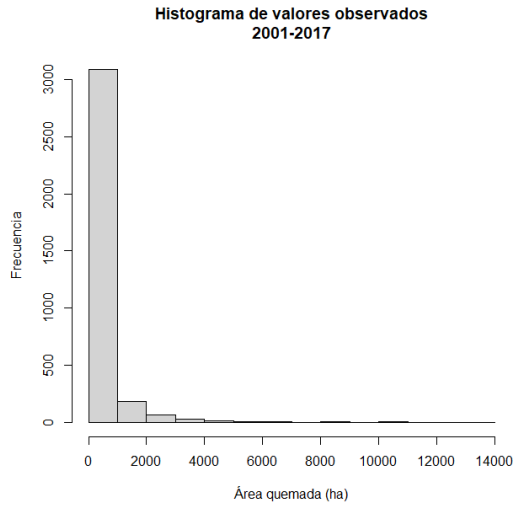


Figura 6.24. Distribución marginal posterior del rango nominal de la covarianza con media $r = 3.736$ km

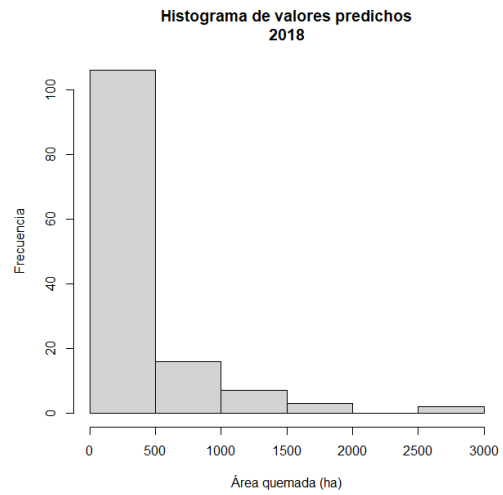
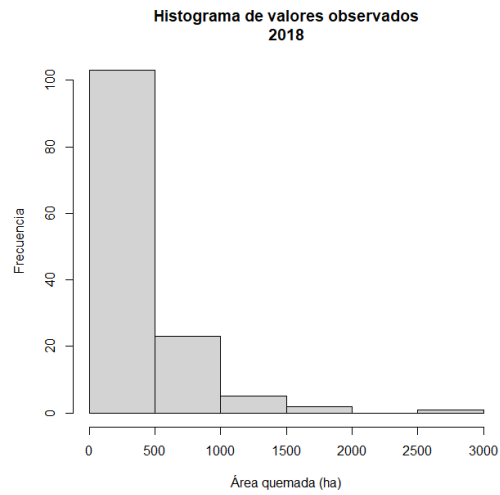
6.4.1 Validación

La distribución de los valores observados y predichos de área quemada se ilustra en los histogramas de la Figura 6.25. La estimación más precisa se obtuvo para 2018 (Figura 6.25 B); los datos observados y estimados para este año se distribuyeron de manera muy similar, dentro de un intervalo de 0 a 3,000 ha, y con un área quemada máxima por evento observada de 2,825.6 ha frente a una predicha de 2,635.1 ha. Por otro lado, en 2019 el modelo tendió a subestimar el área incendiada (Figura 6.25 C): los datos observados se concentraron en su mayoría en un rango de 0 a 2,000 ha, mientras que el modelo estimó valores de 0 a 500 ha; asimismo, el incendio más grande registrado en este año fue de 12,860.2 ha, pero el modelo estimó una superficie quemada máxima de 2,774 ha. El caso contrario sucedió en 2020 dado que el modelo sobreestimó el tamaño de los incendios forestales, lo cuales incendiaron en su mayoría menos de 300 ha (Figura 6.25 D); en este año el tamaño máximo de un evento fue de 2,294.7 ha, frente a 2,744.0 ha predichas. Finalmente, en el periodo de entrenamiento 2001-2017 los histogramas de los datos observados y estimados fueron parecidos (Figura 6.25 A), con excepción del valor máximo observado (13,253 ha) contra el estimado (6,877 ha). El modelo no alcanzó a predecir valores de superficie quemada mayores a 3,000 ha, por lo que años con alta incidencia de incendios no estuvieron bien representados.

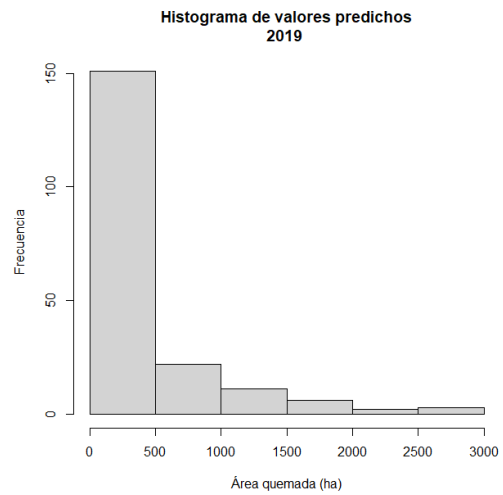
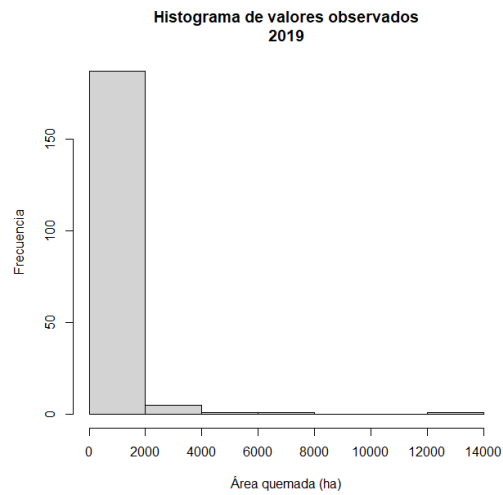
A)



B)



C)



D)

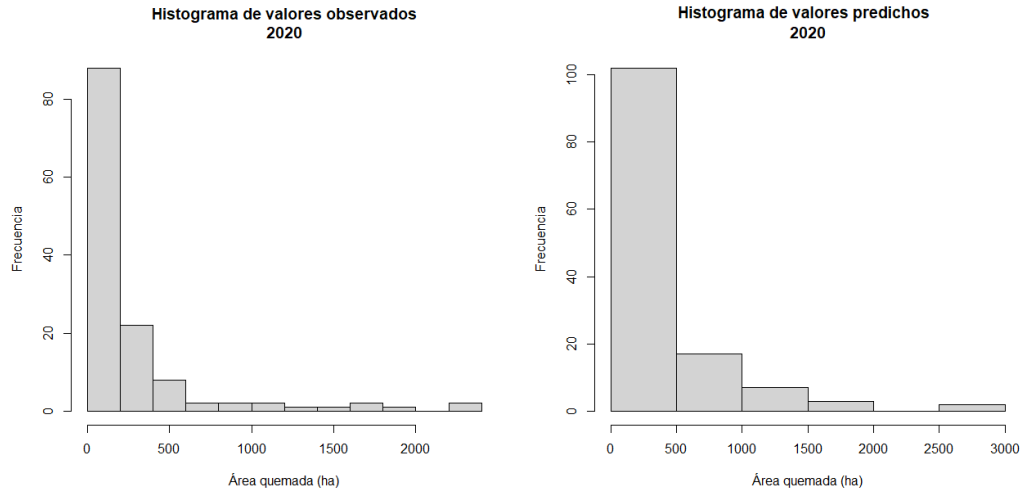
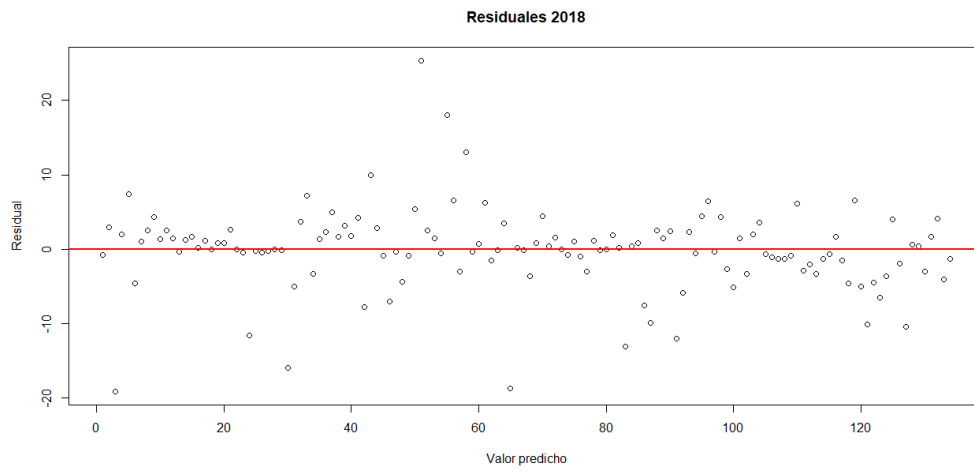


Figura 6.25. Distribución de valores observados (izquierda) y predichos (derecha) de área quemada (hectáreas) por incendios forestales en el estado de Jalisco durante A) 2001-2017 B) 2018 C) 2019 y D) 2020

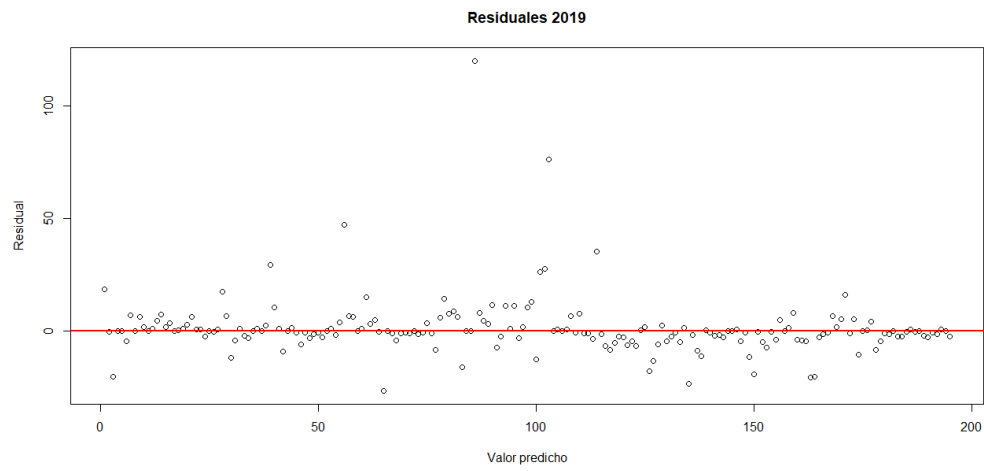
Para evaluar la precisión del modelo, se generaron gráficos de residuales (Figura 6.26) donde se calculó la diferencia entre los valores observados y predichos; si el modelo es adecuado, los residuales no deben presentar un patrón o estructura, e idealmente deben concentrarse alrededor de la línea $y = 0$, lo que representaría una diferencia cercana a cero entre lo observado y estimado. Debido a que no es posible estimar el error de predicción a partir de los datos utilizados en la construcción del modelo (2001-2017), el gráfico de residuales para este periodo es interpretado como una bondad de ajuste.

En todos los periodos evaluados la distribución de los residuales fue uniforme y sin una tendencia evidente. En 2018 y 2020 los residuales se distribuyeron aproximadamente alrededor de la línea $y = 0$, con presencia tanto de sub estimaciones (puntos por encima de la línea) como sobre estimaciones (puntos por debajo de la línea) (Figura 6.26 A y C); el error fue mayor en 2019 por la subestimación del tamaño de los incendios por el modelo en este año (Figura 6.26 B). En cuanto al periodo 2001-2017, se observó un alto grado de acoplamiento entre los valores observados y los valores del ajuste; no se detectó una tendencia en los residuos debido a que se encontraron dispersos aleatoriamente alrededor de la línea residual = 0, ni una cantidad de datos extremos relevante (Figura 6.26 D).

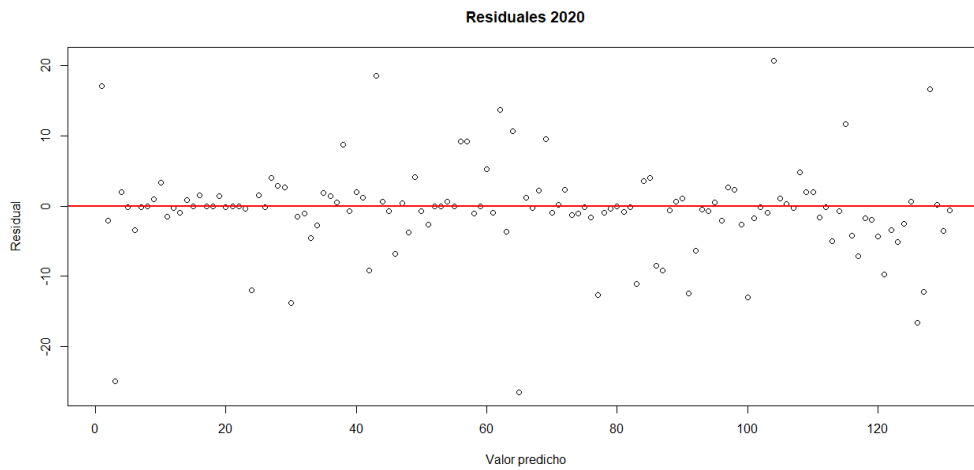
A)



B)



C)



D)

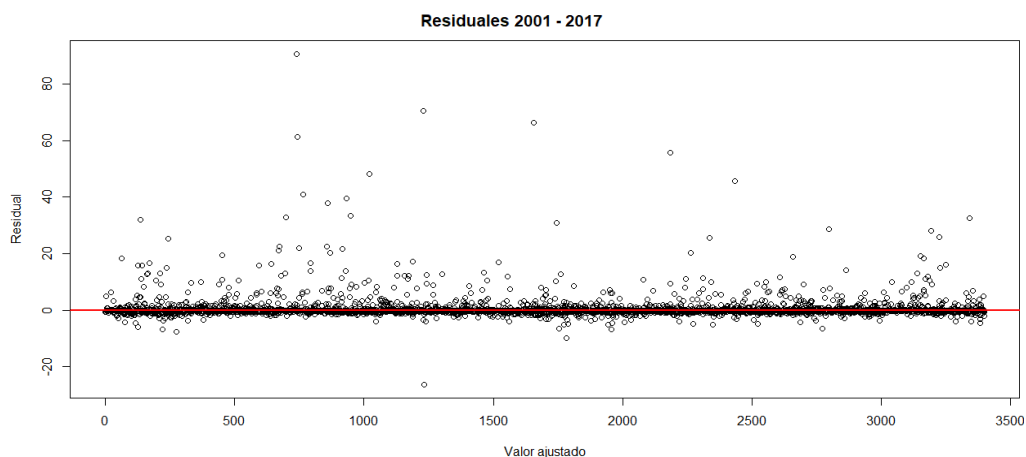


Figura 6.26. Residuales de valores observados y predichos de área quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco durante A) 2018 B) 2019 C) 2020 y D) 2001-2017. En cada gráfico, la línea roja representa una diferencia de cero entre las observaciones reales y las predicciones del modelo

Por último, se calculó el Error Cuadrático Medio, que mide el error de predicción promedio, esto es, la diferencia promedio entre los valores observados y los valores predichos por el modelo; entre menor sea el valor del RMSE, mejor será el ajuste. De acuerdo a la Tabla 6.9, la mejor predicción se obtuvo para el año 2018, seguido por 2020 y finalmente 2019.

Tabla 6.9. Error Cuadrático Medio del periodo de validación del modelo

Año	RMSE
2018	5.57
2019	13.32
2020	6.61

6.4.2 Densidad espacial del área quemada

Los mapas de densidad de área quemada revelaron que a lo largo del periodo de estudio ciertas zonas dentro del estado de Jalisco concentraron la mayor superficie afectada por incendios forestales; en consecuencia, la probabilidad de una alta frecuencia de eventos y/o de la presencia de incendios de gran magnitud fue mayor en estas zonas que en el resto del territorio. Las zonas identificadas con mayor densidad de área quemada fueron: 1) la porción

noroeste de la Sierra Madre Occidental, 2) el sur y sur este de la Sierra Madre del Sur y 3) la región del Eje Neovolcánico colindante con la Sierra Madre Occidental, donde también se concentran los mayores centros poblacionales (p. ej. Tequila, Zapopan, Guadalajara) del estado. Al comparar el patrón de superficie quemada observada vs estimada se encontró que a pesar de que hubo algunas diferencias en la configuración e intensidad de los mapas, en general el modelo estimó de manera correcta las zonas críticas o de alta probabilidad de incendios forestales.

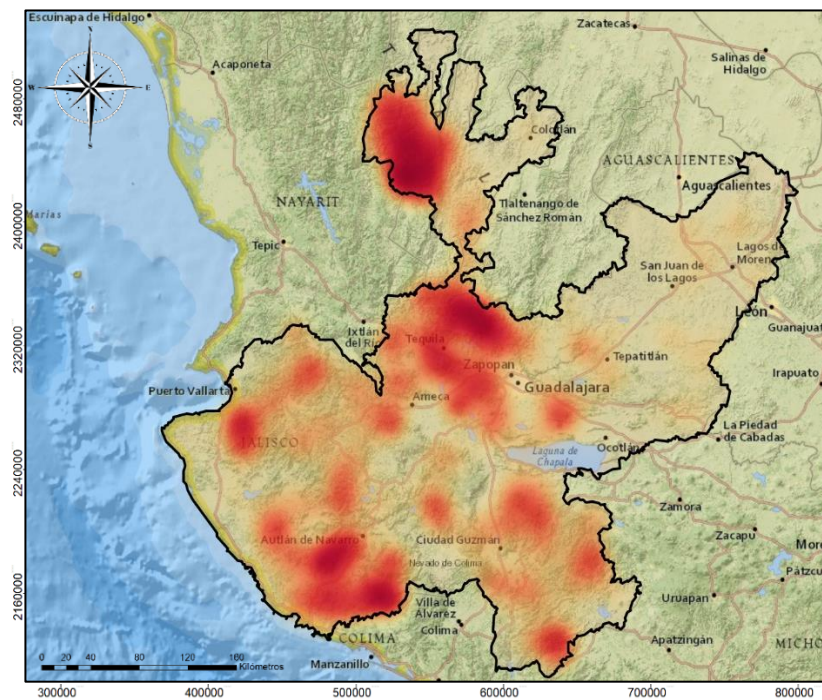
La Figura 6.27 A y B muestran los mapas de densidad de área quemada para el periodo de ajuste 2001 - 2017. En ambos casos la mayor concentración de área quemada se localizó en la porción noroeste de la Sierra Madre Occidental, el límite entre la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico (en los alrededores de Tequila, Zapopan y Guadalajara) y el sur de la Sierra Madre del Sur (en la porción colindante con Colima cercana a la costa). Sin embargo, en todos los casos el modelo sobreestimó la intensidad del área quemada, incluyendo otras zonas como el norte y sureste de la Sierra Madre del Sur y del Eje Neovolcánico.

Debido a la menor cantidad de incendios registrados que en el periodo de ajuste, en los años de validación 2018, 2019 y 2020 la densidad de superficie quemada se concentró en áreas más puntuales. En 2018 tanto las observaciones como las predicciones indicaron que las zonas con mayor concentración de superficie incendiada fueron la región noroeste de la Sierra Madre Occidental, la zona centro y límite entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Occidental (en los alrededores de Tequila, Zapopan y Guadalajara) y la porción sur y sureste de la Sierra Madre del Sur (Figura 6.28 A y B). Las estimaciones más precisas se realizaron para el sureste de la Sierra Madre del Sur, mientras que en los alrededores de Ciudad Guzmán (Eje Neovolcánico), Guadalajara y Zapopan, así como para la región sur (cerca de la costa) de la Sierra Madre del Sur, el modelo subestimó la intensidad del área quemada.

Al tratarse de un año con alta incidencia de incendios, en 2019 la tendencia fue a que el modelo subestimara la densidad de área quemada en todo el estado (Figura 6.29 A y B). La subestimación fue más evidente en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, no obstante, el modelo detectó de manera correcta las zonas más críticas: el noroeste de la Sierra Madre Occidental, el sur y norte de la Sierra Madre del Sur, y el centro de Jalisco, en las cercanías de Guadalajara y Zapopan. Finalmente, en 2020 se identificaron pocas diferencias

entre el patrón espacial de área quemada observado y estimado, y las zonas más afectadas por incendios forestales en este año fueron el sur y sureste de la Sierra Madre del Sur (Figura 6.30).

A)



B)

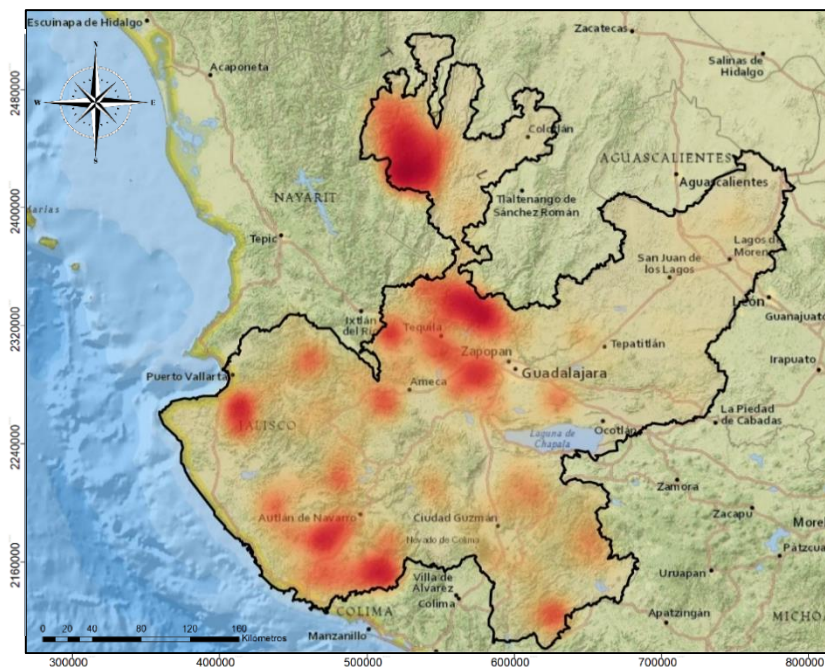
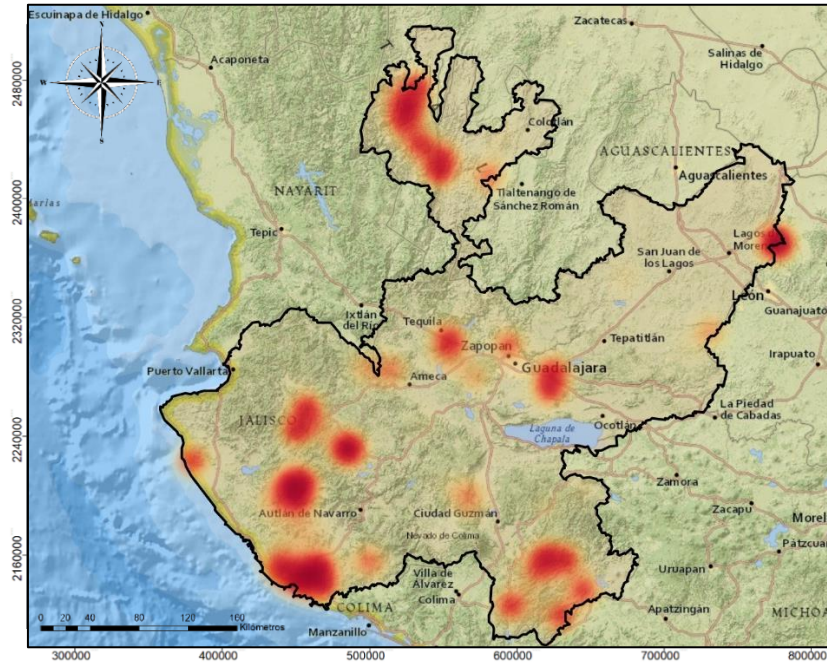


Figura 6.27. Densidad de área quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco durante el periodo 2001-2017 A) observada B) estimada por el modelo M19

A)



B)

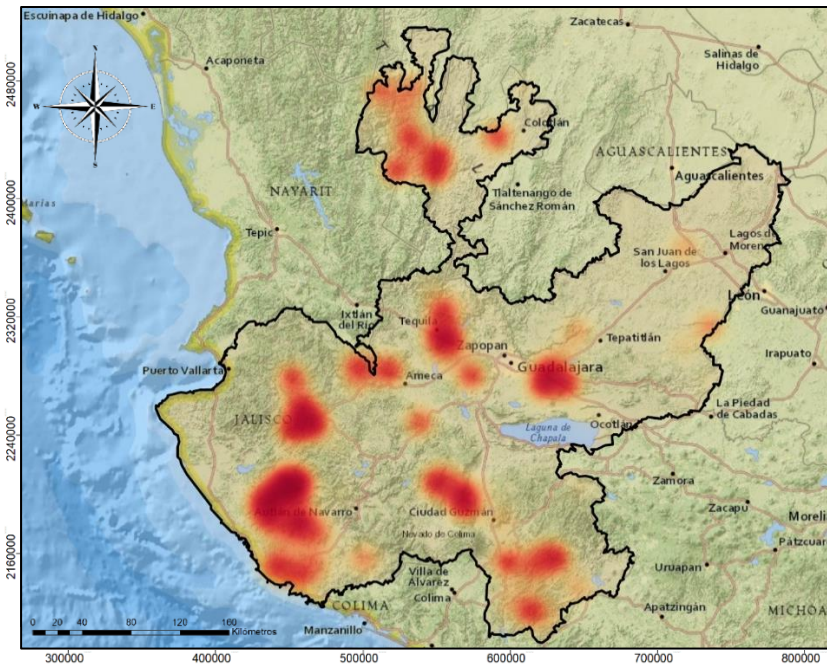
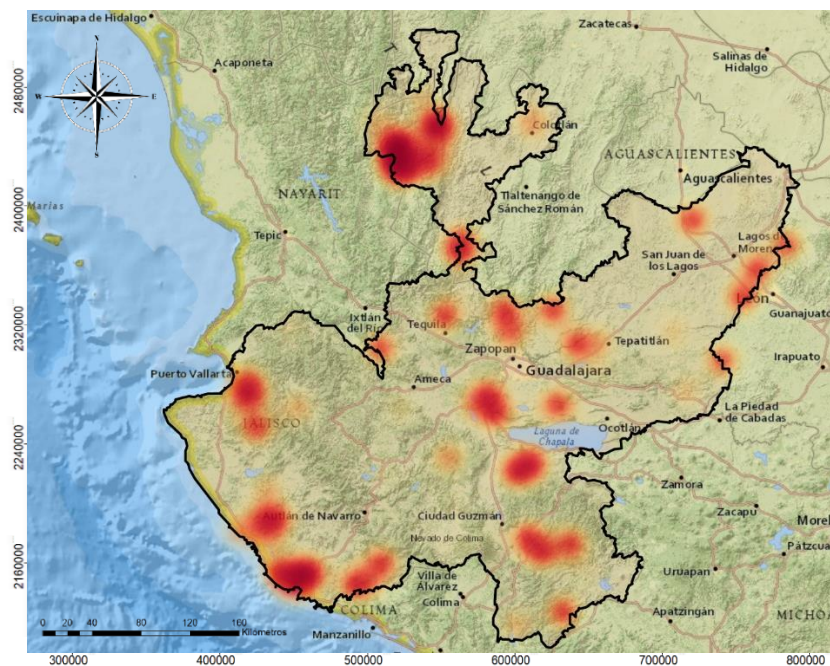


Figura 6.28. Densidad de área quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco durante 2018 A) observada B) estimada por el modelo M19

A)



B)

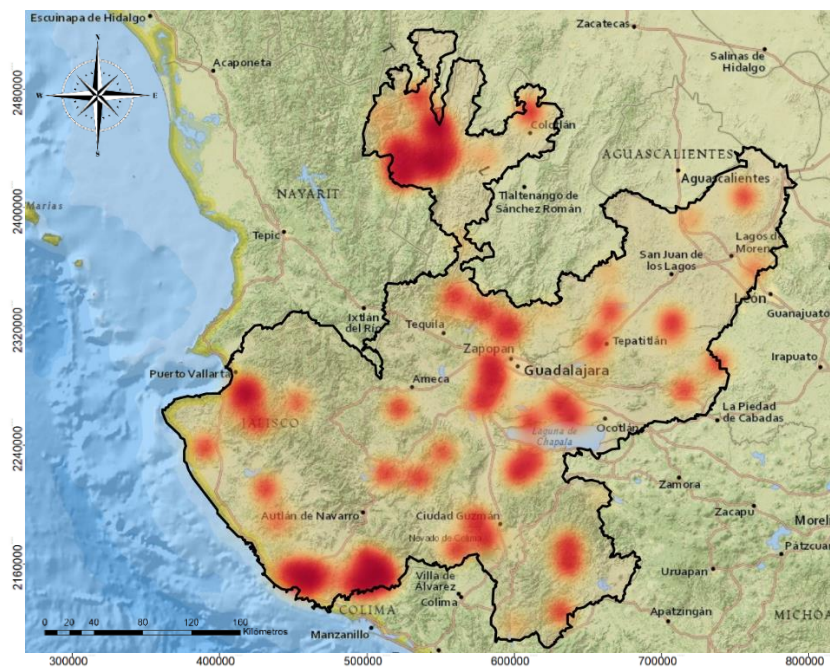
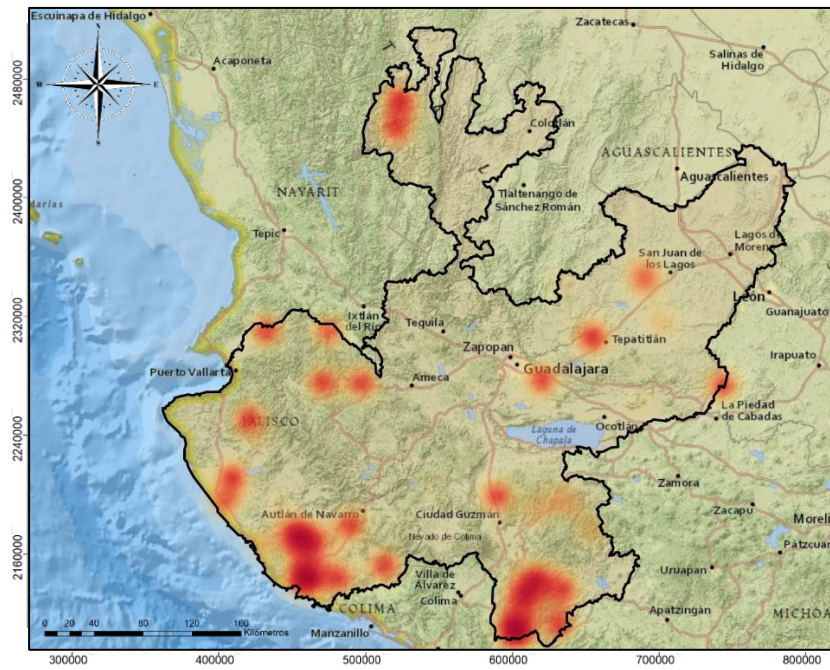


Figura 6.29. Densidad de área quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco durante 2019 A) observada B) estimada por el modelo M19

A)



B)

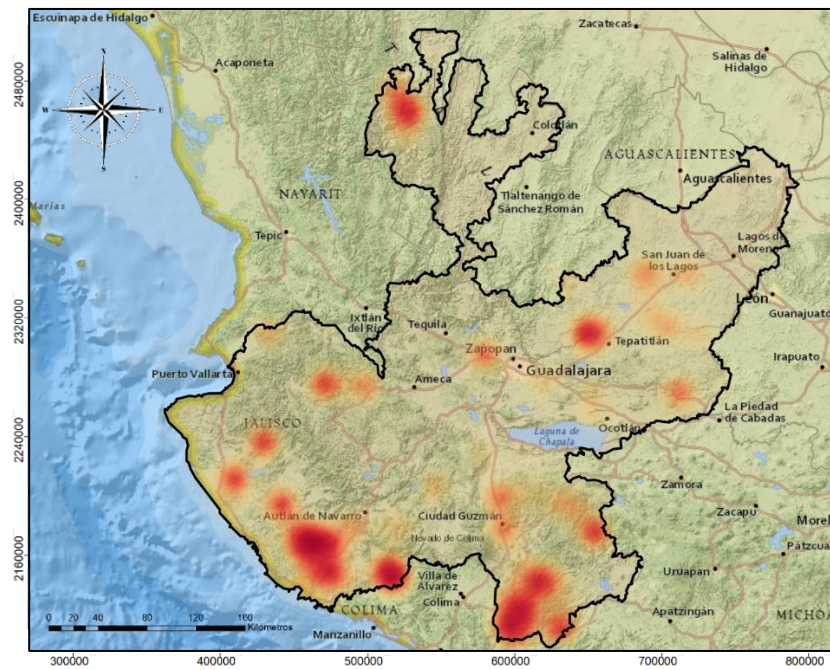


Figura 6.30. Densidad de área quemada por incendios forestales en el estado de Jalisco durante 2020 A) observada B) estimada por el modelo M19

7. DISCUSIÓN

7.1. Patrón espacio temporal de incidencia de incendios en Jalisco

Las tecnologías de percepción remota han resultado ser un medio eficiente para estudiar la ecología del fuego a múltiples escalas (Szpakowski *et al.*, 2019); su nivel de cobertura y resolución espacio-temporal facilita la detección de incendios en tiempo real, aun en áreas remotas. Los datos utilizados en el presente trabajo forman parte un algoritmo desarrollado recientemente para el mapeo global de área quemada (Lizundia-Loiola *et al.*, 2020), el cual está basado en un enfoque híbrido que combina anomalías térmicas con las firmas espectrales de los parches quemados (Alonso-Canas & Chuvieco, 2015; Chuvieco *et al.* 2018), lo que aumenta el nivel de confianza del producto. A diferencia de la detección de puntos de calor, un método frecuentemente utilizado en los Sistemas de Alerta Temprana de Incendios Forestales del país, y el cual se limita a indicar la ubicación de incendios potenciales, a partir de las imágenes del proyecto Fire_CCI fue posible estimar no sólo la ubicación, sino también la superficie afectada por incendios individuales.

La mayoría de los estudios realizados en el estado de Jalisco se han enfocado en analizar la incidencia de incendios forestales en Áreas Naturales Protegidas (p. ej. Bosque de la Primavera, Sierra de Manantlán), sin embargo, hay poca información de los patrones espacio temporales, tanto de incendios forestales como de quemas agropecuarias, a nivel estatal. Jalisco es una de las entidades federativas más afectadas por incendios forestales en el país; conforme a datos recuperados por la CONAFOR (1970 a 2022), Jalisco ocupa el quinto lugar con mayor número de incendios (por debajo del Estado de México, Ciudad de México, Michoacán y Colima) pero es la entidad federativa con mayor cantidad de hectáreas incendiadas (CONAFOR 2022). En el presente trabajo se encontró que durante el periodo 2001-2020 ocurrieron 3,858 incendios forestales en el estado, los cuales quemaron 1,434,843 de hectáreas, corroborando que se trata de la entidad con mayor área quemada (acumulada) del país (Tabla 6.1)

A consecuencia de la gran diversidad de condiciones ambientales y sociales presentes en el estado, el patrón espacial de los incendios no fue homogéneo. La mayoría de las igniciones se concentraron en áreas con características favorables para la aparición y propagación del fuego; estas áreas se quemaron en repetidas ocasiones, mientras que otras zonas tuvieron una

baja o nula presencia de incendios. La incidencia de incendios en la entidad tampoco fue constante en el tiempo. Durante el periodo de estudio, algunos años acumularon el mayor porcentaje de igniciones y superficie quemada, mientras que en otros las afectaciones fueron pocas. La heterogeneidad temporal de los incendios estuvo asociada principalmente a la variación en los patrones climáticos y sus oscilaciones, a su vez vinculados con la disponibilidad y variación espacial del combustible (Taylor *et al.* 2003). En un estudio realizado en México, Montoya et al. (2023) exploraron el comportamiento del fuego a nivel nacional y hallaron resultados similares, donde el número de incendios y la superficie quemada mostraron una amplia variabilidad a lo largo de los años, así como a través de diferentes coberturas de vegetación. Esta convergencia sugiere que la heterogeneidad espacio-temporal de los incendios no es un rasgo particular de Jalisco, sino una característica prevalente en todo el territorio nacional.

Comparando con cifras oficiales publicadas por la CONAFOR se encontró que, en general, los resultados obtenidos en el presente estudio subestimaron el número de incendios forestales, pero sobreestimaron el área quemada. De acuerdo con las estadísticas de la CONAFOR, durante el periodo 2001-2020, el promedio anual de incendios forestales en Jalisco fue de 588, con una superficie afectada media anual de 34,016 ha; en el caso de los datos aquí reportados, el promedio anual fue de 193 incendios forestales, con una media de 71,742 ha quemadas al año. De igual forma, no todos los años registrados con mayor y menor incidencia de incendios forestales coincidieron con los datos de la CONAFOR.

Estas variaciones son producto de las diferencias en las metodologías implementadas, cada una con sus propias limitaciones. Toda información proveniente de detección remota trae consigo un porcentaje de error; para la base de datos utilizada (FireCCI5) se reporta un error de comisión del 10% y uno de omisión del 15% (Chuvienco *et al.* 2018). Es posible que la subestimación del número de incendios forestales y sobreestimación del área quemada con respecto a la información de la CONAFOR se originara por la unión de eventos distintos en uno solo, reduciendo el número de ocurrencias y aumentando la cantidad de hectáreas quemadas por incendio. Por su parte, las estadísticas publicadas por organismos oficiales están basadas principalmente en los reportes que realizan las brigadas de combate a incendios que, en algunas ocasiones, no determinan de manera adecuada la superficie quemada

(Balcázar 2011); además, no todos los incendios forestales son combatidos y reportados, especialmente aquellos ubicados en áreas boscosas remotas y de difícil acceso, por lo que existen varias omisiones en las estadísticas reportadas. El uso de métodos de percepción remota para la obtención de datos de incendios puede ser más barato y eficiente que los reportes realizados por brigadas, además de que proporcionan un monitoreo continuo, preventivo e información aun en áreas alejadas, extensas y de difícil acceso (Balcázar 2011). Sin embargo, los métodos de campo también son importantes porque a partir observaciones directas es posible corroborar la existencia del fuego, determinar la causa de los incendios y evaluar sus efectos. Por consiguiente, lo ideal sería implementar una combinación de ambos enfoques.

7.2 Coberturas de suelo con mayor incidencia de incendios

De acuerdo con los datos analizados, la mayoría de los incendios ocurrieron en áreas de vegetación natural o silvestre, mientras que aproximadamente una tercera parte de las igniciones correspondieron a quemas agropecuarias. Lo anterior concuerda con reportes realizados a nivel nacional, que indican una mayor prevalencia de incendios forestales en comparación con quemas asociadas a terrenos de cultivo (CONAFOR 2018; Corona-Núñez 2020).

7.2.1 Incendios forestales

En el área y periodo de estudio, las coberturas forestales con más hectáreas incendiadas (totales y promedio) fueron el bosque de pino-encino y la selva subcaducifolia y caducifolia. Estos resultados son comparables con lo descrito a nivel nacional, donde los bosques templados, caracterizados por la predominancia de especies de pino y encino, así como los bosques tropicales secos, que abarcan a las selvas subcaducifolias y caducifolias, representaron los tipos de vegetación natural con mayor presencia de incendios (CONAFOR 2018; Corona-Núñez et al. 2020; Montoya et al. 2023). Adicionalmente, Montoya et al. 2023 reportaron que, en promedio, un 2.7% de la superficie total del bosque templado en el país se incendia anualmente, similar a lo encontrado en el presente estudio para el estado de Jalisco (2.4%). Por otro lado, la proporción de selva subcaducifolia y caducifolia afectada fue mayor (1.3%) en comparación con lo observado en esta investigación (0.74%); esta variación podría atribuirse, entre otros factores, a la inclusión de otras de comunidades

vegetales dentro de los bosques tropicales secos que también experimentan estacionalidad en sus precipitaciones.

Además de presentar la tasa promedio anual más alta de área quemada (2.41%), los bosques de pino-encino representaron la cobertura con mayor número de igniciones (45.2%), la superficie incendiada total más extensa (60.9%) y la proporción más alta de eventos de más de 2,000 ha (80.13%). Fulé y Covington (1996, 1997); Rodríguez-Trejo (2003); Heyerdahl y Alvarado (2003) y Jardel *et al.* (2004, 2006) indican que los incendios forestales son comunes en estos bosques, los cuales se mantienen bajo un régimen de incendios superficiales intensos, frecuentes y de baja severidad (Jardel *et al.* 2011). Una gran proporción de sus especies están adaptadas o son resistentes al fuego; sus estrategias y características les permiten no solo sobrevivir, sino prosperar y dominar en ambientes sujetos a la influencia del fuego (Keeley y Zedler 1998; Jardel *et al.* 2006). A pesar de que estos ecosistemas se ven favorecidos por el fuego, estudios en bosques dominados por el género *Pinus* y *Quercus* dentro de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán en Jalisco señalan que la ocurrencia repetida de incendios en áreas de regeneración natural impide el establecimiento del renuevo y conduce al reemplazo de especies arbóreas por matorrales secundarios (Jardel *et al.* 2003, 2006), por lo que los incendios recurrentes pueden contribuir a la degradación de estos bosques (Jardel *et al.* 2006). Los mismos estudios también revelan que dentro de la reserva hay sitios donde la regeneración de especies de pino es abundante, dando lugar a rodales sobresaturados y provocando una acumulación excesiva de combustible con una marcada continuidad vertical y horizontal (Jardel *et al.* 2003, 2006), lo que incrementa la probabilidad de incendios severos.

Estudios acerca del origen de los incendios en bosques de pino-encino son escasos; en el estado de Jalisco se ha reportado que las principales causas de incendios en estos bosques son las quemas agropecuarias, los cultivos ilegales, los incendios intencionales y el fuego que escapa de fogatas (Balcázar 2011; Jardel *et al.* 2006). Aunque en estos estudios el porcentaje más alto de incendios forestales estuvo asociado a la presencia de quemas agropecuarias, también se menciona que los cultivos ilegales fueron responsables de la mayor superficie afectada. En el presente estudio se encontró que muchos de los incendios más grandes se localizaron en áreas boscosas remotas, probablemente ligados a actividades

ilícitas. En estas zonas aisladas y de difícil acceso, las operaciones de combate pueden ser menos eficientes; combinado con las altas cargas de combustibles continuos e inflamables característicos de estos ecosistemas (Alvarado *et al.* 2008; Michel-Fuentes 2010) y la presencia de condiciones de sequía, se incrementa la probabilidad de incendios de mayor duración y severidad.

Por otro lado, las selvas subcaducifolias y caducifolias se caracterizan por la presencia de especies latifoliadas que durante la época seca del año pierden sus hojas (50 a 75% de las especies en el caso de las selvas subcaducifolias, y más del 75% en las selvas caducifolias) (Challenger & Soberón 2008). En las selvas medianas subcaducifolias las condiciones húmedas y cálidas favorecen altas tasas de productividad primaria y descomposición, no obstante, el tipo de hojarasca es poco inflamable y los incendios están limitados por la humedad (Jardel *et al.* 2009); estas selvas se mantienen bajo un régimen de incendios superficiales ligeros, ocasionales y, dado que la mayoría de las especies presentes son sensibles al fuego, los incendios tienden a ser de severidad alta (Jardel *et al.* 2011). En comparación, las condiciones secas en las selvas bajas caducifolias restringen la productividad primaria y, por consiguiente, la abundancia y densidad de combustibles superficiales (Michel-Fuentes 2010); su régimen de incendios está caracterizado por incendios superficiales ligeros, ocasionales y de severidad baja (Jardel *et al.* 2011). De manera que, en teoría, ya sea por el exceso de humedad o la falta de combustible, los incendios en las selvas subcaducifolias y caducifolias suelen ser poco frecuentes.

No obstante, en el sitio y periodo de estudio las igniciones en estas selvas representaron el 20.5% del total de incendios registrados, el 15.8% de la superficie quemada total y el 10% de los eventos de más de 2,000 ha. Como ya se había mencionado, estos resultados son congruentes con los hallazgos a nivel nacional, donde los bosques tropicales secos, que incluyen a las selvas medianas y bajas subcaducifolias y caducifolias, representan una de las coberturas forestales con mayor incidencia de incendios. De acuerdo a un estudio realizado por Corona-Núñez *et al.* (2020), del 55% de los incendios detectados en vegetación natural, el 36.1% ocurrieron en bosques tropicales secos, convirtiéndolos en un punto crítico de incendios en términos de la cantidad de episodios registrados. Asimismo, Montoya *et al.* (2023) indican que los ecosistemas forestales (bosques tropicales y templados) constituyen

aproximadamente el 44% del total de eventos de incendio en el país; dentro de los bosques tropicales, 59% de las igniciones se documentaron en bosques tropicales secos. Rodríguez-Trejo (2008) menciona que, en México, el bosque tropical seco es susceptible al fuego debido a prácticas como la tala y la quema. El autor señala que el fuego puede limitar la extensión y la diversidad de estos ecosistemas; por ejemplo, en la Reserva La Sepultura, Chiapas, se ha observado que los incendios han contribuido a la presencia de pastizales.

La existencia de selvas secundarias, así como selvas sujetas a perturbaciones y la fragmentación del hábitat, podría intensificar la susceptibilidad al fuego en estos ecosistemas. La variabilidad en la estructura y composición de especies podría ejercer influencia en la flamabilidad del combustible, los patrones de humedad y las condiciones microclimáticas dentro de las selvas (Michael-Fuentes et al., 2010). En el estado de Jalisco, la selva baja caducifolia es de los tipos de cobertura forestal más próximos a áreas de cultivo, y frecuentemente es utilizada como agostadero para el ganado (Balcázar 2011); por lo tanto, las igniciones pueden estar vinculadas al uso del fuego para desmonte y quema de agostaderos cerriles, así como para la conversión de selva en terrenos de cultivo. De manera similar, se ha documentado que dentro del estado de Jalisco la selva mediana subcaducifolia forma rodales pequeños en medio de una matriz de otros tipos de vegetación (Balcázar 2011) que puede llegar a quemarse (por ejemplo, pastizales inducidos para la ganadería) aumentando la probabilidad de que la selva se incendie, sobre todo en años con periodos de sequía prolongada. Pese a que la mayoría de los incendios en las selvas subcaducifolias y caducifolias fueron menores a 400 ha (83.7%), éstos pueden tener efectos severos, particularmente en las selvas medianas, que están compuestas por especies sensibles al fuego.

Una característica importante que se observó tanto en el sitio de estudio como a nivel nacional fue la marcada variabilidad en el tamaño de los incendios forestales a través de las diversas coberturas de vegetación (Montoya et al., 2023). Esta variabilidad refleja las complejas interacciones entre la dinámica del fuego y las características intrínsecas de cada ecosistema. Un patrón común entre la selva subcaducifolias y caducifolias, el matorral y mezquital y las quemadas agropecuarias fue la predominancia de eventos en el rango de 40 a 400 hectáreas. Este hallazgo sugiere la influencia directa de actividades humanas en los incendios de la selva y el matorral, principalmente aquellas asociadas a la agricultura y ganadería. Esto es

particularmente notorio dado que tanto la selva subcaducifolia y caducifolia como el matorral y mezquital poseen un régimen natural de incendios ocasionales y de pequeña extensión, menor a lo encontrado en este análisis.

Por otro lado, los bosques de pino-encino y los pastizales exhiben una dinámica que incorpora el fuego como parte de su funcionamiento (Jardel *et al.*, 2012). Esta adaptación a incendios periódicos podría explicar la mayor frecuencia de eventos de pequeña escala (menores a 40 hectáreas) en estas coberturas. Los incendios de pequeña magnitud en estos ecosistemas pueden desempeñar roles ecológicos esenciales, como la renovación de nutrientes del suelo y la liberación de semillas para la regeneración de la vegetación (Keeley & Zedler 1998).

7.2.2 Quemadas agropecuarias

De acuerdo con la CONAFOR, las dos principales causas de incendios forestales en el país son las actividades ilícitas (32%) y las quemadas agropecuarias (27%) (CONAFOR 2022). Por su parte, la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del estado de Jalisco (SEMADET 2021) reporta hasta un 75% de incendios ocasionados anualmente por actividades agropecuarias en la entidad. No obstante, es importante tomar en cuenta que lo que comúnmente se denomina como “quemadas agropecuarias” incluye al menos tres tipos de actividades: 1) las quemadas agrícolas, que se realizan para la preparación de los terrenos de cultivo o para eliminar residuos de la cosecha; 2) las quemadas de desmonte, que tienen el objetivo de eliminar cobertura forestal para el cambio del uso de suelo, y 3) las quemadas de agostaderos cerriles para favorecer el rebrote de plantas para el ganado (Balcázar 2011; Jardel *et al.* 2014). Diferenciar entre estos tipos de quemadas es necesario puesto que no todas tienen los mismos efectos: las quemadas agrícolas se llevan a cabo de acuerdo a la norma oficial del fuego (González-Jacobo 2009), por lo que en general son programadas y se aplican de manera controlada, y solo son fuente de incendios forestales cuando ocasionalmente el fuego se escapa hacia áreas forestales adyacentes; en contraste, las quemadas de agostaderos cerriles y las quemadas de desmonte son realizadas de manera deliberada para eliminar cobertura forestal y provocar cambios de uso del suelo (Balcázar 2011).

La clasificación de quemadas agropecuarias implementada en este trabajo incluyó a todas las igniciones asociadas a tierras agrícolas, vegetación cultivada y vegetación inducida; estas

quemadas constituyeron el 32.8% de los eventos observados en el periodo de estudio, pero solo incendiaron el 22.3% del área quemada total. Del total de quemadas agropecuarias registradas, casi el 60% tuvo un tamaño mediano, mientras que el 30% fueron pequeñas; sin embargo, también se observaron algunos eventos mayores a 2,000 ha. Es probable las quemadas agropecuarias de mayor extensión se hayan asociado a quemadas de agostaderos cerriles y/o quemadas de desmonte, donde el fuego es originado en la interfase entre los bosques y los terrenos de cultivo, y que, de manera accidental o provocada, las llamas hayan traspasado hacia terrenos forestales, ocasionando incendios de gran magnitud.

7.3 Heterogeneidad espacial en la incidencia de incendios

Coberturas de vegetación con características muy similares se quemaron de manera diferenciada dependiendo la provincia fisiográfica en la que se encontraron, lo que corrobora la hipótesis de que la variabilidad local implica regulación *Bottom-Up* (los controles *Top-Down* se mantienen relativamente fijos en mismos tipos de vegetación). Dado que los controles *Bottom-Up* son intrínsecamente heterogéneos en el espacio (Turner 2005), su configuración espacial a lo largo de cada provincia fisiográfica determinó el comportamiento del fuego a nivel local.

La variabilidad en la incidencia de incendios dentro de un mismo tipo de vegetación o ecosistema está asociada a la variación espacio-temporal del combustible en el paisaje (Jardel *et al.* 2009), incluyendo su disponibilidad, composición, estructura, humedad, arreglo y continuidad tanto vertical como horizontal. A su vez, las propiedades del combustible están sujetas a las condiciones presentes en una localidad determinada: el estado del tiempo, que afecta la humedad del combustible y su propensión a incendiarse (Jardel *et al.* 2014), la topografía, la cual influye en la distribución local de las comunidades de plantas y redistribuye la energía a través del paisaje (Falk *et al.* 2011; Jardel *et al.* 2014), la influencia de factores antropogénicos, que actúan como agentes de ignición pero también alteran la estructura de la vegetación (Balcázar 2011), y la ocurrencia de disturbios (huracanes, incendios, inundaciones y diferentes tipos de intervenciones humanas) que modifican la composición de especies y su estructura en una porción del ecosistema, y por lo tanto las características de la cama de combustibles y su potencial de incendios (Jardel *et al.* 2014).

El legado de incendios pasados es de particular relevancia en coberturas forestales donde el fuego es un factor recurrente: cada evento de combustión altera las condiciones para la ocurrencia de incendios subsecuentes al reducir de manera temporal la cantidad de combustible disponible en una unidad del paisaje (el fuego consume parte del combustible) (Heyerdahl *et al.* 2001; McKenzie *et al.* 2011); si el efecto del incendio es severo, se reinicia el proceso de sucesión ecológica, creando un mosaico de vegetación en diferente estado sucesional, con una estructura y composición única (Jardel *et al.* 2014).

7.3.1 Bosques de pino-encino

Durante el periodo de estudio, la variación más evidente se observó en la incidencia de incendios de los bosques de pino-encino. Estos resultados coinciden con lo descrito por Vázquez & Rodríguez (2008), quienes mencionan que los paisajes con más variabilidad son aquellos que han tenido una mayor exposición al fuego; asimismo, Chapa *et al.* (2008) y Bizama *et al.* (2011) encontraron que la fragmentación del paisaje aumentó después de los incendios, siendo los tipos de cobertura más fragmentados los bosques de pino y encino. Esto sugiere que el fuego es un mecanismo que impulsa la heterogeneidad del paisaje, principalmente en ecosistemas donde es recurrente, mientras que los paisajes con poca presencia de incendios tienden a ser más homogéneos (Lloret *et al.* 2002; Alva 2016).

Los bosques de pino-encino en la Sierra Madre Occidental experimentaron una mayor proporción de incendios forestales en relación con su superficie total. Concretamente, el 74.7% de la superficie total de bosques de pino-encino en la Sierra Madre Occidental se vio afectada por incendios, en comparación con el Eje Neovolcánico (48%), la Sierra Madre del Sur (37.6%), y la Mesa del Centro (18.3%). No obstante, la mayoría de los incendios en la Sierra Madre Occidental fueron menores a 400 ha (80%), sugiriendo que, a pesar de que se trató de la provincia más afectada, la mayoría de las igniciones provinieron de incendios pequeños y medianos. Por otra parte, se observó que la cantidad de incendios de más de 2,000 ha fue similar a lo largo del sitio de estudio, indicando que incendios de mayores magnitudes estuvieron sujetos a mecanismos *Top-Down* que sincronizan su ocurrencia a través de regiones extensas.

7.3.2 Selva subcaducifolia y caducifolia

Los incendios en la selva subcaducifolia y caducifolia presentaron una menor variación en los patrones de área quemada a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas. Sin tomar en cuenta la Mesa del Centro, la región con menor superficie afectada, la diferencia porcentual promedio de selva incendiada fue del 4%. A diferencia del bosque de pino-encino, los cuales poseen un régimen de incendios frecuente, en las selvas subcaducifolias y caducifolias la presencia del fuego es más ocasional y los eventos son de menor extensión; en consecuencia, la heterogeneidad del paisaje resultado de la propagación del fuego es menor, y por lo tanto también lo es la heterogeneidad espacial de los incendios.

En este caso, la Sierra Madre del Sur resultó ser la provincia con mayor superficie incendiada y con el mayor número de eventos de más de 2,000 ha, además de que se trató de la única región con ocurrencia de *mega incendios* en las selvas subcaducifolias y caducifolias. Una explicación de lo anterior es que esta es la única provincia del estado de Jalisco con mayor presencia de selva mediana; en el resto de la entidad predomina la selva baja. Como se mencionó anteriormente, en las selvas medianas las condiciones húmedas y cálidas favorecen altas tasas de producción de biomasa y acumulación de combustible, y aunque los incendios están limitados por la humedad, en periodos con sequía extrema el fuego puede propagarse (Jardel *et al.* 2011). Por el contrario, en las selvas bajas hay poca abundancia y densidad de combustibles superficiales, limitando la existencia de incendios de grandes magnitudes.

Un rasgo compartido entre los bosques de pino-encino y las selvas subcaducifolias y caducifolias fue que, en ambos tipos de vegetación, los incendios menores a 40 ha resultaron ser los más comunes en la Sierra Madre Occidental, por lo que esta provincia presentó el mayor porcentaje de incendios pequeños, tanto en los bosques como en las selvas. Jardel *et al.* 2006 describen que la extensión reducida de los incendios es común en zonas montañosas por el control que ejerce la topografía y el mosaico de vegetación sobre la propagación del fuego; Romme (1982) también menciona que los incendios tienden a ser más extensos en terrenos llanos o continuos que en terrenos de montaña, donde existe un mosaico complejo de camas de combustibles y barreras topográficas. El relieve accidentado y montañoso es una de las principales características de la Sierra Madre Occidental (Barrera 2002), por lo que el tamaño de los incendios probablemente está condicionado a la influencia de la topografía.

7.3.3 *Quemas agropecuarias*

Las quemas agropecuarias incendiaron un porcentaje similar en las cuatro provincias fisiográficas, representando una diferencia promedio de alrededor del 2.5%. La distribución más homogénea de las quemas con respecto a los incendios forestales tiene que ver con que las primeras están sujetas principalmente al factor humano, el cual controla el número de igniciones, su periodicidad, estacionalidad y extensión (salvo en aquellas ocasiones donde el fuego se escapa o se deja propagar deliberadamente); dado que en este caso el humano es el agente limitante, otros controles como la topografía o el NDVI ejercen una menor influencia, causando menor variabilidad espacial en el comportamiento del fuego.

7.3.4 *Correlación y contribución de controles Bottom-Up*

Ciertos aspectos de la configuración y contribución de los controles *Bottom-Up* coincidieron en el bosque de pino-encino y la selva subcaducifolia y caducifolia. En ambas coberturas la temperatura y el NDVI fueron las variables que en mayor medida explicaron la variabilidad en el comportamiento de los incendios forestales lo largo las cuatro provincias fisiográficas del estado Jalisco. Estos controles están directamente relacionados con la cantidad de humedad en el complejo de combustibles, la cual propicia o limita la aparición y propagación del fuego; de ahí que su relevancia haya permanecido constante sin importar el tipo de ecosistema. Es importante mencionar que la temperatura no se correlacionó positivamente con ninguna variable, pero se correlacionó negativamente con el NDVI, indicando que estos controles tienen el efecto opuesto sobre la ocurrencia de incendios: altas temperaturas normalmente implican una disminución en la humedad del combustible (aumentando la probabilidad de incendios), mientras que valores elevados de NDVI reflejan mayor verdor y humedad de la vegetación. A diferencia de la temperatura, el NDVI se correlacionó positivamente con algunas variables, más frecuentemente con la precipitación; la asociación positiva entre el NDVI y precipitación no es sorprendente, ya que un aumento en la precipitación generalmente conduce a un aumento en el verdor y densidad de la vegetación, lo que se refleja en valores más altos de NDVI.

En los bosques y selvas de todas las provincias fisiográficas la ocurrencia de incendios también fue explicada por la distancia a campos agrícolas y distancia a carreteras o caminos

urbanos, ambas agrupadas en todos los casos. La correlación positiva entre estas variables podría significar que las actividades agropecuarias, como la preparación de cultivos y el pastoreo del ganado, son más frecuentes o intensivas en áreas cercanas a carreteras o caminos pavimentados. Estas actividades, combinadas con fuentes de ignición como vehículos o presencia humana, pueden aumentar la probabilidad de incendios y su propagación hacia áreas de vegetación adyacente. Otra interpretación es que tanto los campos de cultivo como las carreteras y caminos urbanos conducen a la fragmentación del paisaje; esta fragmentación puede crear interfaces entre terrenos agropecuarios, asentamientos humanos y vegetación natural, aumentando la susceptibilidad de ignición y propagación del fuego (Simmons *et al.* 2004)

Por otro lado, el efecto de la topografía en ambas coberturas de vegetación fue mucho más variable. No sólo su contribución fue diferente dependiendo de la provincia fisiográfica, también lo fue su correlación con otros controles *Bottom-Up*. Es conveniente considerar que la influencia de la topografía en la ocurrencia y propagación del fuego está fuertemente ligada a su interacción con otros elementos del paisaje (p. ej. tipo de vegetación, condiciones climáticas, actividades humanas); estas interacciones son complejas por naturaleza y pueden resultar en efectos indirectos de la topografía difíciles de cuantificar (Heinselman 1973; Agee *et al.* 1993; Heyerdahl *et al.* 2001). Algunos estudios también reportan que la topografía ejercerá una mayor influencia sobre los regímenes de incendios en paisajes con relieve accidentado, en comparación con paisajes con un relieve más suave (McKenzie *et al.* 2016; Parks *et al.* 2012), y que el control topográfico en los patrones espaciales del fuego únicamente surge cuando la complejidad del terreno supera un determinado umbral (Taylor & Skinner 2003; Scholl & Taylor 2010). Lo anterior explica por qué en la Sierra Madre Occidental el efecto de la topografía fue más significativo que en otras provincias, incluyendo la Sierra Madre del Sur.

Los patrones encontrados en el bosque de pino-encino y la selva subcaducifolia y caducifolia sugieren que la contribución de los distintos controles *Bottom-Up* varió más en función de la provincia fisiográfica que por el tipo de vegetación; los factores más importantes dentro de cada provincia coincidieron independientemente de la cobertura forestal de origen.

El patrón fue menos consistente en cuanto a la correlación de las distintas variables *Bottom-Up*; a lo largo del estado de Jalisco, las asociaciones entre los distintos tipos de controles (atmosféricos, combustible, topográficos, antrópicos) variaron tanto por cobertura como por provincia fisiográfica. Las correlaciones más comunes se observaron por un lado entre los factores antrópicos (distancias), y las condiciones atmosféricas y del combustible (temperatura, precipitación y NDVI) por el otro. Fuera de estos dos conjuntos de variables no se encontró una tendencia clara, sugiriendo que, a pesar de que la importancia de los diversos controles *Bottom-Up* se mantuvo relativamente constante a través del paisaje, su arreglo, estructura e interacción espacial fue más heterogénea, promoviendo la variabilidad espacial en la incidencia de incendios.

7.4 Patrones generales de regulación *Bottom-Up*

A partir de los diagramas de dispersión, donde se incluyó información de todas las igniciones, fue posible observar los patrones generales de asociación entre los incendios y los distintos controles *Bottom-Up*. El primer análisis consistió en verificar si, bajo la influencia de la regulación *Bottom-Up*, hubo alguna diferencia entre el número de quemas agropecuarias y de incendios forestales. Se encontró una clara distinción entre ambos tipos de eventos: las quemas agropecuarias se agruparon entre la temperatura y la precipitación, con la nube de puntos más densa cercana a la temperatura, mientras que las observaciones correspondientes a incendios forestales se dispersaron a lo largo de todo el gráfico. Lo anterior indica que las quemas agropecuarias se vieron más influenciadas por el estado del tiempo atmosférico que por cualquier otra variable local analizada, y que a pesar de que el factor antropogénico es su principal fuente de ignición, las variables atmosféricas restringen o promueven su propagación. Estos resultados se alinean con el estudio realizado por Montoya et al. (2023), en el cual se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar los principales factores asociados a la incidencia de incendios en diversas coberturas vegetales. En dicho estudio, se encontró que los incendios en terrenos de cultivo fueron influenciados por factores climáticos como la isothermalidad, la estacionalidad de la precipitación, y la cantidad de precipitación durante los periodos más secos y fríos del año.

Lo anterior tiene implicaciones prácticas, por ejemplo, para establecer recomendaciones de cuándo evitar el uso del fuego. Aunque ya existen recomendaciones basadas en la Norma

NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, sería necesario establecer umbrales de temperatura y precipitación basados en condiciones previas, como la temperatura promedio de los últimos 7 días y la precipitación acumulada en los últimos 15 días antes de una quema programada. Estas sugerencias serían eficientes en el caso de las quemas agropecuarias que no tienen el propósito de provocar cambios del uso de suelo; las quemas de agostaderos cerriles y de desmonte requieren la creación de otro tipo de políticas, como el manejo del fuego y el refuerzo de la vigilancia (Balcázar 2011).

Dentro de los incendios forestales también se distinguieron agrupaciones por tipo de vegetación. La incidencia de incendios en el matorral y pastizal estuvo influenciada principalmente por la temperatura. Ambas coberturas son propias de climas áridos y semiáridos (CONABIO 2021) donde la lluvia es escasa y la fluctuación de la temperatura es extrema: altas temperaturas en el día y frío intenso durante la noche. Por consiguiente, la variación en la temperatura a corto plazo impulsa la variación en la ignición y propagación del fuego en estas coberturas; asimismo, las altas temperaturas diurnas establecen las condiciones necesarias para que inicie el proceso de combustión, aunque en el caso del matorral, los incendios están limitados por la cantidad de combustible (Jardel *et al.* 2011).

En cuanto a la selva subcaducifolia y caducifolia y el bosque de pino-encino, la agrupación de incendios por provincia fisiográfica corroboró que cada región posee propiedades locales intrínsecas que determinan la influencia de los controles *Bottom-Up* sobre el comportamiento del fuego. Independientemente de la provincia, una gran porción de los incendios ocurridos en selvas y bosques se distribuyeron cerca de la temperatura y el origen, implicando influencia conjunta de distintas variables. Un resultado interesante fue que el conjunto de incendios pertenecientes a la Sierra Madre del Sur se desplazó más hacia el NDVI y la precipitación; los histogramas de este estudio revelaron que esta provincia presentó los valores más altos de NDVI del estado de Jalisco (ver Anexo), que prevalecen tanto en la época de lluvias como en la época seca. Lo anterior es consecuencia, en primer lugar, de la presencia de selvas húmedas en la región, las cuales mantienen un alto nivel de verdor por las condiciones de humedad que persisten la mayor parte del año (Jardel *et al.* 2011); en segundo, la abundante precipitación en esta región (INEGI 2020) incrementa la vigorosidad y cantidad de biomasa en bosques y selvas, que en los meses secos tiene el potencial de

convertirse en combustible disponible. La Sierra Madre del Sur también fue la provincia con mayor superficie quemada total por incendios forestales y mayor ocurrencia de *mega incendios*, lo que sugiere que puede existir una correlación entre la extensión de los incendios y la producción de combustible potencial en esta provincia. Pese a la hipótesis anterior, cuando se tomó al tamaño de los incendios como criterio para la formación de *clusters* no se observó ninguna tendencia clara, lo que apunta a que por sí solos los controles *Bottom-Up* y su heterogeneidad espacio-temporal no son suficientes para explicar la variabilidad en el tamaño de los incendios forestales; es necesario incorporar la influencia de la regulación *Top-Down* para justificar la variación en la magnitud de los incendios.

En lo relativo a la dinámica temporal del fuego, se identificaron tendencias asociadas a controles *Bottom-Up*. La distribución mensual de los incendios forestales mostró un gradiente marcado: conforme avanzaron los meses de la temporada alta de incendios (marzo a junio) las observaciones se desplazaron desde la temperatura, hacia el NDVI y la precipitación. Los primeros meses de la época seca (marzo y abril) se caracterizan por altas temperaturas, así como por la escasa o nula precipitación. Dado que comúnmente no llueve durante este periodo, la variación en la incidencia de incendios depende en mayor medida de la oscilación térmica: si las bajas precipitaciones coinciden con temperaturas altas, el combustible será más propenso a incendiarse (Jardel *et al.* 2011). En mayo la importancia de la temperatura se mantuvo; no obstante, en conjunto, los incendios se agruparon más cerca del NDVI y precipitación que en los dos meses anteriores. A pesar de que en mayo las temperaturas promedio diarias se mantienen elevadas, la precipitación y NDVI empiezan a cobrar relevancia puesto que el antecedente de sequía es más pronunciado, además de que en algunas ocasiones las lluvias comienzan en este mes, afectado la humedad del combustible y su propensión a incendiarse; el comportamiento del fuego será muy distinto en años donde las lluvias inicien en mayo, frente a años donde las condiciones secas permanezcan. Bajo esta misma lógica, es congruente pensar que junio es el mes donde el NDVI y la precipitación explican una mayor variabilidad en la ocurrencia de incendios, sin dejar de lado la importancia de la temperatura. Al tratarse de un mes de transición entre la época seca y la época de lluvias, la presencia o ausencia de eventos de precipitación, así como el momento en el que ocurran, es clave, sobre todo considerando que la sequía antecedente lleva varios meses; de prolongarse las condiciones secas, la cantidad de combustible disponible será cada

vez mayor. Muchas observaciones en abril, junio y particularmente en mayo, también estuvieron asociadas a factores antrópicos y topográficos (pendiente), reflejando que la influencia humana está presente durante toda la temporada alta de incendios, y que su efecto se ve amplificado cuando converge con las condiciones de los meses más secos.

Finalmente, la agrupación anual mostró que las observaciones de años con menor incidencia de incendios se distribuyeron entre la precipitación y temperatura, mientras que en años con mayor número de igniciones el resto de las variables *Bottom-Up* cobraron importancia. Esto puede interpretarse de la siguiente manera: a escala local, la influencia de factores antrópicos y topográficos sobre el comportamiento del fuego es posible una vez que se cumplen un mínimo de condiciones meteorológicas, que directamente afectan la disponibilidad y humedad del combustible (Gutiérrez *et al.* 2021). En años donde estas condiciones no se cumplen (humedad excesiva o temperaturas bajas) los incendios son escasos y otros controles pasan a segundo plano; en contraste, en años secos existen las condiciones base para la propagación del fuego, y otras variables comienzan a jugar un papel significativo.

7.5 Variabilidad climática y regulación *Top-Down*

Como ya fue mencionado, la propagación del fuego está influenciada por la variabilidad local en los patrones espaciales del combustible. No obstante, el clima regional determina las características de la vegetación a gran escala, así como las tasas de productividad primaria y descomposición de las que depende la acumulación de combustibles forestales (Ireland *et al.* 2011; Jardel *et al.* 2011); a su vez, la intensidad de las condiciones de sequía y su duración están en función de la variación estacional del clima a escalas anuales e interanuales. De modo que el clima actúa como el principal control *Top-Down*, cuya característica más evidente es la ocurrencia sincrónica de incendios a través de regiones extensas y tipos de vegetación, más allá del alcance de eventos individuales, y en contraste con la heterogeneidad espacial ocasionada por los controles *Bottom-Up* (Swetnam & Betancourt 1998; Falk *et al.* 2011).

7.5.1 Patrones de temperatura, precipitación y NDVI

Al analizar los patrones de precipitación y temperatura en 2005, 2011 y 2017 se identificaron tres mecanismos principales asociados a la alta incidencia de incendios en estos años. El

primero está asociado a las condiciones de sequía o humedad presentes en los meses previos al inicio de la temporada alta de incendios, que en este caso comprendió el periodo de octubre (del año anterior) a febrero (del año en cuestión). Las bajas temperaturas características de estos meses limitan la aparición del fuego, sin embargo, la cantidad de lluvia recibida determinará qué tan seco se encontrará el combustible para cuando comiencen a subir las temperaturas de la época seca. A pesar de que en los tres años se registraron pocos eventos de precipitación durante estos meses, la sequía antecedente en 2011 fue mucho más pronunciada a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco.

El segundo mecanismo está relacionado con la duración de la época seca: cuanto más tiempo esté expuesto el combustible a condiciones que propicien la aparición del fuego, mayor el riesgo de incendios y de que éstos incrementen su extensión. Este escenario se evidenció en 2005, donde la sequía intensa registrada en junio, combinada con las altas temperaturas presentes, prolongó significativamente la temporada de incendios.

En 2017, los meses previos a la temporada alta de incendios experimentaron una ligera tendencia hacia la sequía. Por otro lado, junio de ese año se clasificó como un mes muy seco según el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Por lo tanto, ambos mecanismos, la sequía antecedente a la temporada alta de incendios y la prolongación de la temporada seca, estuvieron presentes, aunque ninguno de manera tan evidente como en los casos de 2011 y 2005, respectivamente

El tercer mecanismo identificado fue la intensidad de la sequía durante los meses de la época seca, el cuál demostró ser el más importante en términos de incidencia de incendios forestales. A pesar de que inicialmente presentaron condiciones de sequía ligeramente variadas, se observó un patrón común en 2005 y 2017. En ambos casos, los meses anteriores a la temporada alta de incendios estuvieron marcados por condiciones que iban desde ligeramente húmedas a normales (en 2005) y ligeramente secas (en 2017). Sin embargo, a medida que se acercó la temporada alta de incendios, los meses de volvieron más secos; en mayo y junio de ambos años, las condiciones secas a muy secas marcaron un cambio abrupto en la tendencia. Por lo tanto, ninguno de estos dos años fue catalogado como particularmente seco hasta la llegada de mayo y junio.

En contraste, en 2011, la sequía antecedente a la temporada alta de incendios fue muy evidente, acompañada de temperaturas máximas por encima de las normales históricas. Asimismo, este año registró las temperaturas máximas promedio más elevadas de los tres años analizados (2005, 2011, 2017). No obstante, y contrario a lo observado en 2005 y 2017, los meses de mayo y junio presentaron condiciones climáticas normales según el SPI, marcando la diferencia en la incidencia de incendios. En 2011, a pesar de las altas temperaturas máximas registradas y la escasa precipitación durante el periodo de octubre (2010) a marzo (2011), los incendios forestales resultaron ser menos frecuentes que en 2005 y 2017. Estos hallazgos sugieren que las condiciones climáticas en mayo y junio son críticas para la incidencia y extensión de los incendios, en particular la cantidad de precipitación recibida durante estos meses. Lo anterior es razonable puesto que a menudo mayo y junio están relacionados con un antecedente prolongado de sequía. La falta de humedad en el complejo de combustibles se vuelve más pronunciada a medida que avanza la temporada de secas; lo que puede llevar a condiciones de sequía extrema en los últimos meses de la temporada alta de incendios.

Por otra parte, años con baja incidencia de incendios presentaron mecanismos opuestos a los identificados para 2005, 2011 y 2017. En primera instancia, las bajas temperaturas características de los meses invernales estuvieron acompañadas por eventos de lluvia recurrentes, lo que estableció condiciones antecedentes húmedas a la llegada de la temporada alta de incendios. Este patrón fue particularmente notorio en 2014, donde los meses previos a la época seca presentaron condiciones húmedas a muy húmedas. En segundo lugar, la llegada de las lluvias a inicios de mayo, observado en los tres años de baja incidencia, 2002, 2014 y 2015, acortó el período durante el cual el complejo de combustibles estuvo expuesto a las condiciones de sequía típicas de la temporada alta de incendios. En tercer lugar, en términos generales, las temperaturas máximas promedio de estos años se mantuvieron por debajo de las normales climatológicas, tanto en el período previo (octubre a febrero) como durante la temporada seca. Este patrón fue especialmente evidente en 2015, ya que se mantuvo constante en las cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en las diversas provincias fisiográficas de Jalisco. El último mecanismo identificado estuvo asociado a la elevada humedad presente en estos años, específicamente durante meses de la temporada alta de incendios (marzo a junio). En 2015, este mecanismo fue especialmente notorio debido a

las condiciones muy húmedas y extremadamente húmedas registradas a lo largo de este periodo. En 2014 estos meses también exhibieron condiciones húmedas. Por otro lado, 2002, comenzó con condiciones relativamente secas en la época antecedente a la época seca; no obstante, el año experimentó una transición hacia condiciones húmedas a lo largo de la temporada de incendios. La combinación de estos factores condujo a una baja incidencia de incendios, particularmente en 2014 y 2015, donde los niveles de humedad fueron significativamente altos y los días poco calurosos, incluso durante los meses de la temporada de secas.

La respuesta de la vegetación a los patrones de precipitación y temperatura se reflejó en la variación interanual y mensual del NDVI. Años con valores elevados del índice se caracterizaron por condiciones húmedas y una menor incidencia de incendios, mientras que años secos exhibieron valores bajos de NDVI y una mayor frecuencia de igniciones. Además, es importante destacar que los valores más bajos de NDVI se observaron en junio, coincidiendo con la prolongación de las condiciones de sequía. Este hallazgo respalda la idea de que al término de la temporada de sequía es cuando el combustible se encuentra en su condición más seca (Carvalho *et al.* 2021).

Los resultados anteriores apuntan a que el NDVI puede ser utilizado como un indicador valioso en el estudio y la predicción de incendios forestales: valores bajos del NDVI podrían señalar una mayor probabilidad de incendios debido a la menor humedad de la vegetación, mientras que valores altos podrían indicar condiciones más húmedas y un menor riesgo de incendios. En última instancia, esto subraya la necesidad de comprender cómo las condiciones climáticas pueden influir en la disponibilidad de combustible forestal y, por ende, en el riesgo de incendios forestales.

7.5.2 Patrones de incidencia de incendios

La variabilidad interanual de la precipitación y temperatura generó condiciones que sincronizaron la incidencia de incendios a través del estado de Jalisco, tanto en años con extensa superficie incendiada, como en años con poca presencia del fuego. Asimismo, se encontró que la mayor parte de los incendios de gran magnitud se concentraron en periodos

con mecanismos de regulación *Top-Down* evidentes: el 42% de los eventos de más de 2,000 ha y el 68% de los *mega incendios* ocurrieron entre 2005, 2011 y 2017.

Aunque durante estos años la ocurrencia de incendios forestales se distribuyó a lo largo de las cuatro provincias fisiográficas de Jalisco, algunas regiones se incendiaron más que otras. La Sierra Madre Occidental resultó ser la provincia más afectada durante 2005, 2011 y 2017, con 192,563 ha incendiadas y el mayor número de *mega incendios*. Anteriormente se había encontrado que, a causa de la complejidad de la topografía en la Sierra Madre Occidental, una gran proporción de las igniciones fueron menores a 40 ha (51%); sin embargo, Flatley *et al.* (2010) mencionan que la topografía interactúa con el clima de tal forma que los incendios se propagan independientemente de la configuración topográfica en años con sequía extrema; Johnson (1992), Turner *et al.* (1997) y Heyerdahl *et al.* (2001) también describen que bajo condiciones extremas del clima (fuertes sequías y altas temperaturas) los incendios tienden a ser extensos y su comportamiento es independiente a los controles topográficos. Esto quiere decir que hay evidencia, incluyendo los resultados de este estudio, de que en años con sequía intensa la regulación *Top-Down* genera condiciones del combustible que suprimen el efecto de algunos controles *Bottom-Up*, como pueden ser las barreras topográficas.

En años donde la regulación *Top-Down* es predominante, la influencia de la actividad humana también puede verse amplificada o limitada. Un ejemplo son las quemas agropecuarias, que al igual que los incendios forestales, fueron más abundantes en años con sequía intensa y poco frecuentes en años húmedos: en total ocurrieron 72 quemas agropecuarias en 2002, 2014 y 2015 mientras que, en 2005, 2011 y 2017, se generaron 552. No sólo la cantidad de quemas fue mayor en años secos, también lo fue su tamaño: del total de quemas registradas de más de 2,000 ha, la mitad ocurrieron en 2005, 2011 y 2017.

7.5.3 Efecto de El Niño Oscilación del Sur

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) se ha demostrado afecta la ocurrencia de incendios forestales en muchas partes del mundo (Yocom *et al.* 2010). ENOS actúa como regulador *Top-Down* al influir en los patrones de temperatura y precipitación a gran escala, que a su vez sincronizan la incidencia de incendios a través de regiones extensas (Kitzberger *et al.* 2007; Heyerdahl & Alvarado, 2003). Aunque en diversas ocasiones se ha reconocido el

vínculo entre ENOS y la ocurrencia de incendios forestales, su asociación aún no es clara; ésta difiere a nivel regional y además varía en el tiempo, con asociaciones significativas en ciertos periodos y épocas del año, y relaciones poco explícitas en otras ocasiones (Neger *et al.* 2022; Yocom *et al.* 2010).

Magaña *et al.* (2003) y Bravo *et al.* (2017) describen que en México la fase cálida de ENOS (El Niño) provoca un aumento en la precipitación durante los meses de invierno, principalmente en el norte y noroeste del país, mientras que en el verano el principal efecto es la disminución de las lluvias en la parte sur y centro del territorio. Lo opuesto se ha documentado para la fase fría (La Niña), que presenta una tendencia general al aumento de la precipitación durante la temporada húmeda en el verano, y una disminución en los meses invernales (Bravo *et al.*, 2010, 2017). Magaña (2003) menciona que en el norte del país la tendencia es a un descenso generalizado de las lluvias durante eventos La Niña, sin importar la época del año. En un estudio enfocado en el efecto del clima sobre la ocurrencia de incendios en bosques de pino-encino de la Sierra Madre Occidental en México, Heyerdahl y Alvarado (2003) encontraron que en esta región los inviernos secos provocados por La Niña resultaron en una temporada de incendios más larga, incrementando la probabilidad de eventos severos; por el contrario, años El Niño no se asociaron significativamente con temporadas sin presencia del fuego. Específicamente para Jalisco son pocas las investigaciones que analizan la relación entre ENOS y los incendios forestales; Cerano-Paredes *et al.* (2015) encontraron que, para un bosque de pino en la Sierra de Manantlán, cada uno de los incendios reconstruidos durante el periodo de 1956 a 2010 coincidieron con eventos ENOS tanto en su fase El Niño como en su fase La Niña.

A pesar de la compleja relación entre ENSO y la ocurrencia del fuego, los resultados obtenidos en este análisis sugieren que en el estado de Jalisco la fase negativa de ENOS (La Niña) estuvo asociada a una mayor incidencia de incendios, mientras que años con fase positiva (El Niño) presentaron una baja frecuencia de igniciones. Estos resultados apuntan a que el comportamiento del ENOS en el estado de Jalisco es similar a lo reportado para el norte y noroeste de México: durante la fase El Niño la precipitación incrementa significativamente en esta porción del país, y en cambio, en condiciones La Niña, las lluvias se ve disminuidas (Magaña 2003; Bravo *et al.* 2010). Aunque en general la fase negativa del

ENOS sí se correlacionó con años de alta incidencia de incendios, su efecto sobre la propagación del fuego fue variable; una mayor intensidad del fenómeno no siempre implicó una mayor superficie incendiada.

Si bien la tendencia general fue que años La Niña presentaran una alta incidencia de incendios y años El Niño una baja, no todos los años con sincronía en la ocurrencia de incendios se asociaron a algún evento del ENOS. Una posible explicación es que ENOS no es la única oscilación climática que puede afectar los patrones de precipitación y temperatura a gran escala: la Oscilación Decadal del Pacífico, la Oscilación Multidecadal del Atlántico y los monzones son algunos ejemplos (Kitzberger *et al.* 2007; Ireland *et al.* 2012). Otra hipótesis es que la influencia de ENOS sobre la incidencia de incendios no necesariamente se observa de manera inmediata: históricamente se ha visto que años con incendios extensos estuvieron ligados a condiciones de sequía antecedidas por años con condiciones húmedas. La asociación entre incendios grandes y años húmedos previos es una consecuencia de la acumulación de combustible potencial durante los mismos (Swetnam & Baisan 2003); por lo tanto, ENOS y su efecto sobre la temperatura y precipitación, pueden influenciar la probabilidad de incendios forestales al afectar la cantidad de combustible, en vez de su humedad (Heyerdahl & Alvarado, 2003). En contraste, el combustible disponible se ve reducido en años con alta presencia de incendios. Cabe la posibilidad de que en el sitio de estudio, los ciclos entre la fase positiva y negativa del ENOS hayan impulsado esta dinámica del combustible. En general, los incendios fueron abundantes en años subsecuentes a años húmedos, incluyendo aquellos con condiciones El Niño; por ejemplo, 2005, precedido por 2004 y 2002; 2011, precedido por 2009 y 2010; y 2017, antecedido por los años más húmedos del periodo de estudio, 2014 y 2015. Adicionalmente, algunos de estos años coincidieron con la fase La Niña (sequía). De manera similar, no se observaron dos años consecutivos con alta incidencia de incendios a lo largo del periodo de estudio corroborando que, en años subsecuentes a periodos de sequía, en los que hubo incendios, un gran porcentaje del combustible disponible es consumido por el fuego. La transición de un estado atmosférico a otro es característico del sistema ENOS (Heyerdahl & Alvarado 2003; Kiladis y Diaz 1989), lo que puede provocar patrones sincrónicos de incendios forestales a través de amplias regiones (Swetnam & Betancourt 1998).

7.6 Modelado espacial de área quemada por incendios forestales

Dada su naturaleza estocástica, los incendios forestales pueden ser estudiados desde un marco probabilístico (Preisler & Westerling 2007; Turner 2009). Estudios previos han abordado el tema de los incendios utilizando métodos estadísticos; sin embargo, la mayoría se han enfocado en calcular la probabilidad de ignición en alguna localidad dentro del sitio de estudio, sin considerar el área quemada por evento individual (Verdoy 2019). Debido a que INLA es una aproximación relativamente reciente (Rue *et al.*, 2009), un gran porcentaje de los trabajos orientados a incendios que han implementado esta metodología provienen de América del Norte y el Mediterráneo (Pimont *et al.* 2020). En México, y al momento de la elaboración del presente análisis, únicamente se tiene conocimiento de otra investigación (Villar-Hernández *et al.* 2022) que utilizó este método para modelar la ocurrencia de incendios forestales en Oaxaca.

Para el ajuste se probaron distintas combinaciones de variables, pero el mejor modelo resultó ser aquel que contenía la información de todas las covariables, así como el efecto del componente espacial y temporal. Lo anterior es razonable puesto que los incendios son perturbaciones que se propagan a través del espacio y a lo largo del tiempo, y cuya intensidad depende explícitamente de su interacción con distintos elementos del paisaje (McKenzie *et al.* 2011). Si bien la calidad de los modelos ajustados mejoró considerablemente al incluir un término espacial, incorporar la información de las covariables fue fundamental para explicar con mayor precisión la variabilidad espacial de la superficie incendiada; además, a partir de los coeficientes del modelo, fue posible interpretar la relación de las distintas covariables con el tamaño de los incendios, así como la magnitud de dichas asociaciones.

7.6.1 Covariables

Una gran proporción de la variación espacial del tamaño de los incendios está intrínsecamente ligada a la variabilidad espacial de las coberturas de suelo (Díaz-Avalos *et al.*, 2016). De acuerdo con los coeficientes estimados por el modelo, la selva subcaducifolia y caducifolia y el humedal fueron las dos coberturas correlacionadas significativamente con el área quemada. La asociación entre la selva subcaducifolia y caducifolia con la incidencia de incendios es clara dado que se trató de la segunda cobertura con mayor número de igniciones

en el sitio de estudio; el coeficiente negativo es consecuencia de la comparación con el bosque de pino-encino (la categoría de referencia) que representó el tipo de vegetación con los incendios más grandes del periodo de estudio; en otras palabras, la distribución espacial de la selva subcaducifolia y caducifolia afecta la incidencia de incendios forestales, los cuales tienden a ser de menor tamaño en esta cobertura que en el bosque de pino-encino. Por su parte, los humedales son uno de los ecosistemas con menor presencia del fuego, por lo que su distribución también influye en la extensión de los incendios al limitar su propagación.

En cuanto a las variables meteorológicas y del combustible, nuevamente la temperatura resultó ser uno de los controles con mayor influencia sobre la incidencia de incendios forestales, en este caso sobre la superficie incendiada. De manera similar, se observó que el coeficiente del NDVI fue el más alto de todas las covariables, indicando una fuerte asociación con el tamaño de los incendios. Lo anterior se asemeja a los resultados previamente obtenidos en el Análisis de Componentes Principales; no obstante, es importante recordar que en el ACP se analizó la relación de los controles locales con la ocurrencia de incendios, mientras que los coeficientes del modelo revelaron la asociación de las covariables con el tamaño de los eventos individuales. El coeficiente positivo de la temperatura es fácilmente interpretable, ya que a medida que la temperatura aumenta, la humedad relativa del aire tiende a disminuir, lo que hace que los materiales combustibles sean más susceptibles a la ignición. Esto significa que a temperaturas más altas, el combustible forestal es más propensos a arder y a propagar el fuego.

El coeficiente positivo estimado para el NDVI tiene por lo menos dos explicaciones. La primera, que el NDVI es más alto en coberturas forestales como los bosques, donde los incendios tuvieron mayor alcance, que en coberturas como los matorrales, pastizales y tierras de cultivo, los cuales presentaron incendios más pequeños. La segunda es que valores altos del índice generalmente indican una mayor densidad y vigorosidad de la vegetación. Esto se traduce a una mayor cantidad de biomasa y, por lo tanto, mayor acumulación de combustible, lo que a su vez puede contribuir a la propagación de incendios más grandes y severos.

Por otro lado, la precipitación no resultó significativa; sin embargo, al eliminarla de la ecuación, el rendimiento del modelo disminuía. Este hallazgo sugiere que la contribución de la precipitación a la explicación de la variación en la extensión de los incendios forestales

podría estar implícita en otras variables, como la temperatura y el NDVI (las cuales se correlacionan con la cantidad de lluvia recibida en una región). Lo anterior tiene importantes implicaciones para el estudio de incendios forestales. La correlación entre estas variables plantea la posibilidad de que, en lugar de analizarlas de forma independiente, podamos centrarnos en una de ellas como indicador principal, optimizando recursos y enfoques de investigación. Por ejemplo, si encontramos una fuerte correlación entre la temperatura y la incidencia de incendios forestales en la región de estudio, sería posible considerar la temperatura como un indicador clave para pronosticar y gestionar el riesgo de incendios.

Los coeficientes significativos y positivos de las distancias antrópicas en la media posterior sugieren que a medida que la distancia aumenta, tanto a caminos urbanos y carreteras como a campos agrícolas, el tamaño de los incendios también incrementa. Estos coeficientes indican que, manteniendo constantes las demás covariables, el tamaño de los incendios incrementaría aproximadamente un 1.28% por cada kilómetro adicional de distancia a caminos urbanos y carreteras, y un 1.13% por cada kilómetro extra de distancia a campos agrícolas. Este fenómeno probablemente sucede porque las igniciones cercanas a redes viales y terrenos de cultivo son más fáciles de detectar y combatir, previniendo que el fuego se propague sobre áreas más extensas (Serra *et al.* 2014b). Lo anterior también implica que los incendios más grandes tienden a ocurrir en regiones remotas, donde las actividades de combate a incendios toman más tiempo, y donde las igniciones están mayormente asociadas a incendios provocados, ya sea por conflictos de propiedad de la tierra, cultivos ilícitos u otro tipo de actividad ilegal, como las quemas para el cambio del uso de suelo o desmonte (Balcázar 2011).

Con respecto a la topografía, únicamente la orientación de ladera resultó ser un factor relevante para explicar la variación en la extensión de los incendios forestales, con coeficientes significativos y negativos en todas sus categorías (sur, este, oeste). Los coeficientes negativos indican que, en comparación con la orientación hacia el norte (categoría de referencia), el resto de las clases presentaron incendios de menor tamaño; este resultado contradice lo reportado en la literatura, donde se describe que en el hemisferio norte las laderas con exposición hacia el sur y oeste reciben más radiación solar que laderas hacia el norte y este, y en consecuencia, el combustible es más seco y propenso a incendiarse

(Holland & Steyn 1975; González-Hidalgo *et al.* 1996; Heyerdahl *et al.* 2001). Sin embargo, la orientación de ladera es un factor que depende de otros elementos del relieve, principalmente de la pendiente: en terrenos suaves con pendientes poco pronunciadas, la exposición a la radiación solar no varía de manera importante a través del espacio (Heyerdahl *et al.* 2001). Al mismo tiempo, distintas orientaciones de ladera están relacionadas al desarrollo de diferentes tipos de comunidades vegetales, las cuales pueden ser más o menos propensas a incendiarse. La correlación con estas (y otras) variables pudo afectar el resultado del ajuste. Algo parecido probablemente sucedió con los otros componentes de la topografía; los coeficientes no significativos de la pendiente y elevación se atribuyen a la compleja interacción de estas variables con otros factores como la humedad, exposición a la radiación solar, tipo de cobertura forestal, cantidad y arreglo del combustible e influencia de diversas actividades antrópicas, lo que las hizo difíciles de cuantificar (Parks *et al.* 2012). Aun así, se encontró que el rendimiento del modelo aumentaba si no se descartaban estas variables.

Con el fin de incorporar la variación estacional e interanual del área quemada, los meses y años del periodo de estudio también se consideraron como covariables en el modelo; al estar asociadas con la variabilidad climática de mayor escala, estas variables representaron parte del efecto de la regulación *Top-Down*. Se encontró que los coeficientes de ambos factores no fueron significativos en el modelo más completo; sin embargo, antes de agregar el componente no lineal del tiempo, algunos meses y años del periodo de estudio (2001-2020) sí mostraron significancia estadística. Lo anterior sugiere que la variación temporal de la superficie incendiada fue capturada adecuadamente por el cambio gradual y la correlación temporal de la incidencia de incendios diaria, absorbiendo el efecto estacional y anual.

Otro hallazgo interesante fue el rango nominal de la covarianza del modelo, el cual indica que dentro del sitio de estudio existe una correlación espacial entre el tamaño de los incendios a distancias menores de 3.74 km. Eventos dentro de este rango suelen ser de tamaño similar, mientras que incendios más alejados varían en su extensión, lo cual sucede porque en un radio de pocos kilómetros la propagación del fuego afecta la cantidad de combustible disponible para eventos subsecuentes. Esto podría ser útil en la planeación del manejo del fuego, por ejemplo, al decidir el tamaño de las quemas prescritas, las cuales también deben aplicarse en función de la variabilidad histórica de incendios en cada ecosistema. Estas

quemadas tienen el objetivo de eliminar el riesgo de ocurrencia de incendios severos y mantener un régimen de incendios que sea beneficioso para los ecosistemas que experimentan el fuego de manera recurrente.

7.6.2 Validación

En general se encontró una buena correlación entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. De los años del periodo de validación, 2018 presentó el menor porcentaje de error, seguido de 2020 y finalmente 2019; lo anterior se atribuye a que, a diferencia de 2018, el cual presentó un área quemada total dentro del promedio, en 2019 y 2020 la superficie incendiada fue más baja (2020) o más alta (2019) con respecto a la media. En particular en 2019 el error fue mucho más grande, lo que se asocia al mayor tamaño de los incendios ocurridos en este año. Aunque el modelo resultó eficiente para estimar el área quemada de incendios pequeños y medianos, la predictibilidad fue más baja para eventos de mayor magnitud; de igual modo, se observó que las estimaciones de superficie incendiada máxima por evento no superaron las 3,000 ha, por lo que el modelo no predice la incidencia de *mega incendios*.

Para mejorar la predictibilidad del modelo sería necesario incorporar un término que considerara la dimensión temporal, esto es, que los datos estuvieran definidos por un proceso indexado en el tiempo y el espacio (Blangiardo & Cameletti 2015). La interacción entre el componente espacial y temporal ayudaría a explicar la variación de la distribución del área quemada en el tiempo además de en el espacio, y también permitiría la inclusión del efecto de variaciones climáticas de gran escala (p. ej. ENOS).

Asimismo, dado que el modelo se ajustó principalmente a datos de incendios pequeños y medianos, los cuales representaban la mayoría de los datos disponibles, su capacidad para predecir eventos de mayor magnitud de vio limitada. Una estrategia que podría mejorar el ajuste sería considerar dos modelos separados: uno para incendios de menor escala y otro para incendios de mayor escala. Esto permitiría una adaptación más precisa a las características específicas de cada categoría de incendios y, en última instancia, mejorar la precisión de las predicciones.

7.6.3 Áreas críticas

De acuerdo a los mapas de densidad de área quemada derivados del modelo, las zonas con mayor cantidad de hectáreas incendiadas fueron: la porción noroeste de la Sierra Madre Occidental, el sur y sureste de la Sierra Madre del Sur y el límite del Eje Neovolcánico con la Sierra Madre Occidental, a los alrededores de Tequila, Guadalajara y Zapopan, los mayores centros poblacionales del estado de Jalisco. La alta concentración de superficie incendiada en estas zonas sugiere que los incendios estuvieron asociados a actividades antrópicas: las igniciones causadas por humanos se encuentran significativamente más agrupadas que aquellas ocasionadas por rayos u otras causas naturales (Krawchuk *et al.* 2006; Syphard *et al.* 2009). De las principales causas de incendios forestales documentadas para Jalisco, los incendios intencionales, las quemas agropecuarias de desmonte y de agostaderos cerriles, y las actividades ilícitas, son las que tienen el mayor potencial de propagarse a través de áreas extensas debido a que el fuego se deja correr deliberadamente. Conforme a registros de la SEMADET (2018), estas causas se han reportado dentro de las zonas críticas descritas por el modelo. Estas zonas también coincidieron con coberturas de vegetación que, a lo largo del presente estudio, se observó son más susceptibles a incendiarse, ya sea por causas naturales, perturbaciones o fuegos inducidos, como los bosques de encino, los bosques de pino, y las selvas subcaducifolias y caducifolias.

Debido a que encontrar las causas de los incendios forestales estuvo más allá del alcance del presente trabajo, la descripción anterior únicamente ofrece un panorama general de su posible origen. No obstante, una vez identificadas las áreas críticas, será posible llevar a cabo estudios adicionales a nivel local para determinar los factores ecológicos y sociales asociados a la incidencia de incendios forestales en cada caso. Asimismo, identificar las áreas de mayor riesgo facilita la toma de decisiones y la priorización de recursos, así como la planeación del manejo del fuego a múltiples escalas.

8. CONCLUSIONES

Disponer de métodos adecuados para entender los procesos asociados a incendios, tal como su distribución espacial y temporal, sus principales controles y su influencia sobre la vegetación, cobra cada vez más relevancia, sobre todo ante la amenaza que representa el cambio climático. Los métodos de percepción remota han resultado ser una herramienta eficiente para el estudio de la ecología del fuego, a partir de los cuales es posible la detección temprana de incendios forestales, su monitoreo a través de regiones geográficas extensas y a lo largo del tiempo, así como el análisis de las condiciones que propician su ocurrencia. Asimismo, los avances tecnológicos y el uso de algoritmos progresivamente más sofisticados facilitan el acceso a información esencial, como la superficie quemada, para la prevención, planificación e implementación de acciones de manejo del fuego.

Con base en los datos satelitales utilizados se corroboró que Jalisco es una de las entidades del país con mayor cantidad de hectáreas incendiadas por incendios forestales. Los tipos de vegetación más afectadas durante el periodo de estudio fueron los bosques de pino-encino, los cuales poseen un complejo de combustibles altamente inflamables y un régimen histórico de incendios superficiales frecuentes de baja severidad, y las selvas subcaducifolias y caducifolias, que por su cercanía a tierras de cultivo, son más susceptibles a quemas de desmonte y de agostaderos cerriles; las quemas agropecuarias originadas en terrenos agrícolas fueron frecuentes; sin embargo, no representaron un porcentaje alto de la superficie incendiada total registrada en el estado de Jalisco.

Tanto los bosques de pino-encino como las selvas subcaducifolias y caducifolias se quemaron de manera diferenciada a través del sitio de estudio, consecuencia de la variación espacio-temporal del combustible en el paisaje, que a nivel local depende de la configuración espacio-temporal de los controles *Bottom-Up*. Al comparar la influencia de estos controles en los bosques y selvas de las distintas provincias fisiográficas del estado, se encontró que los factores que más explicaron la variabilidad en el comportamiento de los incendios coincidieron dentro de cada región, independientemente de la cobertura forestal de origen, sugiriendo que el efecto de la regulación *Bottom-Up* varió más en función de la provincia fisiográfica que por el tipo de vegetación. Por otro lado, la diversidad de condiciones

estructurales del paisaje ocasionó que la correlación entre los distintos controles fuera mucho más variable que su contribución, tanto por unidad fisiográfica como por tipo de ecosistema.

La heterogeneidad ocasionada por el fuego promueve a su vez que el comportamiento de los incendios sea más variable a través del paisaje, lo que explica la mayor variabilidad espacial observada en la incidencia de incendios del bosque de pino-encino, donde el fuego es un disturbio recurrente. En contraste, las quemas agropecuarias incendiaron un porcentaje similar de terrenos de cultivo a lo largo del estado de Jalisco, indicando mayor homogeneidad espacial; su comportamiento más uniforme se debe al control que ejerce el humano sobre su ignición.

A partir de los resultados del análisis de componentes principales y del modelo probabilístico, se encontró que los controles *Bottom-Up* con mayor influencia sobre los incendios forestales fueron la temperatura y el NDVI; ambas directamente proporcionales al tamaño de los incendios. Las distancias antrópicas también fueron relevantes a lo largo de todo el sitio de estudio; en general, el tamaño de los incendios incrementó conforme éstos se alejaron de tierras de cultivo, carreteras y caminos urbanos. Lo anterior implica que los incendios más extensos del periodo de estudio se originaron en zonas remotas, probablemente asociados a cultivos ilegales, quemas de desmonte y quemas intencionales. Estas áreas alejadas suelen ser de difícil acceso, lo que complica significativamente los esfuerzos de combate, permitiendo que el fuego se propague y se prolongue en el tiempo. La compleja interacción de la topografía con otros elementos del paisaje ocasionó que su efecto fuera más variable y difícil de cuantificar. No obstante, en regiones con relieve accidentado y montañoso, tal como la Sierra Madre Occidental, la influencia de la topografía fue más evidente, por ejemplo, al actuar como barrera contra la propagación del fuego y reducir el tamaño de los incendios.

Durante años con sequía extrema, los controles *Top-Down* crearon condiciones meteorológicas y del combustible que suprimieron o intensificaron el efecto de los controles *Bottom-Up*. Por ejemplo, el mosaico complejo de vegetación y las barreras topográficas no impidieron la propagación de incendios de grandes magnitudes en la Sierra Madre Occidental. En contraste, durante años secos, las condiciones de precipitación y temperatura en la Sierra Madre del Sur contribuyeron a potenciar la acumulación de combustible disponible. Esta acumulación se vio impulsada por la mayor densidad de vegetación presente

en la provincia, la cual se reflejó en los altos valores de NDVI detectados en la región. Como resultado, la Sierra Madre del Sur se convirtió en la provincia con la mayor superficie incendiada por incendios forestales y la mayor ocurrencia de *mega incendios* durante el periodo de estudio. Cabe destacar que la propagación de *mega incendios* también está asociada a la acumulación de combustible disponible por la ausencia de incendios recurrentes en la zona.

La respuesta de la vegetación a los patrones de precipitación y temperatura en años con alta y baja incidencia de incendios se vio bien reflejada en la variación interanual y mensual del NDVI. Esto sugiere que el NDVI puede ser utilizado como un indicador valioso en el estudio y la predicción de incendios forestales. Adicionalmente, la influencia local del NDVI se hizo especialmente evidente durante los últimos meses de la temporada alta de incendios; la fuerte correlación observada entre los valores bajos de NDVI y los incendios ocurridos en junio se explica por el hecho de que al finalizar de la temporada de sequía es cuando el combustible se encuentra en su condición más seca.

La regulación *Top-Down* generó patrones sincrónicos de incidencia de incendios a lo largo del estado de Jalisco. Años con sequía intensa concentraron la mayor ocurrencia de incendios forestales de más de 2,000 hectáreas, sugiriendo que los eventos extremos del clima modularon en gran medida la aparición de eventos de gran magnitud. Por otro lado, en años húmedos el combustible fue menos propenso a incendiarse, ocasionando una baja frecuencia de incendios. Las condiciones climáticas en mayo y junio fueron de particular relevancia para explicar las variaciones en la incidencia de incendios forestales a lo largo del periodo de estudio, incluso entre años clasificados como de alta ocurrencia. Estos meses desempeñaron un papel crítico en el comportamiento anual de los incendios, ya que a menudo están asociados con un antecedente prolongado de sequía. La falta de humedad en el complejo de combustibles se intensifica a medida que avanza la temporada de secas, lo que puede conducir a condiciones de sequía intensa en los últimos meses de la temporada alta de incendios.

La variabilidad climática interanual también influyó en la incidencia de quemas agropecuarias, mostrando un aumento en su frecuencia en años con poca precipitación y altas temperaturas máximas, y una disminución en años húmedos. Dado que el estado del tiempo

atmosférico se encuentra intrínsecamente ligado a los patrones de regulación *Top-Down*, lo anterior coincide con que los controles *Bottom-Up* más importantes para explicar la variabilidad en la ocurrencia de las quemaduras fueran la temperatura y la precipitación. Estos hallazgos sugieren que deben existir un mínimo de condiciones meteorológicas para que otros factores, como la topografía y las fuentes de ignición, puedan ejercer una influencia sobre el comportamiento de las quemaduras agropecuarias.

La temperatura resultó ser una variable clave en la incidencia del fuego, tanto a nivel local como regional. En años con alta incidencia de incendios, las temperaturas máximas superaron consistentemente las normales climatológicas, mientras que en años catalogados con baja incidencia, estas temperaturas se mantuvieron por debajo de las normales históricas. Asimismo, el efecto local de la temperatura diaria desempeñó un papel importante en el comportamiento de eventos individuales. Este énfasis en la temperatura como uno de los principales impulsores del fuego apunta hacia una creciente amenaza por el cambio climático, que presumiblemente aumentará el número y tamaño de los incendios forestales. Si bien anteriormente se ha subrayado el papel de los cambios estacionales en la temperatura, es necesario indagar en el efecto de su variación diaria, ya que potencialmente los días se volverán cada vez más calurosos.

La variación en la incidencia de incendios a gran escala también estuvo relacionada con los ciclos del fenómeno climático El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). A pesar de la compleja interacción entre ENOS y la ocurrencia del fuego, los resultados obtenidos en el presente trabajo sugieren que la fase negativa de ENOS (La Niña) estuvo asociada a una mayor incidencia de incendios en el estado de Jalisco, mientras que años con fase positiva (El Niño) presentaron una baja frecuencia de incendios, comportamiento similar a lo reportado para el norte y noroeste de México. Adicionalmente, los ciclos de ENOS influyen en los patrones de incidencia de incendios al afectar la dinámica del combustible a largo plazo. En México, muchos de los trabajos están enfocados en analizar el efecto de ENOS sobre los patrones de precipitación, no obstante, estudiar su correlación con la temperatura cobra cada vez más relevancia, sobre todo al considerar la importancia de esta variable en la ocurrencia del fuego.

La metodología INLA-SPDE resultó ser una herramienta estadística poderosa, ya que además de ser computacionalmente eficiente, posibilita el ajuste de modelos complejos de forma

rápida y accesible. Dado que INLA es una aproximación relativamente reciente, su implementación en estudios enfocados a incendios forestales en México es poco común; por lo tanto, este análisis representa una contribución importante para el modelado de incendios forestales en el país, y un punto de partida para la implementación de metodologías novedosas que faciliten la comprensión de la distribución espacio-temporal de los incendios.

Las áreas críticas en el sitio de estudio identificadas a partir del modelo predictivo coincidieron con zonas cubiertas por bosques de pino, bosques de encino, selvas medianas subcaducifolias y selvas bajas caducifolias; asimismo, la mayor proporción de estas áreas se ubicó en la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre Occidental. La alta concentración de superficie incendiada en estas zonas sugiere que un gran porcentaje de las igniciones fueron ocasionadas por actividades antropogénicas; los incendios originados por rayos u otras causas naturales tienden a dispersarse de manera más aleatoria. Las quemas asociadas a cultivos ilegales y para provocar cambios de uso del suelo estuvieron entre las principales posibles causas de eventos de grandes extensiones en estas áreas.

Aunque se encontró que las condiciones del estado del tiempo y la variación interanual del clima son factores clave en la incidencia del fuego, su sinergia con diversas actividades antropogénicas, las principales fuentes de ignición, es lo que en última instancia conduce a una mayor frecuencia y severidad de los incendios. En México, atender las causas de los incendios antrópicos, así como entender el contexto social en el cual se desarrollan, es esencial para la planificación y ejecución de estrategias de manejo del fuego, que a nivel local también deben considerar el efecto variable de la vegetación, el relieve y el tiempo atmosférico bajo distintos escenarios de cambio climático.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi, H., & Williams L.J. (2010). Principal Component Analysis. John Wiley and Sons, Inc. WIREs Comp Stat 2: 433–59
- Agee, J.K. (1993). Fire ecology of Pacific Northwest Forest. Island Press, Washington, D.C.
- Alonso-Canas, I., & Chuvieco, E. (2015). Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data. Remote Sensing of Environment. 163.10
- Alva A., G.I. (2016). Interacciones fuego-paisaje en el noroeste de la Sierra Madre Occidental de Chihuahua. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
- Alvarado, E.C. (1992). Large Forest Fires: An Analysis Using Extreme Value Theory and Robust Statistics Approaches (Ph.D. Diss). University of Washington, Seattle, WA.
- Alvarado, E.C., Morfín R, J.E., Jardel P., E.J., Vihnanek, R.E., Wright, D.K., Sandberg, D.V., Michel F., J.M., Wright, C.S., Ottmar, R.D., Sandberg, D.V., & Nájera D., A. (2008). Foto series para la cuantificación de combustibles forestales de México: bosques montanos subtropicales de la Sierra Madre del Sur y bosques templados y matorral submontano del norte de la Sierra Madre Oriental. Fire Sciences Laboratory USDA Forest Service. Special Publication No. 1. Seattle, Washington. 98 pp.
- Arias C., Carmen T., Vargas O., Rodríguez A. (2008). Solanaceae Diversity in the State of Jalisco, Mexico. Revista Mexicana de Biodiversidad. Ciudad de México: UNAM. 79 (1): 67–79.
- Azpra, R. E., Carrasco A. G., Delgado O. y Villicaña F. J. (2001). Los ciclones tropicales de México. México: (M. E. Hernández-Cerda Coord). México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Balcázar M., O.E. (2011). Patrones Geoecológicos de Incendios Forestales en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán. Tesis de Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Jalisco, México
- Barrera R., Rosier O. (2002). Consideraciones geomorfologías sobre la Sierra Madre Occidental en el norte de Jalisco, México. Investigaciones geográficas, (48), 44-75.

- Bizama G., Torrejón F., Aguayo M., Muñoz M., Echeverría C., Urrutia R. (2011). Pérdida y fragmentación del bosque nativo en la cuenca del río Aysén (Patagonia-Chile) durante el siglo XX. *Revista de Geografía Norte Grande*. 49:125-138
- Bond, W. J., & Midgley, J. J. (1995). Kill Thy Neighbour: An Individualistic Argument for the Evolution of Flammability. *Oikos*, 73(1), 79–85.
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., ... & Swetnam, T. W. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926), 481-484.
- Bravo, J., Azpra, E., Zarraluqui, V., Gay, C. and Estrada, F. (2010). Significance test for the relationship between El Niño phenomenon and precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 49, 245-261.
- Bravo, J.L., Azpra E., Zarraluqui V. & Gay C. (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons, an extended treatment. *Atmósfera*, 30(3), 221-232.
- Brooks M.L. (2004). Effects of Invasive Alien Plants on Fire Regimes, *BioScience*, 54(7), 677–688
- Cameletti, M., Lindgren, F., Simpson, D., & Rue, H. (2013). Spatio-temporal modeling of particulate matter concentration through the SPDE approach. *AStA Advances in Statistical Analysis*, 97(2), 109–131.
- Cameletti, M., & Blangiardo, M. (2015). Spatial and Spatio-temporal Bayesian Models with R - INLA. 10.1002/9781118950203.
- Carvalho, N., Anderson, L., Nunes, C., Moreira-Pessôa, A.C., Silva-Junior, C., Reis, J., Shimabukuro, Y., Berenguer, E., Barlow, J., Aragão, L. (2021). Spatio-temporal variation in dry season determines the Amazonian fire calendar. *Environmental Research Letters*. 16. 1-11.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Fulé, P., Yocom, L., Esquivel-Arriaga, G., & Jardel-Peláez, E. (2017). Historia de incendios en un bosque de pino de la sierra de Manantlán, Jalisco, México. *BOSQUE*, 36(1), 41–52.
- Challenger, A., & J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres, en *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la Biodiversidad. CONABIO, México, pp. 87-108
- Chapa B., Sosa R., Alva A. (2008). Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques*. 14(1): 37-51

- Chuvieco, E., Lizundia-Loiola, J., Pettinari, M. L., Ramo, R., Padilla, M., Tansey, K., Mouillot, F., Laurent, P., Storm, T., Heil, A., and Plummer, S. (2018). Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2015–2031.
- Comisión Estatal del Agua (CEA) (2020). Síntesis hidrológica, fisiográfica, climatológica y demográfica de las regiones de estado de Jalisco. En <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/municipios/regiones>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2022). Programa Nacional de Prevención Contra Incendios Forestales. Resultados 2021. En https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/604834/Cierre_de_la_Temporada_2020.PDF
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021). Ecosistemas de México. En <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex>
- CONAFOR & SEMADET. (2020). Mapa de Cobertura del Suelo del Estado de Jalisco al año base 2016 [Vector]. Escala 1:75,000. Versión 1.3. México: Comisión Nacional Forestal y Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco.
- Díaz-Avalos C., Juan P., Serra-Saurina L. (2016). Modeling fire size of wildfires in Castellon (Spain), using spatiotemporal marked point processes. *Forest Ecology and Management* 381:360-369
- Diggle, P.J. (2013). *Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns* (3rd ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Falk, D.A., C. Miller, D. McKenzie, & A.E. Black. (2007). Cross-scale analysis of fire regimes. *Ecosystems* 10 (5): 809-823
- Falk, D.A., Heyerdahl, E.K., Brown, P.M., Farris, C., Fulé, P.Z., McKenzie, D., Swetnam, T.W., Taylor, A.H. and Van Horne, M.L. (2011). Multi-scale controls of historical forest-fire regimes: new insights from fire-scar networks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9: 446-454.
- Fensholt, R., Sandholt, I., & Rasmussen, M. S. (2004). Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91(3–4), 490–507.

- Flatley, W.T., Lafon, C.W., Grissino-Mayer, H.D. (2010). Climatic and topographic controls on patterns of fire in the southern and central Appalachian Mountains, USA. *Landscape Ecology* 26(2):195-209.
- Fulé, P. Z. y W. W. Covington. (1996). Changing fire regimes in Mexican Pine Forests. *Journal of Forestry* 94 (10): 33Z38.
- Fulé, P.Z. y Covington, W.W. (1997). Fire regimes and forest structure in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *Acta Botánica Mexicana*, 41: 43Z79.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. (2005) The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066
- Galicia, L., Cuevas, M. L., González, L. M. y Couturier, S. (2014). Detección del cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*, 39(6), 368-374.
- Gedalof, Z. (2011). Climate and spatial patterns of wildfire in North America. En: McKenzie, D., C. Miller y D.A. Falk (Eds.) *The landscape ecology of fire*. Springer, Nueva York. Pp. 89-115
- Gholamy, A., Kreinovich, V., & Kosheleva, O. (2018). Why 70/30 or 80/20 Relation Between Training and Testing Sets: A Pedagogical Explanation. *Departmental Technical Reports (CS)*. 1209.
- Giannini Kurina, F. (2021). Modelos bayesianos para datos geoestadísticos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba
- Giddings, L., Soto, M., Rutherford, B., Maarouf A. (2005). Standardized Precipitation Index Zones for México. *Atmósfera*. 18.
- Gill, L., & Taylor, A. (2009). Top-Down and Bottom-Up Controls on Fire Regimes Along an Elevational Gradient on the East Slope of the Sierra Nevada, California, USA. *Fire Ecology*. 5. 57-75.
- Gobierno del Estado de Jalisco (1996). *Enciclopedia de los Municipios de México*. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Guadalajara, Jalisco

- González-Hidalgo, J.C., Sanchez-Montahud, J.R., & Bellot, J. (1996). Efectos de la vegetación y orientación de ladera en perfiles de humedad en el suelo de un ambiente semiárido del interior de España. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 22-23: 81-96.
- González-Jacobo, E. (2009). Uso y manejo del fuego en las quemas agrícolas y sus efectos en el suelo en el Ejido Ayotitlán, Mpio. de Cuautitlán, Jalisco. Examen Global Teórico Práctico. Ingeniería en Recursos Naturales y Agropecuarios. Universidad de Guadalajara-CUCSUR. Autlán, Jal
- Gutierrez, A. A., Hantson, S., Langenbrunner, B., Chen, B., Jin, Y., Goulden, M. L., & Randerson, J. T. (2021). Wildfire response to changing daily temperature extremes in California's Sierra Nevada. *Science Advances*, 7(47).
- Hao, F., Zhang, X., Ouyang, W. et al. (2012). Vegetation NDVI Linked to Temperature and Precipitation in the Upper Catchments of Yellow River. *Environ Model Assess* 17, 389–398.
- Heinselman, M.L. (1981). Fire intensity and frequency as factors in the distribution and structure of northern ecosystems. En: pp. 7-57. Fire regimes and ecosystem properties. Proceedings of the conference held in Honolulu, HL December .11-15,1978
- Heyerdahl, E.K., L.B. Brubaker & J.K. Agee. (2001). Spatial controls of historical fire regimes: a multiscale example from the interior West, USA. *Ecology* 82(3): 660-678.
- Heyerdahl, E.K. & Alvarado, E. 2003. Influence of Climate and Land Use on Historical Surface Fires in Pine-Oak Forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. En: Veblen et al. (Eds.). *Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas*. Springer. Verlag, Nueva York. pp. 196-217.
- Holland, P. G., & D. G. Steyn. (1975). Vegetational responses to latitudinal variation in slope angle and aspect. *Journal of Biogeography* 2:179–183.
- Huang, J., Malone, B. P., Minasny, B., McBratney, A. B., & Triantafilis, J. (2017). Evaluating a Bayesian modelling approach (INLA-SPDE) for environmental mapping. *Science of the Total Environment*, 609, 621–632.

- Hurteau D., Westerling L., Wiedinmyer C., & Bryant P. (2014). Projected Effects of Climate and Development on California Wildfire Emissions through 2100. *Environmental Science & Technology*. 48 (4), 2298-2304
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG). (2021). Ficha Informativa Producto Interno Bruto de Jalisco. Gobierno del Estado de Jalisco.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1988). Jalisco en síntesis. Aguascalientes, México. ISBN 968-892-086-X
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1990). Jalisco cuaderno de Información para la planeación. Geografía Económica. Pp. 110- 143.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Censo Población y Vivienda. MEX-INEGI.ESD2.01-CPV-2020
- Ireland, K.; Stan, A. Fulé, P. (2012). Bottom-up control of a northern Arizona ponderosa pine forest fire regime in a fragmented landscape. *Landscape Ecology*. 27. 983-997
- Jardel P., E.J.; Santiago P., A.L.; Cortéz M., C.; Castillo N., F. (2003). Sucesión y dinámica de rodales. En: Cuevas G., R. y Jardel P., E.J. (Edit.). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, pp. 177.
- Jardel P., E.J., E. Ezcurra, R. Cuevas G., A.L. Santiago P., y P. Cruz C. (2004). Vegetación y patrones del paisaje. En: Cuevas y Jardel (Eds). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. DERN-CUCSUR, Universidad de Guadalajara.
- Jardel P., E.J., R. Ramírez V., F. Castillo N., S. García R., O.E. Balcázar M., J.C. Chacón M., y J.E. Morfín R. (2006). Manejo del fuego y restauración de bosques en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. En: J.G. Flores G., D.A. Rodríguez T.O. Estrada M. y F. Sánchez Z. (Coord.). *Incendios Forestales*, Mundi Prensa y CONAFOR. México D.F. Pp. 214-242.
- Jardel P., E.J., E. Alvarado C., J.E. Morfín R., F. Castillo N. & J.G. Flores G. (2009). Regímenes de fuego en ecosistemas forestales de México. Pp. 73-100. En: J. G. Flores G. (Coord.). *Impacto ambiental de incendios forestales*. Grupo Mundi Prensa México, S. A. de C.V.

- Jardel P., E.J., J.E. Morfín R., Alvarado E.C., y Pérez-Salicrup, D. (2011). Caracterización de los regímenes de incendios en ecosistemas forestales del Occidente de México. Universidad de Guadalajara-Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco. Reporte técnico. 42 P
- Jardel P., E.J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado E.C., & Morfín-Ríos, J.E. (2014). Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales. CONAFOR.
- Johnson, E. (1992). Forest fire behavior. In *Fire and Vegetation Dynamics: Studies from the North American Boreal Forest*. Cambridge Studies in Ecology, pp. 22-38. Cambridge University Press.
- Le Page, Y., Morton, D., Hartin, C., Bond-Lamberty, B., Pereira, J. M. C., Hurtt, G., & Asrar, G. (2017). Synergy between land use and climate change increases future fire risk in Amazon forests, *Earth Syst. Dynam.*, 8, 1237–1246.
- Keeley, E.J. y Zedler, H. P. (1998). Evolution of life histories in Pines. En: Richardson M.D.(Ed) *Ecology and biogeography of Pinus*. Cambridge University Press. pp. 218-249.
- Kiladis, G.N., and Diaz, H.F. (1989). Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Clim.* 2:1069–1090.
- Kitzberger T., Brown P.M., Heyerdahl E.K., et al. (2007). Contingent Pacific–Atlantic Ocean influence on multi-century wildfire synchrony over western North America. *P Natl Acad Sci USA* 104: 543–48.
- Krawchuk, M. A., M. A. Moritz, M.-A. Parisien, J. Van Dorn, and K. Hayhoe. (2009). Global Pyrogeography: The Current and Future Distribution of Wildfire. *PLoS ONE* 4:e5102.
- Lertzman, K.P., and J. Fall. (1998). From forest stands to landscapes: spatial scales and the roles of disturbances. Pages 21-38. En: D. Peterson and V.T. Parker, editors. *Ecological scale: theory and applications*. Columbia University Press, New York, New York, USA.
- Lindgren, F, Rue, H., & Lindström, J. (2011b). An explicit link between Gaussian fields 670 and Gaussian Markov random fields: the SPDE approach (with discussion). *JR 671 Stat Soc, Series B*, 73, 423–498.
- Lindgren, F., & Rue, H. (2015). Bayesian spatial modeling with R-INLA. *Journal of Statistical Software*, 63(19), 1–25

- Lino S., J.J. (2022). Tendencias climáticas de los indicadores de temperatura y precipitación en Jalisco, México. Tesis de Maestría en Ciencias en Hidrometeorología. Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Jalisco, México
- Lizundia-Loiola, J., Otón, G., Ramo, R., & Chuvieco, E. (2020). A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 236. 111-493
- Lloret F., Calvo E., Pons X., Díaz-Delgado R. (2002). Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula. *Landscape Ecology*. 17:745-759
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. and Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42 (3): 313-330.
- Manzo-Delgado, L., Aguirre, R., & Álvarez, R. (2004). Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA-AVHRR: Preliminary relationships between climatic anomalies and forest fires. *International Journal of Remote Sensing* 25: 17-44.
- McKenzie, D., A. E. Hessler, & L. K. B. Kellogg. (2006). Using neutral models to identify constraints on low-severity fire regimes. *Landscape Ecology* 21:139–152
- McKenzie, D., Miller, C., Falk, D.A. (2011). *The Landscape Ecology of Fire*. Ecological Studies Series, vol. 213. Springer.
- Michel F., J.M. (2010). Caracterización y clasificación de combustibles forestales para el manejo del fuego en áreas protegidas de México. Tesis de Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.
- Miller, Carol & Ager, Alan. (2013). A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. *International Journal of Wildland Fire*. 22. 1. 10.107
- Neger, C., León-Cruz, J.F., Galicia-Sarmiento, L., & Manzo-Delgado, L. (2022). Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los mega incendios forestales en México. *Madera y bosques*, 28(2).
- Nigam S., M. Barlow, & E.H. Berbery. (1999). Analysis links Pacific decadal variability to drought and streamflow in the United States. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union* 80: 621-625.

- Organización Meteorológica Mundial. (2012): Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2014). El Niño Oscilación del Sur. EUA. ISBN 978-92-63-31145-0
- Ottmar, R.D., D.V. Sandberg, C.L. Riccardi, S.J. Prichard. (2007). An overview of the Fuel Characteristic Classification System- Quantifying, classifying, and creating fuel beds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*. 37(12): 2383-2393
- Parisien M-A, Parks SA, Miller C, Krawchuk MA, Heathcott M, Moritz MA (2011) Contributions of ignitions, fuels, and weather to the burn probability of a boreal landscape. *Ecosystems* 14:1141–1155
- Parks SA, Parisien MA, Miller C. 2012. Spatial bottom-up controls on fire likelihood vary across western North America. *Ecosphere* 3: art12
- Peterson, G.D. (2002). Contagious disturbance, ecological memory, and the emergence of landscape patterns. *Ecosystems* 5: 329–338.
- Pettinari M.L., Chuvieco E., Lizundia-Loiola J., Otón G. (2021) ESA CCI ECV Fire Disturbance: D1.2 Algorithm Development Plan, version 2.1.
- Perilla, G., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas*, (101).
- Pimont, F., Fargeon, H., Opitz, T., Ruffault, J., Barbero, R., Martin-Stpaul, N., Rigolot, E.; Rivière, M., Dupuy, J.L. (2020). Prediction of regional wildfire activity with a probabilistic Bayesian framework.
- Preisler, H. K., and A. L. Westerling. (2007). Statistical Model for Forecasting Monthly Large Wildfire Events in Western United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46:1020–1030.
- Pyne, S. J., Andrews P.L. & R.D. Laven. (1996). Introduction to wildland fire. John Wiley. Nueva York, E.U.A. 769 p
- Pyne, S.J. (1996). Word fire. The culture of the fire on Earth. University of Washington Press. Seattle, E.U.A. 384 p

- R Core Team. (2021). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RStudio Team (2021). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA
- Riccardi, C.L., R.D. Ottmar, D.V. Sandberg, A.G. Andreu, E. Elman, K. Kopper, & J. Long. (2007). The Fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forest Research*. 37(12): 2394-2412.
- Riley, Karin L. & Loehman, Rachel A. (2016). Mid-21st-century climate changes increase predicted fire occurrence and fire season length, Northern Rocky Mountains, United States. *Ecosphere*. 7(11): Article e01543.
- Rocca, M.E., Miniati, C.F.; Mitchell, R.J. (2014). Editorial. Introduction to the regional assessments: Climate change, wildfire, and forest ecosystem services in the USA. *Forest Ecology and Management*. 327: 265-268
- 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.
- Rodríguez-Trejo., D.A. (2009). Fire Regimes, Fire Ecology, and Fire Management in Mexico. *Ambio*. 37: 548-56.
- Romme W.H., Everham E.E., Frelich L.E., Moritz M.A., Sparks R.E. (1998) Are large, infrequent disturbances qualitatively different from small, frequent disturbances? *Ecosystems* 1:524–534
- Rothermel, R.C. (1983). How to predict the spread and intensity of wildfires. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-143
- Rue, Håvard, & Tjelmeland, H. (2002). Fitting Gaussian Markov random fields to Gaussian fields. *Scandinavian Journal of Statistics*, 29(1), 31–49.
- Rue, Håvard, Martino, S., & Chopin, N. (2009). Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series b (Statistical Methodology)*, 71(2), 319–392.
- Sandberg, D.V., R.D. Ottmar & G.H. Cushon. (2001). Characterizing fuels in the 21st century. *International Journal of Wildland Fire* 10: 381-87.

- Scholl, A.E., & A.H. Taylor. (2010). Fire regimes, forest change, and self-organization in an old-growth mixed conifer forest, Yosemite National Park, USA. *Ecological Applications* 20(2): 362-380.
- Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J., Pyne S. J., & M.E. Alexander. (2014). Fire on Earth: An Introduction. *Fire Ecology* 10, 88–91
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET). (2018). Plan Estatal del Manejo del Fuego en el Estado de Jalisco. Primera Etapa. Gobierno del Estado de Jalisco. 200 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET). (2021). Programa Para Manejo del fuego en el Estado de Jalisco. Gobierno del Estado de Jalisco. 53 p.
- Serra, L., M. Saez, P. Juan, D. Varga, and J. Mateu. (2014a). A spatio-temporal Poisson hurdle point process to model wildfires. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 28:1671–1684.
- Serra, L., M. Saez, J. Mateu, D. Varga, P. Juan, C. Díaz-Ávalos, and H. Rue. (2014b). Spatio-temporal log-Gaussian Cox processes for modeling wildfire occurrence: the case of Catalonia, 1994–2008. *Environmental and Ecological Statistics* 21:531–563.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Expectativas Agroalimentarias 2022. Ciudad de México, México.
- Simmons, C. S., Walker, R. T., Wood, C. H., Arima, E., & Cochrane, M. (2004). Wildfires in Amazonia: A pilot study examining the role of farming systems, social capital, and fire contagion. *Journal of Latin American Geography*, 3(1), 81–95.
- Stoyan D. & Penttinen A. (2000). Recent Applications of Point Process Methods in Forest Statistics. *Statistical Science*. 15(1). Pp. 61-78
- Syphard, A. D., V. C. Radeloff, J. E. Keeley, T. J. Hawbaker, M. K. Clayton, S. I. Stewart, and R. B. Hammer. 2007. Human Influence on California Fire Regimes. *Ecological Applications* 17:1388–1402.
- Swetnam, T. W., and J. L. Betancourt. (1998). Mesoscale disturbance and ecological response to decadal climatic variability in the American Southwest. *Journal of Climate* 11:3128–3147.
- Swetnam, T.W., and C.H. Baisan. (2003). Tree ring reconstruction of fire and climate history in the Sierra Nevada and southwestern United States. En: T.T. Veblen, W.L. Baker, G. Montenegro,

- and T.W. Swetnam, editors. Fire and climatic change in temperate ecosystems of the western Americas. Springer-Verlag, New York, New York, USA. Pp 158-195
- Szpakowski D.M. & Jensen J.L.R. (2019). A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology. *Remote Sensing*. 11(22):2638.
- Taylor, A.H., & C.N. Skinner. (2003). Spatial patterns and controls on historical fire regimes and forest structure in the Klamath Mountains. *Ecological Applications* 13: 704-719.
- Turner M.G. (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20:171–197
- Turner, M.G., W.H. Romme, R.H. Gardner & W. Hargrove. (1997). Effects of fire size and pattern on early succession in Yellowstone National Parl. *Ecological Monographs* 67: 411-433
- Turner M.G. (2005). Landscape ecology: what is the state of the science? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36:319–344
- Turner R. (2009). Point patterns of forest fire locations. *Environ Ecol. Stat* 16:197–223
- Turner M.G. (2010). Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*. 91:2833–2849
- Turner, M.G., Gardner, R.H., & O'Neill, R.V. (2015), *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer.
- Vázquez de la Cueva & Rodríguez Martín J.A. (2008). Dinámica de paisajes forestales en relación a la incidencia del fuego en España peninsular: 1987-2000. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales*. 17(2):143-154
- Verdin J., Pedreros D., Eilerts G. (2003). Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), FEWS - Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica, USGS/EROS Data Center.
- Verdoy P. J. (2019). Spatio-temporal hierarchical Bayesian analysis of wildfires with Stochastic Partial Differential Equations. A case study from Valencian Community (Spain). *Journal of applied statistics*, 47(5), 927–946.
- Vilar, L., Douglas. G. Woolford, D. L. Martell, and M. P. Martín. (2010). A model for predicting human-caused wildfire occurrence in the region of Madrid, Spain. *International Journal of Wildland Fire*. 19:325.

- Villar-Hernández, Bartolo de Jesús, Pérez-Elizalde, Sergio, Rodríguez-Trejo, Dante Arturo, & Pérez-Rodríguez, Paulino. (2022). Spatio-temporal analysis of wildfires occurrence in the Mexican State of Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(74), 120-144.
- Wan, Z., Hook, S., Hulley, G. (2015). MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes.
- Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Gutzler, D. S., Coonrod, J. E. A., & Dahm, C. N. (2004). Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semiarid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 58(2), 249–272.
- Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Coonrod, J. E. A., & Dahm, C. N. (2004). Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 507–534
- Whelan, R. J., L. Rodgerson, C.R. Dickman & E. F. Sutherland. 2002. Critical life cycles of plants and animals: developing a process-based understanding of population changes in fire-prone landscapes. En: R.A. Bradstock, R.A., J.E. Williams y A. M. Gill (Eds.) *Flammable Australia: the fire regimes and biodiversity of a continent*. Cambridge University Press. Pp. 94-124
- White PS (1979) Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *Bot Rev* 45: 229–299
- White PS, Pickett STA (1985) Natural disturbance and patch dynamics: an introduction. In: Pickett STA, White PS (eds) *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic, New York, pp 3–13
- Wolter, K. and Timlin, M.S. (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop*, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Climate Survey, CIMMS and the School of Meteorology, University of Oklahoma, 52-57.
- Woolford, D. G., D. R. Bellhouse, W. J. Braun, C. B. Dean, D. L. Martell, and J. Sun. (2014). A Spatiotemporal Model for People-Caused Forest Fire Occurrence in the Romeo Malette Forest. *Journal of Environmental Statistics* 2:2-16.
- Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, J., Villanueva-Díaz, J., Falk, D. A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010). El Niño-southern oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, 91(6), 1660–1671.

Zhang, Y., & Biswas, A. (2017). The Effects of Forest Fire on Soil Organic Matter and Nutrients in Boreal Forests of North America: A Review.

ANEXO

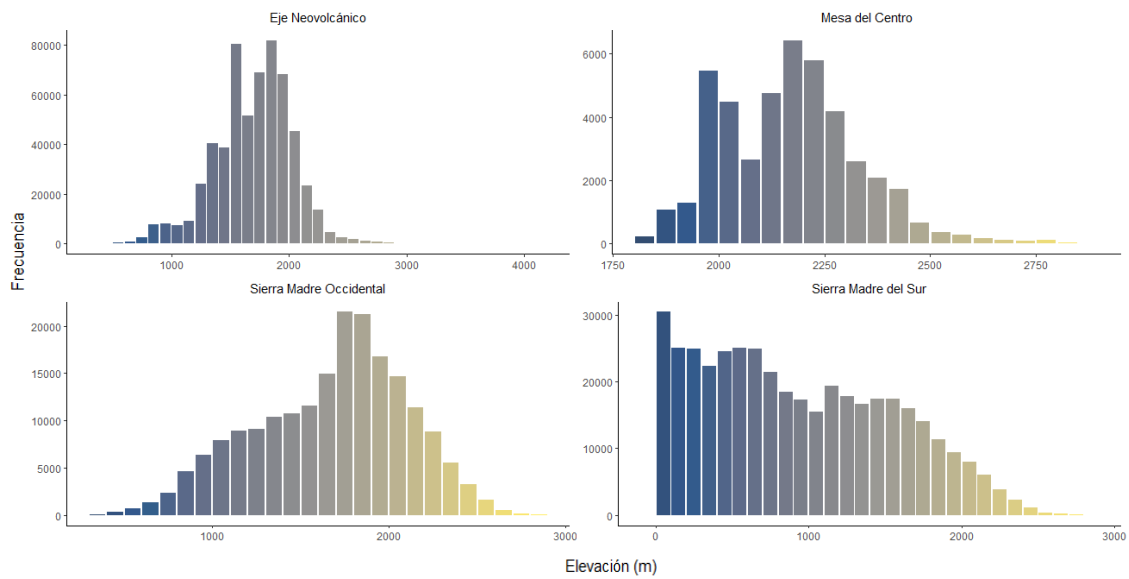


Figura 6.31. Distribución de valores del ráster de elevación (m) en las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco.

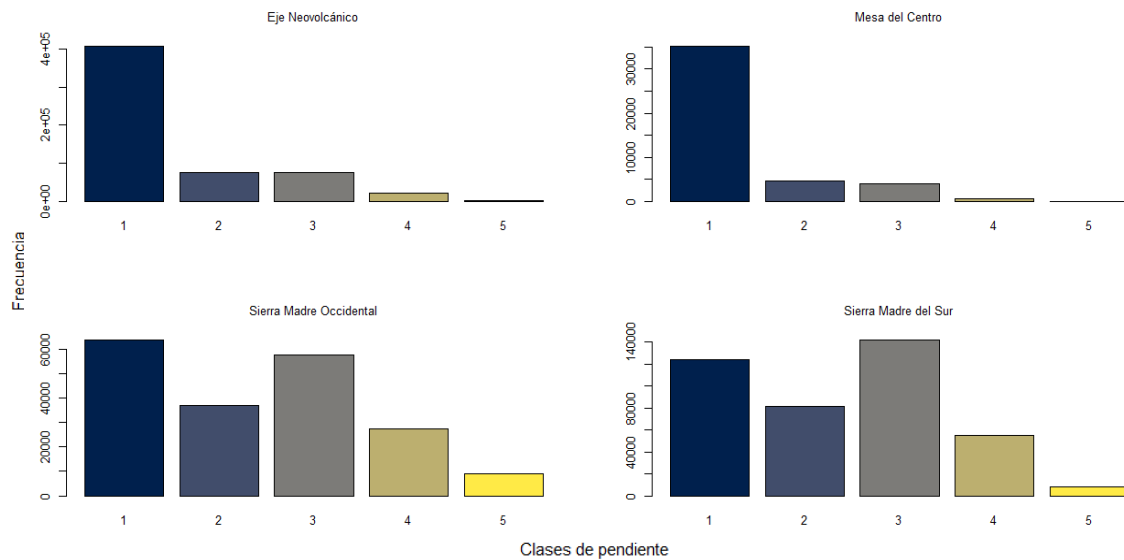


Figura 6.32. Distribución de valores del ráster de pendiente por clase y provincia fisiográfica en el estado de Jalisco. Las clases de pendiente corresponden a: 1) Ligera (menor a 10°); 2) Moderada (10° a 15°); 3) Inclinada (15°-25°); 4) Fuerte (25° a 35°); 5) Muy fuerte (mayor a 35°).

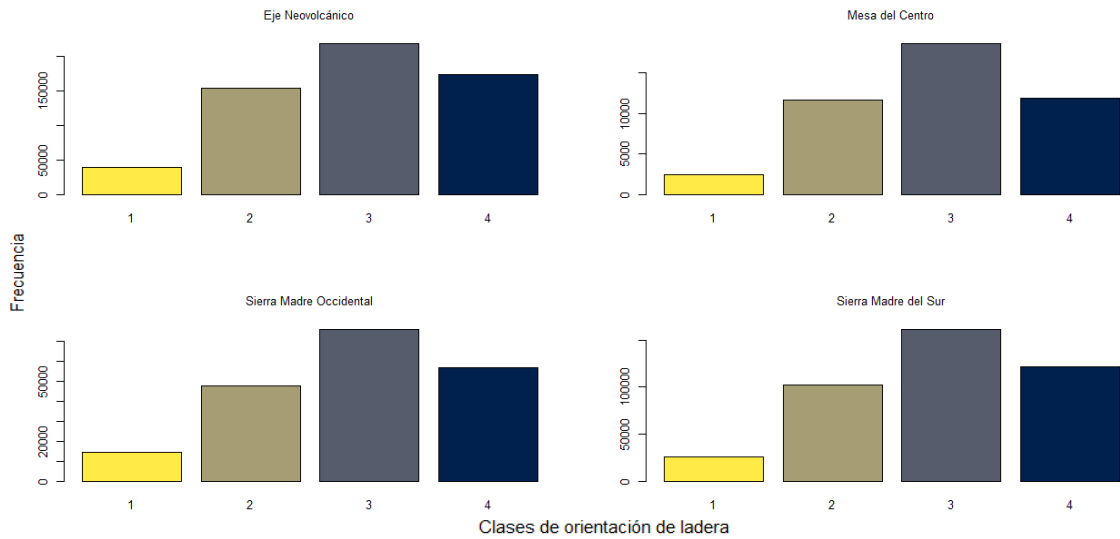


Figura 6.33. Distribución de valores del ráster de orientación de ladera por clase y provincia fisiográfica en el estado de Jalisco. Las clases corresponden a: 1) Norte; 2) Este; 3) Sur; 4) Oeste

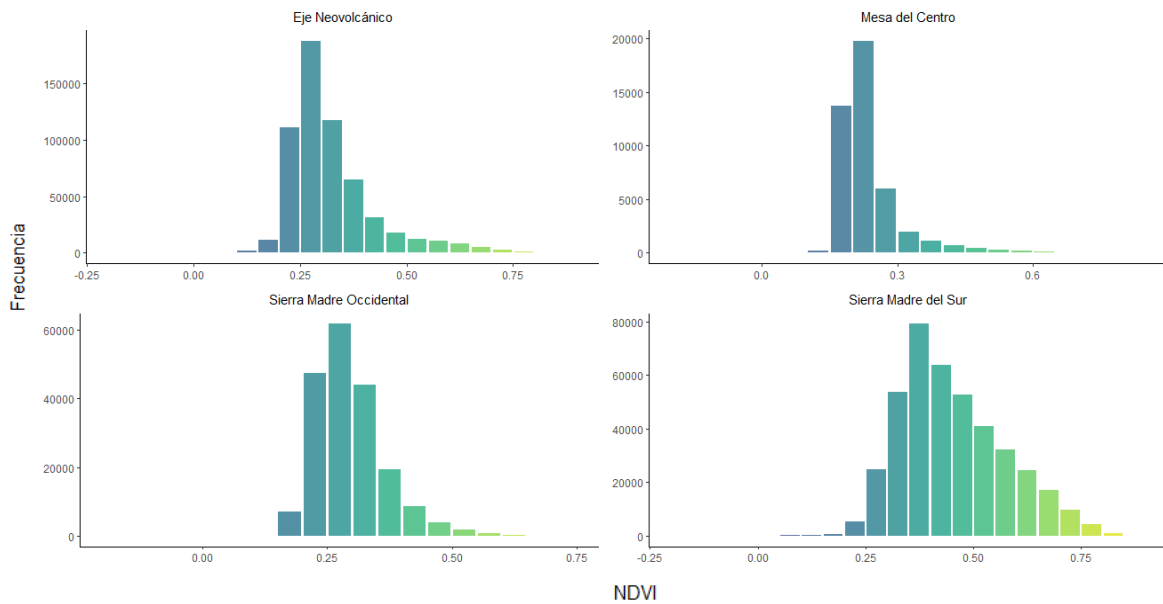


Figura 6.34. Distribución de valores promedio del ráster de NDVI en las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco durante la época seca del periodo 2001-2020

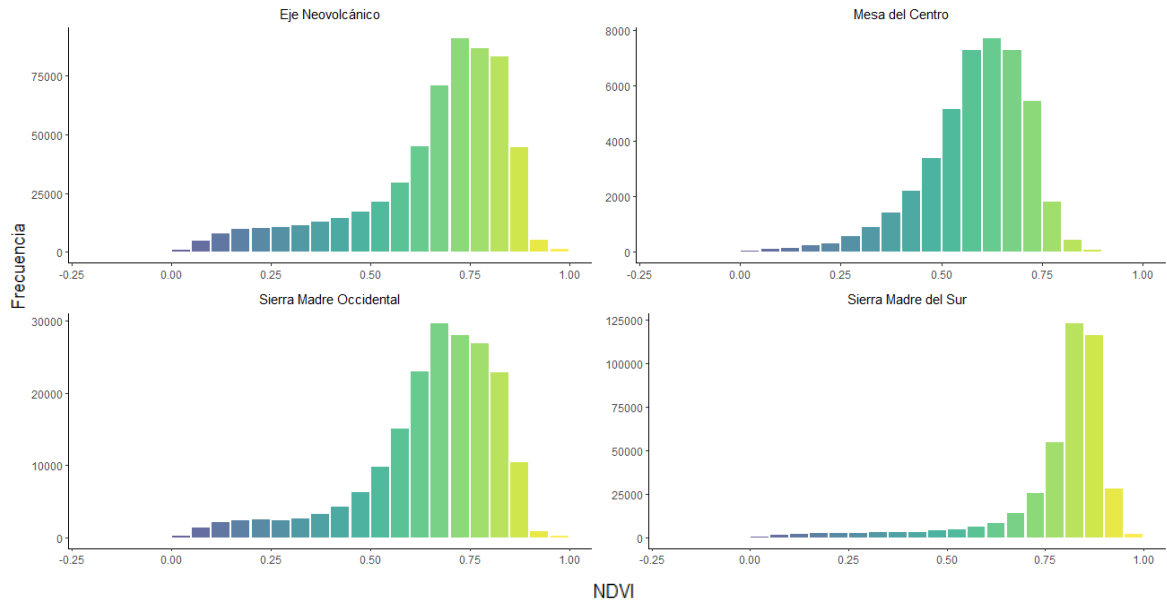


Figura 6.35. Distribución de valores promedio del ráster de NDVI en las cuatro provincias fisiográficas del estado de Jalisco durante la época de lluvias del periodo 2001-2020