

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DE INFORMACIÓN
GEOESPACIAL, A.C.**

CentroGeo

Centro Público de Investigación CONAHCYT

Modelo predictivo de incendios forestales, basado en regresión logística.
Hopelchén, Campeche de 2011 a 2020

T E S I S

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de Información Geoespacial

Presenta

Julio César García Sampayo

Director de Tesis

Dr. José Mauricio Galeana Pizaña

Ciudad de México

Julio 2023

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL, A.C.**

Centrogeo

Centro Público de Investigación CONAHCYT

**Modelo predictivo de incendios forestales, basado en regresión logística. Hopelchén,
Campeche de 2011 a 2020.**

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de Información Geoespacial

Presenta

Julio César García Sampayo

Director de Tesis

Dr. José Mauricio Galeana Pizaña

Sinodales

Dr. Jorge Paredes Tavares

Dr. Christoph Neger

Mtro. Alberto Porras Velázquez

Ciudad de México Julio de 2023

© CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga a CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.

Resumen

Campeche es uno de los cuatro estados de la república mexicana en presentar deforestación, y una de las causas de esta problemática son los incendios forestales, los cuales han presentado un incremento considerable. Dentro de este incremento se identifica el municipio de Hopelchén como el municipio con el mayor incremento de la entidad. Con el propósito de elaborar información que pueda ayudar a los gobiernos municipales y estatales a identificar los sitios con una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales así como los factores que los propician, se realizó un modelo de regresión logística que permitió generar un índice de riesgo de incendio, y el mapeo de las superficies con una mayor probabilidad de ocurrencia en un periodo de diez años. Para el modelado de riesgo de incendio, se emplearon tanto variables meteorológicas como antropogénicas, las cuales fueron procesadas en un sistema de información Geográfica. Los resultados mostraron que la cercanía a sitios de agricultura presenta una fuerte relación en la ocurrencia de incendios forestales, mientras que las variables meteorológicas presentaron una relación débil con la ocurrencia de incendios.

Reconocimientos

Una vez terminada mi tesis sentí una grandiosa satisfacción y una alegría inefable, además un enorme sentimiento de agradecimiento al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y por haber puesto en mi camino una plantilla de profesores sumamente calificados y comprometidos con la enseñanza, no me es posible mencionar a todos en este apartado, pero puedo decir que admiro a cada profesor que me dio clase en todo este tiempo que fui alumno del CentroGeo.

También deseo agradecer al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnologías, por el programa de becas, ya que este apoyo me permitió dedicar mi tiempo exclusivamente a mis estudios.

Agradezco en gran manera al Dr. José Mauricio Galeana Pizaña por haber aceptado ser mi asesor, por sus consejos y observaciones en la elaboración de mi tesis. Además de la dedicación de su tiempo y asesoramiento para plantear la estructura de este trabajo.

Al Dr. Jorge Paredes Tavares, por su ayuda en la elaboración del modelo y de sus asesorías. Así como de sus observaciones y aportes a mi trabajo.

A los miembros del sínodo: Dr. Christoph Neger y al Mtro. Alberto Porras Velázquez, por su disponibilidad para revisar mi trabajo y por el interés mostrado en sus comentarios, los cuales me ayudaron bastante.

Al Oceanólogo David Martínez, por su ayuda con el modelado, por sus consejos y por compartir su experiencia en temas ambientales. Eres un gran amigo.

A Diana Ramos por explicarme varios aspectos teóricos de la función logística.

Contenido

Introducción	1
Planteamiento del problema	1
Antecedentes	3
Justificación	4
Objetivos	5
Objetivo General	5
Objetivos particulares	5
Preguntas de investigación	5
Hipótesis.....	5
Capítulo 1. Marco teórico	6
1.1 Efectos de los incendios forestales.	6
1.2 Formas de transferencia de calor.....	7
1.3 Materiales combustibles	8
1.4 Régimen de fuego	12
1.5. Riesgo de incendio	12
1.5.1. Concepto de riesgo.....	13
Capítulo 2. Estado del arte	14
2.1 Contexto internacional.....	14
2.1.1 Investigaciones relacionadas al suelo	15
2.1.2 Investigaciones en percepción remota	15
2.1.3 Investigaciones de riesgo de incendios.....	17
2.1.4 Investigaciones de corte social y manejo del fuego.....	18
2.1.5 Investigaciones de econometría espacial.....	18
2.2 Contexto nacional	19
2.2.1 Ecología del fuego en México.....	19
2.2.2 Investigaciones relacionadas con percepción remota en México	19
2.2.3 Investigaciones en la gestión de incendios forestales	20
2.2.4 Investigaciones de riesgo de incendios y econometría espacial.....	21
Capítulo 3. Metodología.....	23

3.1 Área de estudio	23
3.2 Descripción general de la metodología y obtención de datos.....	25
3.3 Regresión Logística.....	33
3.3.1. Razón de probabilidad (<i>Odds ratio</i>)	33
3.3.2. Función logística.....	33
3.3.3. Modelo de regresión logística	33
3.3.4. Ajuste del modelo	34
3.3.5. Supuestos del modelo.....	36
3.3.6. Bondad de ajuste del modelo	36
3.3.7 Validación del modelo.....	37
3.3.7.1. Validación simple	37
3.3.7.2 Validación cruzada.	38
3.3.7.3 Curva Característica del Receptor (Curva ROC)	38
3.3.7.4 Matrices de Confusión	39
Capítulo 4. Resultados.....	40
4.1 Modelo para la temporalidad 2011-2014	40
4.1.2. Modelo con variables meteorológicas.....	40
4.1.3. Modelo sin variables meteorológicas.	42
4. 2. Modelo para la temporalidad 2015-2020	46
4.2.1. Modelos creados.....	46
4.2.2. Modelo con variables meteorológicas	47
4.2.3. Modelo sin variables meteorológicas	50
Capítulo 5. Discusión y conclusiones.....	55
5.1. Discusión	55
5.2. Conclusiones.....	58
Referencias.....	60

Modelo predictivo de incendios forestales, basado en regresión logística. Hopelchén, Campeche de 2011 a 2020.

Introducción

Planteamiento del problema

Según datos del Instituto de Recursos Mundiales WRI por sus siglas en inglés, México está entre los 17 países que más ha perdido cobertura forestal en el año 2018 (López, 2019). Esta pérdida de masa forestal es atribuida a diversos factores, tales como el cambio de uso de suelo, tala clandestina, aumento de la frontera agrícola, entre otros. Uno de los factores que también ha jugado un papel primordial en este problema han sido los incendios forestales (López, 2019). La deforestación causada por incendios forestales y otros factores ha ocasionado una serie de consecuencias en el municipio de Hopelchén, como pérdida de biodiversidad y una disminución del hábitat de distintas especies consideradas en riesgo, tales como el jaguar (*Panthera onca*). Además de estas consecuencias, se menciona que al deforestar la selva se pierde una barrera importante de protección contra tormentas y huracanes y se reduce la capacidad de filtración de agua. En años recientes (2019-2020) en el municipio de Hopelchén las zonas que fueron deforestadas se han inundado por varias semanas, dado que la deforestación ha causado una modificación en los flujos naturales del agua, lo que ha causado pérdidas económicas para distintos grupos sociales del municipio, principalmente para los que se dedican a la apicultura; debido a las inundaciones se registraron daños en varias localidades dedicadas a la producción de miel (Radwin, 2019; Canul, 2020).

Es por este motivo que este factor ha tomado tanta importancia en el desarrollo de políticas públicas que sean capaces de prevenir la alteración del régimen natural de incendios forestales y así prevenir la ocurrencia de afectaciones al ecosistema y a la salud humana (Del Ángel-Mobarak 2012). Desde una visión ecológica se sabe que la ocurrencia de los incendios forestales en los ecosistemas que presentan una serie de adaptaciones tienen ciertos beneficios para las especies que han evolucionado junto con la ocurrencia del fuego, por ejemplo, se sabe que la gran mayoría de pinos mexicanos tienen un tipo de adaptación al fuego, tal es el caso del *Pinus oocarpa Schiede*, el cual ha desarrollado una corteza lo suficientemente gruesa que le permita resistir cierto tipo de incendios (no muy severos y de baja intensidad), además de semillas que son estimuladas por el fuego (Rodríguez y Fulé, 2003; Rodríguez-Trejo et al., 2019). Pero en ecosistemas cuya vegetación no ha evolucionado paralelamente con la presencia del fuego, la situación puede verse complicada pues un incendio puede significar la alteración completa de dicho ecosistema (Rodríguez-Trejo et al., 2019). Se sabe que en México alrededor del 40% de ecosistemas son dependientes del fuego, 10% ecosistemas influenciados por el fuego y 50% de los ecosistemas mexicanos son sensibles al fuego como en el caso de selvas altas perennifolias y subperennifolias (Rodríguez-Trejo, 2008; Rodríguez-Trejo et al., 2019), tipos de vegetación que están presentes en el municipio de Hopelchén (Ellis et al., 2018).

Uno de los grandes problemas que México ha enfrentado es la pérdida de cobertura forestal, la cual ha estado muy vinculada a los incendios forestales (Gómez, 2020). Hasta hace unas décadas el fuego se ha visto como un elemento nocivo que debe ser erradicado a toda costa de los ecosistemas, estas acciones de supresión implicaban la creación de políticas públicas que evitaran que los campesinos utilizaran el fuego como herramienta en actividades productivas agrícolas, lo que se traducía en un problema para muchos de ellos, ya que de forma tradicional el fuego ha sido empleado por las comunidades agrícolas del país, este forma parte del ciclo de producción, en especial de productos como el maíz. En este sentido se sabe que para los campesinos el fuego es un elemento importante, ya que cumple distintas funciones en el ciclo de producción, tales como propiciar fertilidad a los campos en los que se quema, sirve como controlador de plagas, entre otras (Gutiérrez et al., 2017).

Sin embargo, cuando los incendios forestales se salen de control pueden traer consecuencias graves para el ecosistema. El Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura sostenible (CCMSS), manifestó que la incapacidad de las instituciones ambientales del gobierno federal y estatal han provocado que la península de Yucatán sea una de las regiones más afectadas por los incendios forestales para el año 2020; esta misma organización menciona que la mayoría de estos incendios forestales tienen su origen en actividades agroindustriales de las comunidades menonitas, las cuales llegan a quemar de 30 a 40 ha para implementar monocultivos de maíz y soya transgénica. Según información de esta organización, en abril del 2020 la comunidad de Bolonchén, del municipio de Hopolchén, Campeche, se vio afectada por un incendio de grandes dimensiones, lo que provocó una gran afectación a la selva de este lugar, lo que causa una seria preocupación a distintos productores, ya que mencionan que las prácticas de agricultura intensiva por parte de los menonitas están provocando serios problemas ambientales y que las acciones del gobierno federal y estatal distan mucho de tener efectos positivos en esta problemática (Sánchez, 2020).

Campeche se encuentra dentro de los primeros cuatro estados de la república mexicana en pérdida de cobertura forestal, y entre las causas que propician esta pérdida se pueden mencionar a los incendios forestales (López, 2019). Se menciona que en el año 2019 las alertas de incendios forestales en Campeche aumentaron con respecto al 2018 (Gómez, 2020). Dentro de este incremento estatal se identifica el municipio de Hopolchén como el municipio que más ha tenido incremento de alertas por incendios forestales. De acuerdo con diversos grupos de apicultores de la región, se ha señalado que este incremento de alertas de incendios forestales son provocados por empresas y grupos menonitas, cuyas prácticas de agricultura extensiva están enfocadas en quemar progresivamente la selva para posteriormente deforestar e implementar zonas de cultivo y zonas de producción pecuaria; esto lo respaldan mencionando que la mayoría de incendios que se han registrado ocurrieron alrededor de zonas deforestadas, en estos sitios se comienza a quemar progresivamente la selva para posteriormente ampliar la frontera agrícola y pecuaria. Uno de los ejidos en los que se ha evidenciado este problema es en el ejido Vicente Guerrero, en el cual se quema la selva y posteriormente los terrenos afectados son rentados a miembros de la comunidad menonita para la implementación de zonas de agricultura extensiva (Gómez, 2020).

Pánfilo Fernández, titular del Centro Regional de Manejo de Fuego del Sureste de la CONAFOR, menciona que el municipio de Hopelchén se ha convertido en un centro de atención prioritaria en incendios forestales, pues el incremento de los mismos ha sido alarmante (Gómez, 2020). Irma Gómez, asesora de la Alianza Maya por las Abejas Kaab Nalo'on, denuncia que durante varios años han acudido a las autoridades ambientales correspondientes y que no han recibido ninguna respuesta. Al contrario, se observa una total impunidad y los grupos menonitas siguen provocando incendios y deforestando grandes superficies de selva, por lo que considera que el monitoreo de incendios forestales es de gran importancia para recopilar evidencia que sirva para presionar a las autoridades correspondientes y frenar el incremento de incendios forestales y la deforestación de la selva (Gómez, 2020).

Actualmente México se encuentra en transición hacia un Manejo Integral del Fuego (MIF), por lo que ahora la visión acerca de este elemento en los distintos ecosistemas hace que se modifique la forma en la que las políticas públicas deban estar diseñadas. Estas deben estar encaminadas a que en las comunidades rurales se pueda emplear el fuego de forma responsable y que las actividades humanas alteren lo menos posible el régimen natural del fuego en cada tipo de ecosistema. Esto significa que debe existir una participación más activa y directa de la población local acerca de las formas en que se puede controlar este fenómeno, sin que las formas de control signifiquen un agravio o supresión de las formas tradicionales que las comunidades emplean para su subsistencia (Gutiérrez et al., 2017).

Antecedentes

Los trabajos de investigación relacionados con incendios forestales en México son bastante amplios, al ser un tema con distintas aristas ofrece un vasto campo de investigación. Entre los trabajos que pueden mencionarse están los del pionero Rodríguez Trejo (1996), el cual ha llevado a cabo un extenso trabajo de investigación relacionado con la ecología del fuego, en el cual aborda una completa investigación de los efectos que el fuego tiene en la vegetación, en la fauna, en el suelo, entre otros. Además de abordar otras temáticas relacionadas con la contaminación producida por las emisiones de gases como es el CO₂ (Rodríguez, 1996). También existen otros trabajos que abordan los efectos que los incendios forestales tienen en ecosistemas como los bosques de pino y el manejo del fuego (Rodríguez y Fulé, 2003).

En el marco de la percepción remota, otros trabajos se han concentrado en la identificación y cuantificación de las superficies que se han quemado y de los cambios que se produjeron después del incendio, a través de imágenes satelitales y el uso de índices espectrales (López-García y Manzo-Delgado, 2008; López-García y Manzo-Delgado, 2013; Molina y Manzo-Delgado, 2016;). Otras vertientes se enmarcan en el desarrollo de modelos para evaluar el riesgo de incendios (Robles y Treviño, 2005; Wong y Villers, 2007; Ruiz y Blanco, 2004) y, otros estudios se enfocan en implementar métodos de análisis espacial, en los cuales el objetivo es determinar si existe o no asociación espacial entre cada uno de los incendios y cuáles son las variables que más determinan la frecuencia de los incendios (Pérez-Verdín et al., 2013; Simental y Pompa, 2016).

En el caso de Campeche existen varias investigaciones cuyo interés ha ido desde la determinación de la inflamabilidad de los combustibles, en el cual los investigadores pudieron determinar la distinta inflamabilidad para cinco tipos de selva en la Reserva de la Biósfera de Calakmul (Neri-Pérez et al., 2009); investigaciones relacionadas con el riesgo de incendios por acumulación de materiales orgánicos a causa de huracanes (Rodríguez-Trejo et al., 2008), hasta trabajos relacionados con la gobernanza y uso del fuego para la preparación de la tierra para la siembra (Monzón, 2018). Ante tal diversidad de estudios relacionados, en la revisión de literatura no se encontró un trabajo reciente que estudie los patrones de distribución de incendios forestales en el municipio de Hopelchén, por lo que se considera que este trabajo puede ser una aportación relevante al estudio de incendios forestales en Campeche. Además, al emplear la econometría espacial para identificar las variables que propician más la ocurrencia de incendios forestales, se aporta en el entendimiento de las relaciones socioeconómicas y climáticas que dan origen a los incendios forestales. Esta metodología puede permitir conocer más a profundidad la dinámica que ocurre en el municipio y saber cuáles son estos factores que han propiciado el aumento de los registros de puntos de calor asociados a incendios forestales, lo cual es de suma importancia para poder desarrollar las estrategias necesarias que permitan a las autoridades correspondientes tomar medidas para la reducción de estos eventos y poder disminuir los efectos negativos que conllevan.

Justificación

Debido al notable incremento de puntos de calor captados por sensores como MODIS asociados a incendios forestales que se ha presentado en los últimos años en Campeche (2020-2022) y, en especial en el municipio de Hopelchén, se considera necesario realizar una investigación que permita identificar los factores que inciden principalmente en la ocurrencia de incendios, para poder fortalecer las medidas de prevención y de proponer algunas opciones que den paso a la creación de un plan de manejo que pueda dar alternativas para la mitigación de esta problemática, con la finalidad de reducir los daños que se puedan presentar en la vegetación, el suelo, a la fauna y a la salud.

Otra cuestión que da importancia a la realización de esta investigación, es la posibilidad de generar información útil para diversos grupos de colectivos en el municipio, que han denunciado la excesiva ocurrencia de incendios forestales a causa de distintos actores agroindustriales, por lo que estos grupos han recurrido al uso de la tecnología para poder monitorear dichas quemas y utilizarla como evidencia de la creciente problemática. Por lo tanto, los productos que se pueden generar de este trabajo pueden ser aprovechados por las comunidades de Hopelchén para la gestión de su territorio, esto es de gran importancia, puesto que es necesario poder analizar y documentar la distribución de incendios forestales para poder determinar si estos están siendo provocados intencionalmente para propiciar cambios en el uso del suelo.

Objetivos

Objetivo General

Analizar los factores relacionados con la dinámica espacio-temporal que han provocado incendios forestales en el municipio de Hopelchén Campeche.

Objetivos particulares

- Identificar las principales causas que provocan incendios forestales en el municipio.
- Mapear las zonas con un mayor riesgo de probabilidad de ocurrencia de incendio
- Construir un índice de riesgo de incendios forestales.

Preguntas de investigación

- ¿La cercanía a zonas agroindustriales incrementan la probabilidad de ocurrencia de incendios?
- ¿Cuáles son los factores que propician en mayor medida un incremento en la ocurrencia de incendios forestales en la reserva?
- ¿Qué variable es la que presenta una mayor relación con la probabilidad de ocurrencia de incendios?

Hipótesis

Los incendios forestales no presentan una estructura espacial aleatoria, la cercanía a zonas agroindustriales provocan un incremento en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Efectos de los incendios forestales.

Se sabe que los incendios forestales han sido parte de los ecosistemas durante milenios, este elemento ha estado presente en casi cualquier sitio que tenga vegetación. Incluso algunas estimaciones de inicios del siglo XX sugirieron que en el planeta se tiene un promedio anual de superficie quemada equivalente a la mitad del tamaño de China (Hardesty et al., 2005). También a través del tiempo la humanidad se ha dado cuenta de las distintas caras del fuego, en el sentido que este puede ser tanto dañino como benéfico según los sitios en los cuales éste ocurra; por ejemplo, la humanidad se ha beneficiado del uso del fuego en sitios agrícolas, pero también se ha percatado de los efectos mortales que este puede tener cuando se sale de control, como en el caso de los incendios ocurridos en México en 1998 en donde perecieron bomberos al llevar a cabo trabajos de extinción del fuego y las pérdidas tanto económicas y ecológicas que puede ocasionar (Mutch, 1998; Hardesty et al., 2005).

Las afectaciones a la salud humana son provocadas también por las emisiones de gases de efecto invernadero, producto de la combustión de biomasa (Balde y Vega-García, 2019). La proporción de cada tipo de gas está en función de ciertas características, como la cantidad de biomasa quemada y la estructura que tenga la vegetación (Pereira et al., 2011; Balde y Vega-García, 2019). Los efectos que estos gases tienen en la salud humana pueden ir desde provocar irritación en los ojos, hasta provocar problemas en el sistema respiratorio (Galanter et al., 2000).

Otro de los efectos negativos que provocan los incendios forestales, es la reducción de la capacidad hidrológica de los bosques, después de ocurrido el incendio el ciclo hidrológico de una cuenca se puede afectar, pues la pérdida de vegetación provoca que se presente una disminución de infiltración, pues el fuego destruye gran parte de la cubierta orgánica, lo que expone el suelo al impacto de la lluvia (Cochrane, 2009; González-Ulibarry, 2009; Fernández y Vega, 2011). La pérdida de vegetación conlleva una fuerte erosión en los terrenos que fueron afectados por incendios forestales pues se ha determinado en algunas investigaciones que en bosques que perdieron vegetación a causa de este fenómeno, se presentaron pérdidas de suelo hasta de 50 cm (Cavelier et al., 1998). Esta erosión puede provocar diversos impactos en los ecosistemas, pues la acumulación de sedimentos puede alterar la dinámica de ríos y lagos, así como la calidad de las aguas de estos sitios, además de provocar cambios geomorfológicos e hidrológicos (Fernández y Vega, 2011).

Los cambios climáticos regionales también son efectos negativos importantes que deben tenerse en cuenta, estos pueden ser propiciados por la muerte de la vegetación en bosques tropicales (Bartlow et al., 2003). Esta pérdida de vegetación a escala tanto regional como local puede provocar que haya un decremento en la precipitación, lo que provocaría un aumento en la temperatura y una consecuente afectación a la dinámica de los seres vivos que habitan los ecosistemas (Uribe, 2015). Las alteraciones en los regímenes de lluvia también pueden ser provocadas por las emisiones de humo de los incendios forestales, ya que al expeler numerosas partículas en las cuales el agua pueda adherirse y seguir suspendida en el aire, esto impide que se

formen gotas lo suficientemente grandes para que caigan a la superficie, además el humo causa una disminución en la diferencia de temperatura de suelo y aire, lo que provoca que los sistemas convectivos que propician la lluvia no actúen (Borunda, 2021).

1.2 Formas de transferencia de calor

Para que exista un incendio forestal es necesario que se dé un proceso de combustión, la cual es un proceso de oxidación en donde se libera energía, básicamente el producto que se obtiene mediante este proceso es el dióxido de carbono, pero también se libera agua y la energía almacenada como luz y calor (Cochrane, 2009; Gomollan, 2017). Las llamas en los ecosistemas comienzan por medio de la combustión la cual requiere de una mezcla adecuada de tres elementos básicos: calor, oxígeno y combustibles (CENAPRED, 2008). Para los incendios forestales, los últimos de estos elementos son en su mayoría materiales derivados de la biomasa vegetal tales como hojas y madera, entre otros (Rodríguez-Trejo, 2002). En este proceso se rompen y reestructuran los enlaces químicos de tal forma que la energía total en los nuevos enlaces reestructurados que forman los productos finales (CO₂, Agua, Luz y Calor) es menor que la energía que se encontraba en los materiales originales, y es este cambio de energía debido a los reordenamientos de los enlaces químicos lo que provoca que se libere luz y calor (Rodríguez-Trejo, 2002; Rodríguez y Fulé, 2003). En este sentido se puede apreciar que para que exista una combustión continua, el calor que se genera en un sitio debe ser lo suficientemente intenso para poder transferirse a los combustibles adyacentes. Cuando ocurre esto, se dice que existe una combustión sostenida; cuando en el proceso de combustión los combustibles son volatilizados y se generan nubes de gas incandescente se dice que hay una combustión en llamas y si por el contrario la combustión ocurre solamente en la superficie de los combustibles se puede referir a una combustión sin llama (Cochrane, 2009).

Las sustancias orgánicas que son consideradas de combustión rápida deben pasar por tres fases principales de combustión las cuales son: el precalentamiento, fase gaseosa y fase de deshidratación del proceso de combustión (CENAPRED, 2008; CONAFOR, 2010). El precalentamiento se conoce también como preignición y es un proceso en el cual el fuego o alguna otra fuente de energía comienza a impartir calor para deshidratar los combustibles para que la ignición pueda ocurrir (Williams, 1982; Saito, 2001). En general se sabe que la temperatura de ignición de la biomasa vegetativa se encuentra en torno a los 350°C, pero esta temperatura no se puede alcanzar hasta que el agua haya sido evaporada de los combustibles (Cochrane, 2009).

Como se puede ver, la propagación de las llamas o el fuego es un proceso continuo de las fases que forman la combustión, en la cual los combustibles deben de precalentarse hasta que alcancen el llamado punto de ignición, hasta que finalmente se extinga el fuego (Cochrane, 2009). Debido a lo anterior, es necesario que el fuego sea capaz de transmitir el calor necesario a los combustibles adyacentes para que estos puedan entrar en las tres fases de combustión las cuales son: conducción, convección y radiación (Zárate, 2004).

Básicamente la conducción es la forma en la cual se transfiere directamente energía térmica de una molécula a otra; se sabe que esta es la forma principal de transferencia de calor al iniciar un incendio en el momento de que comienza la ignición, en este mecanismo se transfiere el calor de las zonas con mayor temperatura a las de menor temperatura (Zárate, 2004; Torraza, 2014). En cuanto a los combustibles, sus características térmicas pueden verse afectadas por la densidad del material, en cuanto a la madera de mayor densidad se dice que conduce el calor de mejor forma, se sabe que los combustibles de mayor densidad tienen mayores capacidades caloríficas que los combustibles que son más livianos, por lo tanto, necesitan una mayor cantidad de calor para llevarlos hasta el punto de ignición (Cochrane, 2009).

El segundo mecanismo de transferencia de calor es la convección, dicho mecanismo es una transferencia de calor a través de fluidos que están en movimiento. Para el caso de los incendios forestales, la atmósfera es el fluido que es calentado por las llamas. Al comenzar un incendio, el aire caliente comienza a expandirse y por lo tanto a calentar las copas de los árboles, debido a esto es que la convección es considerada como el método principal de transferencia de calor vertical. Esta forma de transferencia está compuesta por dos mecanismos: la transferencia de calor debida al movimiento molecular y la transferencia de energía por medio del movimiento global del fluido (Zárate, 2004; Torraza, 2014). Es sabido que en algunos incendios forestales las corrientes de convección pueden volverse muy fuertes, por lo que estas pueden determinar el comportamiento que tendrá el incendio, además este mecanismo es capaz de provocar incendios adicionales lejos del incendio original (Cochrane, 2009)

El último tipo de mecanismo de transferencia de calor es la radiación, este mecanismo es el causante principal de transferencia de calor responsable del precalentamiento de los combustibles, es el mecanismo que calienta los combustibles incluso antes de que el fuego haya llegado, como el fuego emite energía electromagnética, este mecanismo no requiere de la existencia de un medio para transferir el calor (Zárate, 2004; Torraza, 2014).

1.3 Materiales combustibles

Mediante el proceso fotosintético las plantas transforman la energía solar en energía química, en este proceso las plantas almacenan esta energía solar como biomasa y esta biomasa es el principal elemento que alimenta los incendios forestales; cuando se da el proceso de combustión toda esta energía almacenada como biomasa es liberada como luz y calor (Cochrane, 2009). Los combustibles tienen una gran cantidad de factores relacionados que determinan si un sistema forestal puede quemarse y la forma en la que va a arder. Los determinantes de estas dos condiciones y el comportamiento que puede tener cada incendio forestal son la composición del combustible, la carga y la disposición, el contenido de humedad y la continuidad del combustible (Ward, 2001).

Cuando se estudian los incendios forestales es necesario analizar diversos elementos que intervienen en la aparición de este fenómeno y en la forma en la que se comporta una vez que ocurre, algunos de los principales elementos son los materiales combustibles, la topografía y el tiempo atmosférico (Villers, 2006; Cochrane, 2009). Los materiales combustibles son toda la

biomasa que pueda encenderse al ser sometida a una fuente de calor, estos elementos que pueden generar una combustión son una amplia variedad de material vegetal que se encuentra en los ecosistemas. Algunas de las propiedades que son de gran importancia para poder evaluar y predecir el comportamiento de un incendio son: el contenido de humedad de los materiales, su distribución geográfica y la caracterización de los mismos; además estas características permiten crear modelos del comportamiento que el fuego puede tener en el terreno, la magnitud de intensidad que el incendio pueda alcanzar y la posible duración que pueda tener el incendio en un determinado tipo de ecosistema (Villers, 2006).

La forma principal de biomasa en los ecosistemas forestales es la madera, la cual tiene una composición de celulosa en su mayor parte y en menor cantidad hemicelulosa y lignina, esta última aporta la rigidez a las plantas leñosas (Pyne et. al, 1996). La lignina es un material que tiende a ser más energética para la combustión que la celulosa y la hemicelulosa, además de que es un material que tiende a resistir por más tiempo la descomposición, en consecuencia, a medida que la celulosa y la hemicelulosa se descomponen la proporción de lignina aumenta considerablemente propiciando que la biomasa pueda arder más fácilmente (Pyne et al., 1996). Otros materiales que tienen una gran importancia en el proceso de combustión son los aceites volátiles y las resinas, si bien, son componentes relativamente pequeños, son sustancias que tienen un alto contenido energético y tienen una gran capacidad para arder (Stott, 2000).

En general, los materiales combustibles se clasifican en dos tipos: vivos y muertos; siendo los primeros asociados a vegetación arbustiva y árboles, pastos y plantas que se encuentren debajo del dosel de los árboles. Es importante mencionar que la posibilidad de que estos materiales presenten una combustión y la velocidad con la que el fuego se propague en ellos, depende de la humedad que presenten (Rodríguez-Trejo, 1994). Los materiales clasificados como muertos, pueden ser ramas, troncos, hojas y hojarasca que se encuentren sobre el suelo, dependiendo de qué tanta disponibilidad haya de cada uno de estos materiales en el terreno y su contenido de humedad, determinará la posibilidad de que presenten combustión y propagación del fuego (Rodríguez-Trejo et al., 2005). Además de estos materiales es de gran importancia mencionar el mantillo; dependiendo del contenido de humedad presente, el fuego puede propagarse rápidamente y consumir todo el mantillo que hay en el suelo (Villers, 2006). Este elemento tiene una gran posibilidad de propiciar incendios subterráneos, los cuales en ciertas ocasiones son difíciles de detectar y pueden causar afectaciones al suelo (Neri y Rodríguez, 2009).

Otros componentes que no suelen ser muy mencionados son: frutos, conos o bellotas que yacen en el suelo, para que estos materiales puedan presentar una combustión, por lo general depende de que tanto contenido de resina presenten (Pyne et al., 1996; Villers, 2006). Una forma de caracterizar los distintos elementos que pueden generar combustión es por su carga o el peso de biomasa por unidad de superficie que cada tipo de vegetación presente, se puede decir que los distintos tipos de plantas presentan una carga distinta, por ejemplo, en zonas lluviosas la vegetación arbustiva y herbácea presentan una gran cantidad de biomasa; debido a esto se dice que esta vegetación tiene una gran carga de combustible (Díaz-García et al., 2013). Es precisamente la carga de combustibles, que se presente en cada sitio, lo que da paso a la magnitud

que pueda presentar un incendio, este dependerá de la cantidad de material depositado, además de la acumulación de materiales. Otras propiedades que también influyen en la forma en la que se presenta y comporta el fuego son la compactación y la continuidad de los combustibles en el terreno (Villers, 2006).

Un factor determinante para que un combustible pueda comenzar a presentar combustión es la humedad presente en el mismo, si el fuego es incapaz de transmitir la energía suficiente a los combustibles adyacentes a él, entonces el fuego no podrá propagarse; en este sentido solamente los materiales que presenten ciertas características para permitir que el fuego se propague son considerados como combustibles disponibles, estos combustibles son los materiales que realmente se queman en un incendio (Ryan, 1991). Este concepto de disponibilidad de combustibles es una de las razones del porqué los ecosistemas tropicales como las selvas, rara vez llegan a quemarse sin intervención del ser humano y es precisamente la creciente intervención en las selvas y los ecosistemas tropicales, lo que provoca que exista una alta cantidad de combustible disponible, lo que se traduce en la existencia de altas oportunidades de que ocurran incendios forestales en estos sitios (Pyne et al., 1996; Cochrane, 2003).

La humedad que presentan los combustibles es otra propiedad que se debe tener en cuenta para determinar la posible aparición de un incendio. En general, cuando un material orgánico vivo o muerto presenta una baja cantidad de humedad se dice que está listo para la combustión y la cantidad de humedad a la cual los incendios dejan de propagarse se denomina humedad de extinción (Wilson, 1985). Se menciona que el contenido de humedad en los combustibles muertos está determinado por el contenido de humedad en el ambiente y para el caso de los combustibles vivos el contenido de humedad es variable (Ryan, 1991; Villers, 2006). Otra de las clasificaciones que pueden hacerse de los tipos de combustibles son los tiempos con los que pueden arder, por ejemplo: los combustibles con un diámetro pequeño como la hierba, hojarasca seca, entre otros conservan poco tiempo su humedad y se convierten en una alta cantidad de combustible disponible, se les suele llamar combustibles rápidos, mientras que los de mayor diámetro tienden a conservar por un tiempo más prolongado su humedad y, por lo tanto, su contribución a los combustibles disponibles tiende a ser más lenta. Estos son llamados combustibles lentos, los tiempos en los que los distintos combustibles tienden a perder humedad son llamados tiempos de retardo o “*timelag*” (Villers, 2006).

Otro de los factores que tienen una gran influencia en el comportamiento del fuego es la topografía, puesto que tanto la pendiente, la orientación y las características de la micro-topografía pueden repercutir significativamente en el comportamiento y desplazamiento que el fuego puede presentar. Se menciona que la topografía es el parámetro más constante y que tiene una gran influencia sobre los anteriores (humedad y disponibilidad de combustible). Uno de los efectos que tiene la topografía es que influye en los patrones del tiempo atmosférico, lo cual puede provocar condiciones en el contenido de humedad en las plantas y en la materia orgánica del suelo (Villers, 2006). Además, la orientación de las laderas son una cuestión que debe tomarse en cuenta para determinar el contenido de humedad que presentan los materiales combustibles, puesto que dependiendo de la orientación de una pendiente se puede recibir más

radiación solar; este factor también es importante cuando un incendio está activo, puesto que en ciertas laderas se puede presentar una buena cantidad de viento, lo que puede provocar que el incendio se avive aún más y crear una condición de dispersión del incendio mayor (Perez-Verdin et al., 2013). En el hemisferio norte, las pendientes con una orientación sur y suroeste tienen mayores probabilidades de que se presente un incendio debido a la mayor cantidad de energía solar que reciben, por lo que los materiales combustibles presentes en estas laderas suelen tener un menor contenido de humedad y una mayor temperatura, la cual puede llevarlos a alcanzar una combustión (Fulé y Covington, 1999).

Desde una visión ecológica se sabe que la ocurrencia de los incendios forestales en los ecosistemas que presentan una serie de adaptaciones tienen ciertos beneficios para las especies que han evolucionado junto con la ocurrencia del fuego, por ejemplo se sabe que la gran mayoría de pinos mexicanos tienen un tipo de adaptación al fuego, como el *Pinus oocarpa Schiede* el cual desarrolló a través del tiempo adaptaciones que le permiten resistir incendios moderados (Rodríguez-Trejo et al., 2019).

Sin embargo, en la vegetación que no ha tenido una relación intrínseca con el fuego, la situación se puede agravar pues la presencia de un incendio puede implicar la alteración completa del ecosistema, como puede ser el caso de las selvas altas perennifolias y subperennifolias (Rodríguez-Trejo et al., 2019)

Dicho lo anterior se reconoce que la ecología del fuego se enfoca en el estudio de los procesos que relacionan el comportamiento del fuego y los efectos ecológicos que estos puedan tener, es decir, las relaciones entre el fuego, los seres vivos y su entorno (Sotile et al., 2018). Los efectos que el incendio pueda tener están en función de distintos factores como la duración, la extensión y la intensidad con la que se haya presentado; además la recurrencia o la frecuencia con la que se dé el incendio e incluso la estación en la que se presenta. Todos estos factores pueden ocasionar que un ecosistema afectado en particular tenga una evolución distinta después del evento, en ocasiones existen ecosistemas que han sido destruidos por completo, pero que pueden llegar a recuperarse con más vigor si se les da el tiempo suficiente, mientras que otros ecosistemas pueden llegar a sufrir alteraciones de las cuales no puedan recuperarse (Cochrane, 2009).

Algunas investigaciones han descubierto que el comportamiento del fuego ha estado cambiando considerablemente a través de los años debido a acciones humanas, en aquellos ecosistemas en los cuales el fuego tenía una presencia casi nula o muy esporádica, tienden a presentar mayores incendios forestales y en aquellos ecosistemas en los cuales el fuego ha estado presente a lo largo de miles de años, está siendo excluido y cada vez se trata de restringir más su presencia (Hardesty et al., 2005). Es por este motivo que cada vez más ecologistas consideran que el régimen del fuego está siendo alterado a tal grado que esta situación en particular se está convirtiendo en una seria amenaza para la conservación de la biodiversidad, además de que el fuego es considerado como uno de los principales factores de deforestación (Roberts, 2000). Dicha alteración puede ser el producto de distintas razones, pero por lo general se encuentra muy vinculada con cierto tipo de actividades como la agricultura o la silvicultura; es importante mencionar que esta alteración es por lo común un proceso que se produce de forma gradual (Hardesty et al., 2005).

1.4 Régimen de fuego

Un régimen de incendios son una serie de atributos que caracterizan este fenómeno, dentro de los cuales se pueden incluir a la frecuencia, intensidad, severidad, escala espacial, estacionalidad y fuente de ignición predominante (Roberts, 2000; Hardesty et al., 2005; Bond y Keeley, 2005). En función del tipo de régimen que presentan los diferentes ecosistemas es que se pueden clasificar: (1) los ecosistemas en los cuales el fuego tiene una presencia esporádica de forma natural son clasificados como sensibles al fuego, en los cuales se pueden mencionar diversos tipos de selvas; (2) los ecosistemas que tienen la característica de presentar las condiciones para que el fuego pueda esparcirse y en los cuales difícilmente pueda llegar a ocurrir, son clasificados como independientes del fuego y (3) en aquellos ecosistemas en los cuales la frecuencia del fuego es más común en condiciones naturales que en los anteriores, se clasifican como adaptados al fuego (Hardesty et al., 2005; Bond y Keeley, 2005). La importancia que tiene llevar a cabo la caracterización de los diferentes regímenes de incendios es en primera instancia para poder comprender el papel del fuego en la estructura de los diferentes ecosistemas. Además, estas caracterizaciones ayudan a ilustrar los cambios que se han producido en el régimen a través del tiempo debido a distintos factores, como pueden ser climáticos o provocados por acciones humanas, y pueden permitir la síntesis de información, pues son muy útiles para la descripción del papel normativo que el fuego puede presentar en un sitio (Morgan et al., 2001).

En este sentido se puede definir la alteración del régimen de incendios forestales, “*como la medida en que los patrones actuales de incendios se han alejado de las variaciones naturales o ecológicamente aceptables de cada tipo de ecosistema*” (Hardesty et al., 2005, p. 81). Se considera que esta alteración del régimen de incendio puede crear una serie de condiciones que amenacen la persistencia de especies vegetales y animales que hayan evolucionado con ese régimen de incendios. En este sentido se menciona que la alteración de cada uno de estos atributos puede significar una degradación de cada tipo de ecosistema, puesto que cambia de forma significativa la composición, estructura y función que cumplió el fuego durante un largo periodo de tiempo, lo que puede desencadenar la transición hacia un tipo de régimen y un nuevo tipo de ecosistema completamente diferente al original (Hardesty et al., 2005). Lo anterior nos habla de la enorme complejidad de la relación existente entre los incendios y la vegetación, por lo que es de suma importancia hacer los esfuerzos necesarios para mantener el régimen de incendios adecuado para cada tipo de ecosistema, puesto que diversas investigaciones sugieren que una vez que se inicia la trayectoria hacia un nuevo tipo de ecosistema, debido al cambio de régimen de incendio, es muy difícil o prácticamente imposible revertir o detener esta transición (Ryan, 2002; Hardesty et al., 2005; Rodríguez-Trejo et al., 2019).

1.5. Riesgo de incendio

Diversas disciplinas analizan las afectaciones que ciertos fenómenos naturales pueden provocar en las sociedades humanas, desde las ciencias sociales entre ellas la geografía, estas afectaciones pueden abordarse desde tres conceptos básicos; *desastre, riesgo y peligro* (Calderón, 1998). Es por este motivo que es necesario definir estos conceptos, puesto que la precisión semántica de los mismos proporciona un entendimiento más profundo de las investigaciones relacionadas con

temas ambientales (Aneas De Castro, 2000). En esta investigación el concepto de riesgo es el que guarda una especial importancia, debido a esto, solo se definirá dicho concepto.

1.5.1. Concepto de riesgo

Autores como Jean Gallois, citado por Aneas de Castro (2000), define la palabra riesgo como una situación que presenta una probabilidad de amenaza, desde un punto de vista humano, es decir, el término riesgo tiene una implicación de un evento que puede ocurrir en el futuro, por lo tanto, se entiende que el riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un peligro; este concepto, incluye tanto la probabilidad de ocurrencia de un acontecimiento antrópico o natural y la evaluación por parte del ser humano con respecto a sus efectos. Esta evaluación puede hacerse mediante la medición de pérdidas y probabilidad de ocurrencia, por lo tanto, si se cuenta con los datos necesarios para calcular la probabilidad de la ocurrencia de un evento, se puede definir el riesgo (Aneas De Castro, 2000). En este sentido, se puede entender como el riesgo de incendios forestal, como la probabilidad de que aparezca y se extienda el fuego sin control sobre la superficie de un ecosistema forestal (CONAFOR, 2020).

Capítulo 2. Estado del arte

Desde las ciencias de información geográfica se han llevado a cabo numerosos estudios acerca de incendios forestales, desde el uso de imágenes satelitales hasta modelos estadísticos para comprender y analizar las variables que intervienen en la aparición de los incendios. En el presente capítulo se hace una revisión de algunos de los estudios que se han realizado tanto en el contexto internacional como nacional. El interés de la investigación por las consecuencias que puedan tener los incendios forestales en la vegetación en diversas partes del mundo ha sido creciente, se menciona que el incremento de investigaciones en el mundo relacionadas con incendios forestales en selvas tropicales comenzó a darse a partir de que se observó una pérdida considerable de estos ecosistemas, sobre todo después de años El Niño fuertes (1982-1983 y 1997-1998), en particular para selvas tropicales (Juárez-Orozco et al., 2017).

Según Cochrane (2003), las temporadas 1997 y 1998 han sido de las peores temporadas de incendios en los trópicos, tan solo en América Latina y Asia los incendios forestales consumieron más de 20 millones de hectáreas. A comienzos del siglo XXI los cambios en el uso de suelo y demográficos comenzaron a representar un motivo para que los incendios forestales se convirtieran en una preocupación para la investigación en la ciencia del fuego, particularmente en los trópicos (Cochrane, 2003).

Esta preocupación parte de la alteración del régimen natural de incendios forestales en ecosistemas tropicales, pues en los hábitats donde el fuego ha sido muy poco frecuente, como en el caso de gran parte de bosques tropicales, la aparición constante de fuego puede llevar a la interrupción de los procesos naturales de recuperación de la vegetación, además de provocar emisiones de gases de efecto invernadero, disminución de la calidad del aire y en consecuencia una degradación de la salud humana (Cochrane, 2009).

Las investigaciones han encontrado que el humo que emiten los incendios forestales en el Amazonas han provocado que exista una disminución del tamaño de las gotas de agua en las nubes, que posteriormente se trasladan a ser gotas de lluvia, y encontraron que todos estos contaminantes que quedan retenidos en la atmósfera pueden causar un impacto radiativo en el sistema climático, provocando que las tormentas más fuertes liberen calor latente a la atmósfera y afectan de forma importante los sistemas de circulación atmosférica, tanto regionales como globales. Dichos cambios tienen una repercusión en el ciclo hidrológico y en la cantidad de contaminantes en la atmósfera (Andreae et al., 2004).

2.1 Contexto internacional

Se menciona que hasta el 2017, el 60% de los estudios sobre incendios forestales en selvas tropicales se encontraba concentrada en cuatro países principalmente: Brasil, Indonesia, Australia y Malasia (Juárez-Orozco et al., 2017). Algunas de las áreas principales que se han abordado en el tema de incendios forestales alrededor del mundo son la agricultura, la cual figura como una de las principales causas de incendios forestales; otra de las áreas abordadas es la relación entre deforestación e incendios, el cual es un tema que se comenzó a abordar en la década de 1990. Se menciona que esta área en particular es de gran interés para la comunidad científica y los

tomadores de decisiones. Una tercer área abordada es referente a los efectos que el fuego tiene en el suelo, biomasa y especies arbóreas, aunque se dice que este tema ha sido menos estudiado, y por último se pueden mencionar las investigaciones de la relación entre el fuego y las distintas especies de árboles (Juárez-Orozco et al., 2017).

2.1.1 Investigaciones relacionadas al suelo

Los intereses principales en la comunidad científica con respecto al tema de los incendios forestales en selvas tropicales, ha sido la relación entre la deforestación, actividades agrícolas, actividades de ganadería y la presencia de incendios. Es interesante destacar que a pesar de la relación entre actividades agrícolas, suelo e incendios forestales, se han realizado pocas investigaciones dirigidas al suelo o las relaciones entre las propiedades del suelo y los incendios forestales, al parecer las investigaciones que tratan la ocurrencia de incendios en distintos tipos de suelos, no siempre reportan la forma en la que las distintas temperaturas de los incendios pueden alterar las propiedades del suelo (Juárez-Orozco et al., 2017).

Algunos de los temas más importantes en el estudio de los incendios forestales y su afectación al suelo, son los cambios que se producen en el pH. Según Martínez et al., (1991), el nivel de pH se incrementa en gran medida debido al alto contenido de carbonato potásico en las cenizas. También la pérdida de materia orgánica debida a incendios forestales es una de las cuestiones que se consideran de importancia, ya que el fuego es capaz de reducir considerablemente los valores de materia orgánica en el suelo cuando la temperatura llega a superar los 450°C (Martínez et al., 1991). En investigaciones como la de González et al., (2009), se abordan temas como la calidad de la materia orgánica posterior a un incendio forestal, en ella se descubrió que la mineralización del carbono orgánico aumenta y que, al aumentar la temperatura, se modifican ciertas características del humus, lo que lo hace más resistente a la degradación microbiana. La porosidad es otro de los temas importantes en la investigación de incendios y el suelo, se ha comprobado que después de un incendio esta característica del suelo puede ser afectada, reduciendo los espacios entre el suelo, lo que provoca una mayor escorrentía y acelera las tasas de erosión (et al., 2008).

La deforestación es otro de los temas importantes en el estudio de incendios forestales, ya que la pérdida de vegetación también influye en gran medida la erosión del suelo; en algunas investigaciones se ha encontrado que esta pérdida de vegetación a causa del fuego provoca que la textura del suelo se vea modificada y cause algunas alteraciones en la propia estabilidad del suelo (Úbeda y Sala, 1996). Esta falta de vegetación deja descubierto el suelo y propicia que los agentes erosivos modifiquen considerablemente el paisaje, además de alterar la dinámica hidrológica (Rosero y Osorio, 2013).

2.1.2 Investigaciones en percepción remota

Con respecto a investigaciones realizadas en el ámbito de la percepción remota, la atención está más dirigida a la detección de incendios, a la cuantificación de las superficies afectadas, y a la determinación de los cambios en el uso del suelo; dentro de algunas de estas investigaciones se han contemplado diversas variables para poder crear modelos de riesgo de incendio forestal, en

los cuales se incluyen la proximidad a caminos, proximidad a localidades y áreas urbanas, variables climáticas y topografía entre otras (Juárez-Orozco et al., 2017).

Como se mencionó anteriormente, las líneas de investigación con respecto a incendios forestales son diversas y se han llevado a cabo ya desde hace algunos años, en cuanto a investigaciones con percepción remota se han realizado estudios en Brasil, Kenia y Tanzania desde el año 2000, los cuales tienen como finalidad comprender el papel que tienen los incendios forestales en el cambio de la cobertura vegetal y a su vez el papel del uso del suelo como factor de control de los incendios. En el estudio se destaca el uso de los sistemas de observación remota para la identificación de las zonas que han experimentado cambios rápidos en su cobertura vegetal (Eva y Lambin, 2000).

Investigaciones como la de Silva et al. (2005). llevada a cabo en África subsahariana, se enfocaron en analizar las estimaciones de superficies quemadas por medio de sensores remotos, empleando datos de los sensores SPOT-VEGETATION (resolución espacial de 1km) y Landsat ETM+ (Resolución espacial de 30m). Su objetivo fue comparar las estimaciones que se obtenían de ambos sensores, mostrando que los datos de sensores de resolución media pueden ofrecer estimaciones adecuadas, sin embargo pueden existir subestimaciones dependiendo de la severidad del incendio, el patrón espacial y la zona de estudio (Silva et al., 2005).

Otros estudios han empleado series temporales para estimar la superficie que se ha afectado en un periodo de tiempo, tal es el caso de la investigación llevada en la India por Krishna y Reddy (2012), en la cual emplearon datos del sensor IRS-P6 con resolución espacial de 56m, de un periodo de tiempo de 5 años (2005-2010), la metodología empleada en esta investigación fue la aplicación de una clasificación supervisada, en la cual se emplearon 600 puntos de control para el entrenamiento del algoritmo de clasificación. Dicha investigación les permitió identificar los años que presentaron los incendios más severos, además de estimar la superficie afectada en este periodo de tiempo, además de localizar y delimitar los sitios en los cuales los incendios han sido más recurrentes.

Otro tipo de investigaciones han empleado diversos índices espectrales tanto para la identificación de las superficies quemadas, como para la evaluación de la afectación en la vegetación o el suelo causada por la severidad que los incendios presentan, tal es el caso de la investigación realizada por Sobrino et al. (2019), en la cual tiene por objetivo evaluar la precisión que ofrecen los sistemas remotos para detectar la afectación al suelo dependiendo de la magnitud y severidad con la que se haya presentado el incendio. Para esta investigación, se emplearon datos de los sensores Sentinel 2 y datos del sensor Landsat 8. La metodología aplicada en este estudio fue una comparación de medidas tomadas in situ y de las que se obtienen mediante los datos de percepción remota y la aplicación de índices espectrales. En esta investigación los autores comprobaron que la clasificación de superficies quemadas y de los niveles de severidad realizados con los datos del sensor Sentinel-2, tuvieron una muy buena correlación con las mediciones hechas in situ, por lo que los autores concluyen con la buena aplicabilidad de los sensores remotos para la determinación de la afectación en el suelo debida a incendios forestales (Sobrino et al., 2019).

Dentro de la percepción remota existe un interés por evaluar la severidad con la cual los incendios afectan la vegetación, entendiendo la severidad como el grado de cambio en el ambiente causado por el fuego, dentro de este campo, las metodologías principales se basan en un análisis en campo de la afectación que sufrió la vegetación. Sin embargo, esta evaluación suele requerir mucho tiempo y recursos; una alternativa es el uso de índices espectrales para poder evaluar esta afectación (Montorio et al., 2014). Uno de los índices espectrales más empleados para la identificación de superficies afectadas por incendios forestales, ha sido el *Normalized Burn Ratio* (NBR), el cual emplea las regiones del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) y la región infrarroja de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés), las cuales son más sensibles a cambios en la vegetación afectada por fuego (Key y Benson, 2006; Hudak et al., 2007; Tanase et al., 2011; Montorio et al., 2014). La estimación de la severidad del incendio, tiene una gran importancia para el entendimiento que el fuego tiene en el crecimiento de la vegetación que aparece después de un incendio forestal; además el mapeo de la severidad tiene implicaciones importantes en el modelado de emisiones de dióxido de carbono (Epsting et al., 2005). Para poder determinar la severidad del incendio se emplea este índice para dos series de tiempo, una previa al incendio y una posterior al incendio, dicho índice es llamado Delta NBR (DNBR), el cual fue empleado por Key y Benson (2006). Este índice permite incrementar y aislar ciertas características que provocan los incendios forestales en la vegetación, puesto que las condiciones de la vegetación antes y después de la ocurrencia de un incendio son distintas.

2.1.3 Investigaciones de riesgo de incendios

Otra de las áreas importantes dentro de la investigación de incendios forestales, son las relacionadas con los índices y mapas de riesgo de incendios, algunos de los trabajos pioneros que se presentaron comenzaron a emplear los SIG para incorporar diversas variables que permitieran la modelación de zonas de riesgo de incendios a escalas locales (Cosentino et al., 1981, citado por Chuvieco y Salas, 1994). En una investigación llevada a cabo por Chuvieco y Salas (1994), se emplearon diversas variables que afectan la distribución de los incendios forestales en el espacio geográfico, el modelo que desarrollaron mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitió crear índices de riesgo para el territorio español, con lo cual los autores destacan la importancia de desarrollar estos índices de peligro que permitan la prevención y la extinción oportuna de incendios forestales.

Una de las preocupaciones de los investigadores de incendios forestales, es estudiar si las políticas de supresión que se aplican en los países pueden llegar a provocar que se acumule una gran cantidad de materia orgánica, la cual pueda ser un factor que pueda propiciar la aparición de incendios forestales de gran magnitud y severidad. Debido a lo anterior es que la identificación de zonas de alto riesgo de incendios forestales cobra una gran importancia, la investigación llevada a cabo por Parisien et al. (2005), se enfoca en analizar si la extinción agresiva de incendios forestales que se ha llevado a cabo en los bosques boreales de Canadá, ha aumentado inadvertidamente el riesgo de incendios forestales (Parisien et al., 2005). En su investigación los autores encontraron que las políticas dirigidas a la supresión del fuego han causado que exista un déficit de incendios forestales, lo que ha provocado que a través de los años se vaya acumulando una gran cantidad de materia orgánica, que puede dar paso a la aparición de incendios de gran

magnitud especialmente cerca de comunidades humanas (Parisien et al., 2005). En una investigación llevada a cabo en Venezuela para la determinación de zonas con riesgo potencial de presentar un incendio forestal, se empleó un análisis multicriterio en el cual se introdujeron en un SIG diversas variables que permitieran evaluar la susceptibilidad del espacio geográfico de presentar incendios (Abarca y Quiróz, 2005).

2.1.4 Investigaciones de corte social y manejo del fuego

Existen también investigaciones que se enfocan en el análisis de la gestión del fuego tanto como una herramienta para la agricultura, como para la prevención de incendios que llevan a cabo las comunidades (Bowman et al., 2008). En Bowman et al. (2008) se analiza la organización que tienen los pequeños propietarios de tierras en el estado de Pará, Brasil, para evitar la ocurrencia de incendios, con la finalidad de utilizar sus resultados para la creación de políticas que promuevan el manejo eficiente del fuego. Otra investigación de importancia es llevada a cabo por Eriksen (2007), en la cual se analizan los desacuerdos entre las políticas oficiales del uso del fuego y las prácticas de manejo del fuego de las comunidades indígenas en Zambia, África, situación que debe ser entendida con plenitud, ya que a través del tiempo se ha pensado que las prácticas tradicionales de uso del fuego, se alejan de la sustentabilidad. En dicha investigación se analiza el marco socioeconómico que afecta los regímenes antropogénicos de uso del fuego en dos parques nacionales de Zambia, sus resultados muestran la importancia que tiene el uso del fuego para la subsistencia de las comunidades rurales y como las relaciones de poder locales son capaces de impedir que las comunidades puedan adoptar regímenes de quema más sustentables (Eriksen, 2007).

2.1.5 Investigaciones de econometría espacial

Dentro del área de investigaciones de econometría y estadística geoespacial se pueden encontrar algunos estudios cuyo objetivo es identificar las variables que inciden tanto la aparición como en el comportamiento de los incendios forestales, tal es el caso de la investigación llevada a cabo por Wood et al. (2011), en la cual se tiene como objetivo la identificación de las variables topográficas que son de importancia para controlar el patrón de incendios de grandes dimensiones en la vegetación del sureste de Tasmania, además se emplean imágenes de satélite Landsat para realizar la cartografía de zonas afectadas por incendios forestales, los resultados que obtuvieron, muestran que existió una disminución de incendios forestales, y el modelado les indicó que los sitios en los cuales se dio un cambio de cobertura forestal se en su mayoría en zonas planas, lomas y en sitios con pendientes suaves. Además encontraron que en su zona de estudio la vegetación tendía a presentar estados estables después de que ocurrieran incendios forestales. (Wood et al., 2011).

Dentro de esta misma línea de investigación, aplicando estadísticas espaciales, Jordan et al. (2008) analizan las perturbaciones históricas por incendios tomando en cuenta su frecuencia, tamaño y distribución, además de contemplar los límites de las superficies quemadas, para determinar si estos límites eran persistentes en el tiempo. Sus resultados demostraron que los incendios son capaces de dejar una firma o un rastro espacial de límites que persisten en el tiempo, estos límites persistentes crean patrones a nivel de paisaje. En su estudio, sus resultados

demonstraron que las laderas que presentaban una orientación hacia el sur, tendían a presentar una mayor frecuencia de incendios forestales, que las laderas que tienen una orientación hacia el norte, por lo que infieren que las variables topográficas, tienen una fuerte influencia en la ocurrencia de incendios forestales, además, su estudio arrojó una relación fuerte entre variables atmosféricas como la humedad y la composición de especies vegetales (Jordan et al., 2008).

2.2 Contexto nacional

Las investigaciones relacionadas con los incendios forestales tienen una gran importancia en el país puesto que a partir de estos análisis es posible implementar mejores estrategias de prevención, combate y en especial manejo del fuego, ya que en la actualidad en términos de políticas públicas se desea transitar hacia una visión holística del uso del fuego en lugar de verlo solo como una amenaza (Monzón-Alvarado, 2017).

Análisis bibliométricos llevados a cabo por Neger et al. (2022) sugieren que la mayor parte de investigaciones en el país, se han concentrado en la parte noreste y centro del país, teniendo temas de investigación relacionados con el análisis geoespacial; el cual se ha concentrado principalmente en la elaboración de mapas de riesgo y modelos de riesgo, determinación de zonas afectadas por incendios y la estimación de emisiones. Y estudios relacionados con la documentación de los regímenes de incendios.

2.2.1 Ecología del fuego en México

Algunos de los trabajos más extensos en esta línea de investigación corresponden a Dante Arturo Rodríguez Trejo, el cual ha llevado a cabo un extenso trabajo de investigación relacionado tanto con la ecología del fuego, en el cual aborda una completa investigación de los efectos que el fuego tiene en los ecosistemas (Rodríguez-Trejo, 2002; Flores y Rodríguez, 2005; Rodríguez-Trejo, 2008). Otras investigaciones relacionadas con la ecología del fuego han analizado cuestiones concernidas con el manejo del fuego, con fines de emplearlo de forma adecuada en cada tipo de ecosistemas (Jardel, 2010). También vinculado al tema del manejo y la ecología del fuego, se puede mencionar el trabajo de Monzón-Alvarado (2018), en el cual se analiza de forma detallada las prácticas agrícolas que emplean fuego, la forma en la que se toman precauciones para emplearlo y las cuestiones relacionadas con políticas públicas. Además, se han llevado a cabo investigaciones cuyo objetivo es analizar los efectos que el fuego ocasiona en ecosistemas templados, como bosques de pino (Rodríguez y Fulé, 2003).

2.2.2 Investigaciones relacionadas con percepción remota en México

En el campo de la percepción remota se tienen numerosas investigaciones en el país. La investigación pionera en México empleando imágenes de satélite, fue llevada a cabo por Minnich (1983), el cuál investigó la relación entre el aumento de incendios forestales con las sequías severas (Neger et al., 2022). Otras de las investigaciones precursoras, se dieron a partir de los grandes incendios de 1998, en las cuales emplearon datos del sensor AVHRR para la detección de incendios activos empleando las bandas del infrarrojo medio y térmico, en dicha investigación pudieron observar que la combinación de bandas tiende a dar mejores resultados en la detección de incendios que si se utilizan de forma aislada (Ortiz et al., 2003). Algunos de los objetivos

principales en las investigaciones de incendios forestales en el campo de la percepción remota tienen como objetivo la identificación, cuantificación de las superficies que se han quemado y de los cambios que se produjeron después del incendio, cuyo método es por medio del uso de imágenes satelitales y uso de índices espectrales (López-García y Manzo, 2008; López-García y Manzo, 2013; Molina y Manzo, 2016;).

Otro de los temas de importancia es la evaluación de la severidad de los incendios forestales. López (2017) llevó a cabo una evaluación por medio de imágenes Landsat 7 en el bosque de la primavera empleando para la detección de las zonas quemadas el índice espectral NBR y para la evaluación de la severidad el índice dNBR, en el cual pudo identificar los sitios en los cuales se presentaron incendios con una mayor severidad, por lo que muestra el buen desempeño de este índice en la evaluación de los daños que sufre la vegetación por incendios forestales.

En la investigación llevada a cabo por Quintero y Flamenco (2015) se analiza la relación entre la intensidad de lluvias y los incendios de alta severidad, en esta investigación se emplearon los índices NDII los cuales utilizan la información de las bandas de los infrarrojos, ya que según los autores la señal de la superficie quemada es más nítida en el segmento del espectro electromagnético infrarrojo de onda corta (SWIR). Los resultados de su investigación demostraron la relación existente entre las bajas precipitaciones y los incendios con una alta severidad.

Autores como Montero et al. (2004) han demostrado que los datos provenientes de sensores de resolución espacial baja tales como el sensor GOES tienen excelentes resultados en el estudio del ciclo diurno de la quema de biomasa debido a su alta resolución temporal, en su investigación implementan un algoritmo que permita la identificación automática de zonas en las que se presentan quemadas de biomasa. Otras investigaciones se han enfocado en la probabilidad de ocurrencia de incendios empleando inteligencia artificial y percepción remota, el modelo que desarrollaron contribuye a la creación de mayor conocimiento y comprensión de la dinámica de incendios en los distintos ecosistemas (Sosa et al., 2016).

La clasificación de imágenes es otro de los campos de interés en la identificación de incendios forestales, Priego et al., (2014) emplearon dos clasificadores para la detección automática de incendios forestales, en dicha investigación utilizaron árboles de decisión y redes neuronales, sus resultados mostraron que la clasificación por red neuronal tuvo mejores resultados que el árbol de decisión. Las investigaciones empleando imágenes satelitales, además de permitir estimar la superficie afectada, permite estimar las emisiones que se producen en un incendio, algunas de estas investigaciones han empleado datos del sensor MODIS para la estimación de la superficie quemada y la posterior estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Bautista, 2015).

2.2.3 Investigaciones en la gestión de incendios forestales

Debido a que en la aparición de incendios forestales intervienen un gran número de actores, es necesario la comprensión de las interrelaciones que se dan entre ellos (Neger, 2021). Es por este motivo que las investigaciones relacionadas con la gestión del fuego presentan una gran

importancia. Una de las investigaciones más recientes en este campo, es llevada a cabo en Veracruz por Neger (2021), en la cual analiza la configuración territorial de los actores sociales implicados en la gestión de los incendios forestales. Otra de las investigaciones en esta línea, es llevada a cabo en el municipio de Calakmul, Campeche; por Monzón-Alvarado (2017), en la cual hace un análisis del manejo del fuego agrícola y las medidas que los campesinos del lugar llevan a cabo según las variaciones en la precipitación anual, con lo cual resalta la importancia que tiene la consideración de la variabilidad climática en el manejo del fuego.

En el sur del país Neger y Manzo-Delgado (2021), realizaron una investigación que analiza los actores e instrumentos implicados en el manejo del riesgo de incendios, con lo cual evaluaron la efectividad que estos actores tienen en el manejo del riesgo de incendios forestales en la Reserva de la Biosfera de los Tuxtlas, en dicha investigación se analizan los instrumentos legales que intervienen en la gestión del riesgo.

2.2.4 Investigaciones de riesgo de incendios y econometría espacial

Dentro de esta línea de investigación, los objetivos que se persiguen es la elaboración de modelos que permitan determinar los sitios con un mayor riesgo de presentar incendios severos, Muñoz et al., (2005) contemplaron tres variables principales para llevar a cabo la evaluación de peligro de incendio en bosques de clima templado del estado de Nuevo León: la carga de combustibles, los factores meteorológicos y algunos componentes socioeconómicos. En su investigación pudieron determinar que las mayores cargas de combustibles se encontraron en los bosques de *Pinus pseudostrobus* y bosques de *Pinus pseudostrobus* asociados con bosques de *Quercus spp.*

En la investigación llevada a cabo por Villers y López-Blanco (2004), se evalúa la composición de los distintos materiales combustibles y la relación que guardan con los factores meteorológicos, esta investigación realizada en el Volcán La Malinche reveló que en esta zona de estudio se presentaba una relación inversa entre los valores promedio de precipitación con respecto al incremento del número de incendios, además de que constataron que la vegetación más afectada han sido los bosques de pino y los pastizales en especial los que se encuentran entre los 2600 y 3200 msnm.

Otra de las investigaciones en esta línea, utilizó la humedad el suelo como predictor principal de incendios, en esta investigación se pudo comprobar que la humedad relativa del suelo es un mejor predictor de incendios y de la superficie afectada que los factores climáticos simples, ya que la humedad del suelo se encuentra relacionada estrechamente con la humedad de los combustibles forestales en los bosques templados (Navar-Cháidez, 2009).

En el contexto mexicano, las investigaciones relacionadas con la econometría espacial han sido llevadas a cabo por Rodríguez-Trejo et al., (2012), en la cual aplican un modelo de regresión logística para la predicción de peligro de incendios forestales en el estado de Puebla, los resultados de este trabajo muestran que mientras menor sea el número de localidades y mayor sea el número de ramales de vías de comunicación y mayor sea la precipitación, los incendios forestales tienden a aumentar.

Al norte del país se han llevado a cabo algunos estudios de la distribución de incendios forestales, tal es el caso del trabajo realizado por Simental-Ávila y Pompa-García (2016), en la cual analizan las variables topográficas: pendiente, altitud y exposición; las cuales según los autores caracterizan el comportamiento de los incendios forestales. En esta investigación, los autores encontraron que la variable exposición presenta una fuerte autocorrelación espacial a diferencia de la pendiente y la altitud, las cuales no presentaron autocorrelación espacial. Pompa-García y Hernández (2012) llevaron a cabo un análisis de posibles clusters de puntos de calor en Durango, empleando el estadístico G de Getis y Ord, en el cual hallaron que los principales clusters de incendios se concentran en bosques de coníferas y encinos.

Un estudio realizado por Pérez-Verdín et al. (2012) encontró que los incendios forestales en el estado de Coahuila tienen una distribución agregada y que la mayor concentración de los mismos se da cerca de las vías de comunicación y los centros de población. Además, encontraron que en este estado de la República Mexicana, los incendios son un fenómeno no estacionario temporalmente, es decir la ocurrencia de los mismos se manifiesta de forma aleatoria en cada año, algo similar a lo que ocurre con la diferencia en la precipitación. Otro de los hallazgos importantes en esta investigación fueron los resultados de la Regresión Geográficamente Ponderada, la cual mostró que la magnitud de los incendios está no sólo influenciada por factores ambientales, sino que los factores socioeconómicos juegan un papel importante en la ocurrencia de incendios forestales.

Otro estudio realizado por Zúñiga-Vásquez et al. (2017) que analizó la distribución de los incendios a nivel nacional, encontró que las zonas con una mayor agrupación de incendios forestales se distribuyen dentro de la región centro occidental de país, en especial en la parte del eje Neovolcánico; en la parte noroeste del país donde se encontraron altos valores de agrupación en la Sierra Madre Occidental y en la zona alta de la península de Baja California; también en la parte sureste correspondiente a la Península de Yucatán se registraron altas concentraciones de incendios forestales. Uno de los resultados interesantes de esta investigación, es que el análisis espacial mostró que los grupos de incendios siguen un patrón similar en los años que se analizaron.

Trabajos como los de Vilchis et al. (2015) han empleado variables topográficas, meteorológicas y antropógenas para la elaboración de modelos de regresión logística para la detección diaria de zonas con alto peligro de presentar incendios forestales en la cuenca del río Balsas, en el cual pudieron obtener más de 86% de efectividad de predicción espacial y temporal.

Vilchis et al. (2018) llevaron a cabo un modelo de regresión logística en Morelos, para la predicción de zonas con un riesgo alto de presentar incendios, en este trabajo se tuvo como objetivo la construcción de un modelo diario que sirva para la definición de sistemas de alerta temprana, en su investigación pudieron obtener hasta un 98% de eficiencia en la predicción de zonas potencialmente riesgosas y zonificaron los bosques de pino y mesófilo de montaña como los ecosistemas con mayores probabilidades de presentar incendios forestales.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Área de estudio

El municipio de Hopelchén está situado en el este del estado de Campeche (figura 1), colinda al norte con el estado de Yucatán, al sur con el municipio de Calakmul, y al oeste con los municipios de Campeche, Hecelchakán, Champotón y Tenabo (INAFED, 2017). El relieve de este municipio se caracteriza por presentar pequeñas elevaciones, de las cuales, la máxima altura que presentan es de 350 msnm, mientras que otra parte de su superficie presenta planicies en las cuales el suelo es empleado para actividades agrícolas (INAFED, 2017). Al presentar rocas muy permeables, en el municipio no se presentan muchos ríos, la mayor parte del agua se infiltra y crea corrientes subterráneas, (INAFED, 2017). Existen dos tipos de climas predominantes en el municipio: cálido subhúmedo (Awo), el cual presenta lluvias en verano y el cálido subhúmedo (Aw1), el cual presenta lluvias en invierno, la temperatura promedio es de 26°C, la mínima de 19°C y la máxima de 32.5°. Los principales tipos de ecosistemas son las selvas altas y la vegetación secundaria, aunque también se presentan sabanas y pastizales (INEGI, 2021; INAFED, 2017).

La mayor parte de la población del municipio está conformada por personas de ascendencia maya, y en menor grado personas mestizas, provenientes de otras regiones de México, también ha existido una migración de pueblos de ascendencia extranjera como los llamados menonitas, los cuales han tenido una intervención bastante significativa en el cambio de la dinámica agropecuaria del municipio (Ellis et al., 2018). Según datos del último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), algunos de los grupos de habitantes más representativos del municipio de Hopelchén son los siguientes (Tabla 1).

Tabla 3.1. Datos del censo de población y vivienda 2020. Elaboración en base a los datos de INEGI.

Población total	Población que habla alguna lengua indígena	Población que habla alguna lengua indígena y no habla español	Población que habla alguna lengua indígena y además habla español	Población afroamericanos
89,696	28,919	568	28,022	1,760

Se podría decir que socioeconómicamente, Hopelchén tiene una división de su territorio en dos partes: en la parte centro norte la mayoría de población se dedica a la agricultura mecanizada, la cual fue iniciada principalmente por los grupos menonitas y algunos grupos de empresarios, poco a poco fue adoptada por los pobladores oriundos de la entidad, en donde los cultivos que tienen una mayor producción son el maíz, el sorgo y la soya, este último conocido por los serios problemas de deforestación que ha ocasionado en el municipio, puesto que el crecimiento de las áreas en donde se cultiva soya ha estado acompañado de procesos de privatización de tierras ejidales y subsidios gubernamentales que benefician a los grandes productores y en donde se han registrado serios problemas de deforestación (INEGI, 2015; Ellis et al., 2018; Sánchez, 2022). Mientras que en el sur, la población tiende a dedicarse más a la apicultura, y depender de los recursos forestales, en general esta parte del municipio tiene en su mayoría población indígena, la cual practica la agricultura tradicional, así como la cosecha de madera, aunque la ganadería ha estado creciendo en los últimos años (Ellis et al., 2018).

Hopelchén es poseedor de una gran superficie que se emplea con fines agroindustriales, uno de los sectores poblacionales que más han influido en este proceso de ampliación de la frontera agrícola, son los menonitas, la cual se ha ido incrementando en los últimos años y los que emplean la agricultura mecanizada con monocultivos de maíz, sorgo y soya (Ellis et al., 2018). El problema de la deforestación y la ampliación de la frontera agrícola, se vió marcada en el año 2004, principalmente por el rápido y vertiginosos aumento de los cultivos de soya, producto que ha colocado a Hopelchén como el municipio con la mayor producción de soya en el año 2021, este cambio hacia un modelo de agricultura industrial o agroindustrial que se ha presentado en el municipio a partir del año 2000, tiene múltiples actores, tales como los ya mencionados grupos menonitas, empresas agroindustriales que están instaladas en los estados vecinos e incluso ejidatarios a quienes les han arrendado sus tierras (Sánchez, 2022).

En el sur del municipio, otra de las actividades económicas de importancia, además de las ya mencionadas, es la ganadera, la cual también ha provocado problemas de deforestación, además algunas comunidades mayas, han optado por la implementación de la agricultura mecanizada, imitando la dinámica agrícola que se ha dado en la parte norte de Hopelchén (Ellis et al., 2018; Sánchez, 2022). La renta de tierras y la venta de la misma por parte de ejidatarios al creciente grupo de menonitas y productores agroindustriales, también es una de las actividades que ha

provocado un aumento en la frontera agrícola, pues mediante este mecanismo, se traslada la propiedad ejidal a la privada, dando el derecho a los grupos agroindustriales de implementar monocultivos en extensas superficies del municipio (Ellis et al., 2018; Sánchez, 2020).

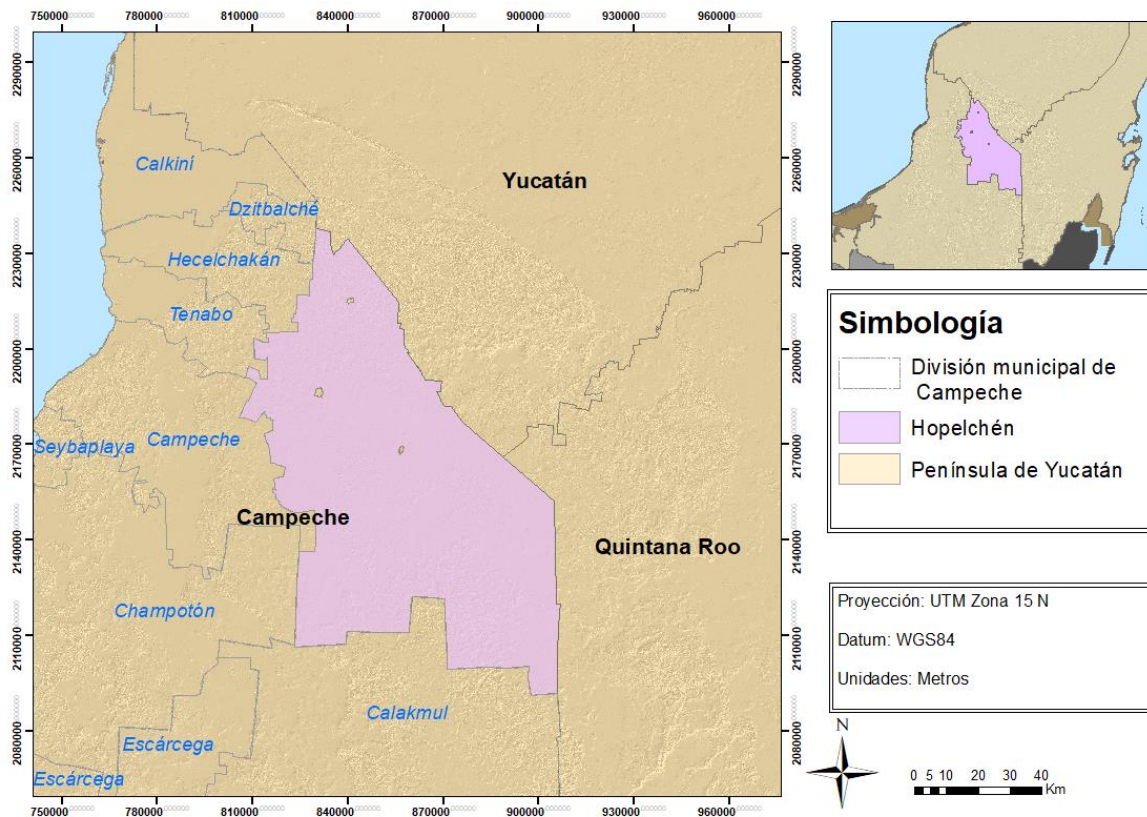


Figura 3.1. Ubicación del municipio de Hopelchén, Campeche.

3.2 Descripción general de la metodología y obtención de datos

Los datos se obtuvieron de sitios web gubernamentales oficiales (INEGI, WorldClim, CONAFOR), una vez obtenidos se procedió a realizar el procesamiento de los mismos. y elaborar las variables independientes y la variable dependiente para la construcción del modelo de regresión logística. El primer paso fue la búsqueda bibliográfica que ofreciera un respaldo teórico de las variables empleadas en diversas investigaciones relacionadas. Obtenidos los datos necesarios para la elaboración de los regresores, se procedió a clasificarlos en dos grupos: variables meteorológicas y antropogénicas. De forma subsecuente se procedió a la búsqueda de los datos que formarían la variable respuesta, los cuales serían sometidos a un proceso de filtrado para asegurar que se tratasen de incendios forestales. Posteriormente, los datos que formarían las variables independientes y la variable respuesta, se unieron en una sola base de datos, la cual sería dividida en dos temporalidades, la división en dos temporalidades fue realizada debido a los cambios en las dimensiones de las zonas agrícolas en estos años, los cuales son apreciables en las series V y VI de uso de suelo y vegetación de INEGI, y de las cuales se elaboraron los modelos de probabilidad de ocurrencia de incendios, en el siguiente esquema se describe de forma gráfica el procedimiento que se llevó a cabo (Figura 2).

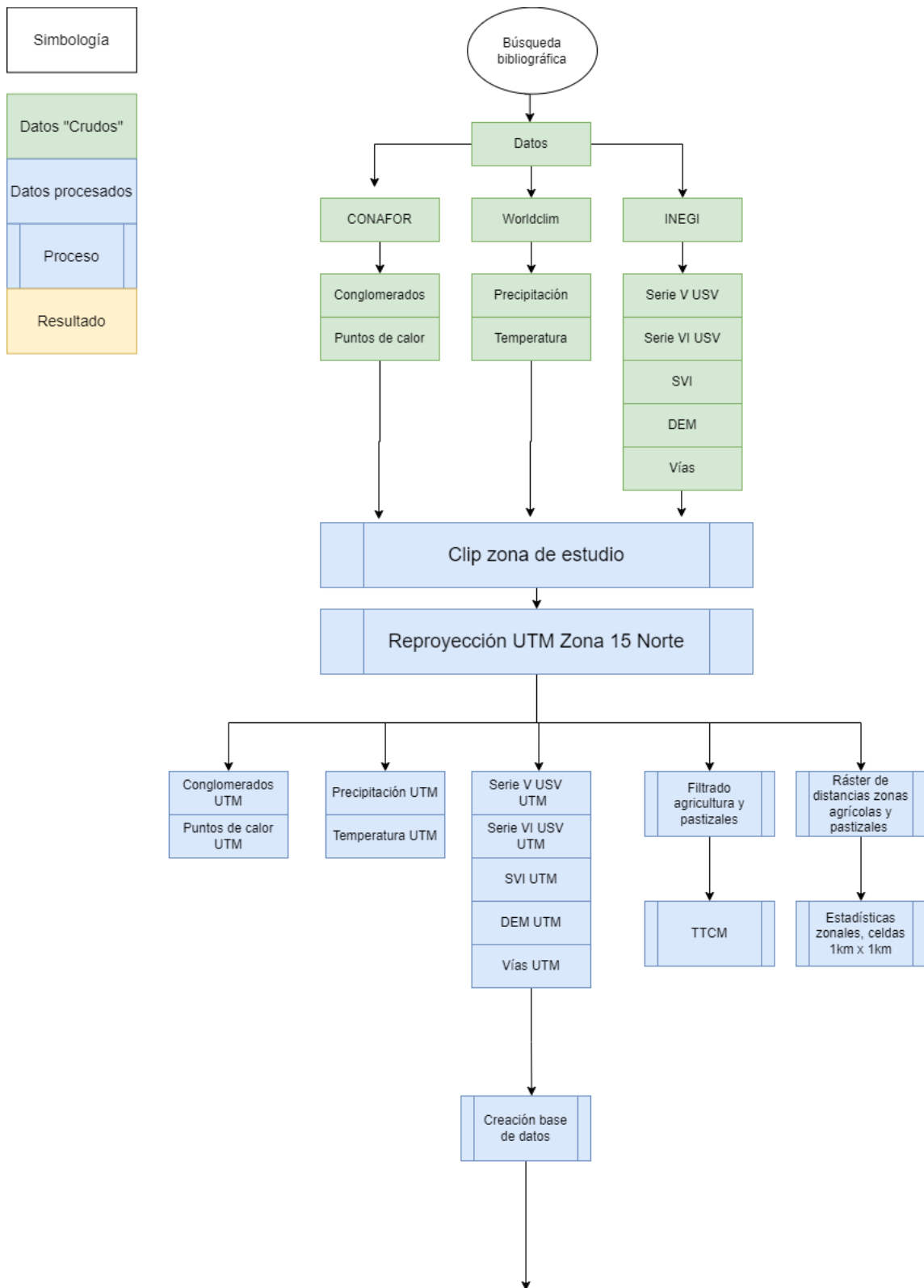


Figura 3.2 a). Esquema metodológico general (Continúa siguiente página).

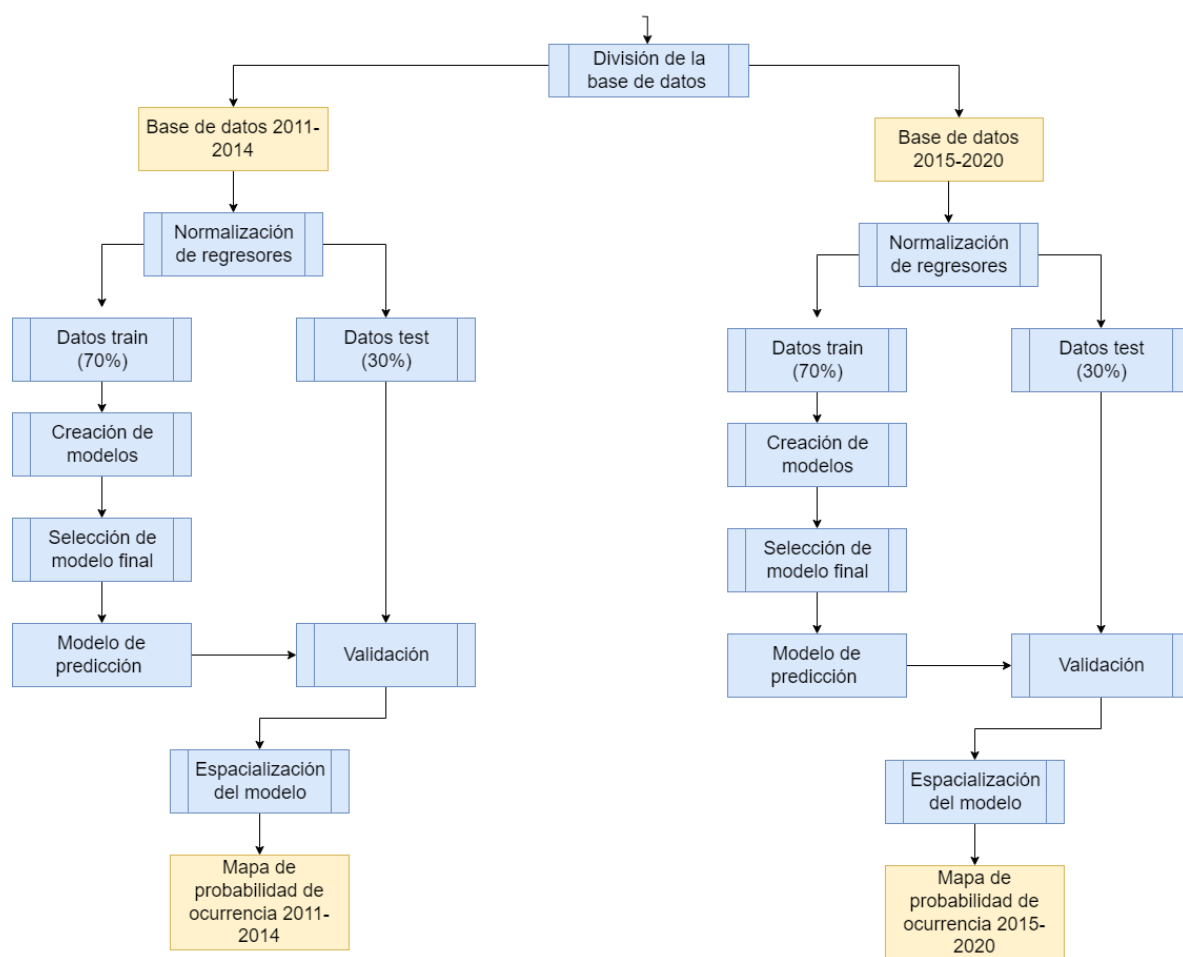
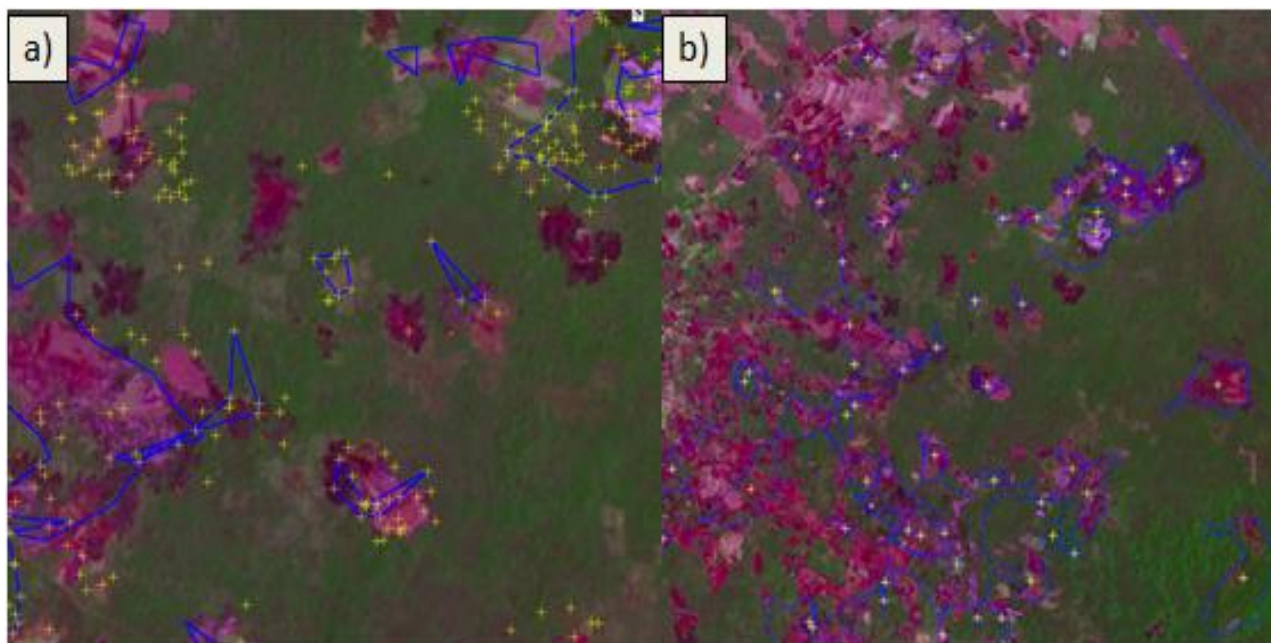


Figura 3.2 b). Esquema metodológico general (Continuación).

Variable dependiente

Para poder generar la variable dependiente se emplearon las ubicaciones de incendios forestales del periodo 2011-2020, una parte de la base de datos, fue proporcionada directamente por la Comisión Nacional Forestal (2015-2020), y la otra parte (2011-2015) fue descargada del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales en México, de la Comisión Nacional Forestal. Los datos son conocidos como conglomerados, los cuales son perímetros de agrupaciones de puntos de calor forestales. Para asegurarse que todos estos conglomerados fueron incendios forestales, se sobrepusieron con imágenes de satélite Landsat 7 y 8, y se les aplicó una composición de falso color 7, 4, 3, la cual resalta las superficies que fueron afectadas por fuego y se aplicó una máscara de vegetación para filtrar únicamente los conglomerados y puntos de calor que cayeran en superficies forestales (Figuras 3 a y b). Esta parte de la metodología es de suma importancia, ya que algunos autores han mencionado un cierto nivel de discontinuidad en los puntos de calor provenientes de algunos sensores, con respecto a la totalidad de superficies quemadas, lo cual puede deberse a distintos factores entre ellos la presencia de nubes, cuya presencia puede provocar que los sensores remotos no registren la totalidad de ubicaciones

(Neger y Manzo-Delgado, 2021). O bien presentar un margen de error en la ubicación así como en la cuestión temporal (Mas-Caussel et al., 2020), por lo que es necesario tener presentes, algunas de las limitantes del uso de estos datos y emplear de forma paralela imágenes de satélite para corroborar la ubicación de la mayor parte de incendios (Neger y Manzo-Delgado, 2021). Una vez que se aseguró que estos conglomerados fueron incendios forestales, se obtuvo el centroide de todos estos polígonos y se construyó la base de datos final.



Figuras 3.3 a y b. Proceso de filtrado de puntos de calor (cruces amarillas) y conglomerados (líneas azules)

Es posible notar en la imagen anterior, que varios incendios ocurrieron de forma adyacente a zonas agrícolas, por lo que fue importante llevar a cabo el filtrado de los puntos de calor y los conglomerados, para asegurar que la base de datos estaría construida solo con incendios forestales y no con quemas agrícolas. También es de mencionar que algunos puntos de calor no coinciden con superficies quemadas en esta imagen, esto se debe a la fecha de la misma (11-abr-2020), mientras que los puntos de calor son de todo el mes de abril, por lo que en varios casos fue necesario emplear dos imágenes del mes revisado para poder comprobar que se trataran de incendios forestales.

Habiéndose asegurado que los perímetros de los conglomerados correspondían a incendios forestales, se obtuvieron sus centroides y se complementó la base de datos proporcionada por CONAFOR con estas nuevas ubicaciones. Una vez filtrados los puntos de calor y los conglomerados, se creó una malla cuadrículada de 1 km x 1 km y se realizó un conteo del número de incendios que estaban dentro de cada cuadrícula. La unidad de análisis anterior fue determinada en base a investigaciones relacionadas con el empleo de la regresión logística para predicción de incendios (Vilar del Hoyo et al., 2007), este tamaño permite que el conteo de

eventos sea más homogéneo. Posteriormente se generó una columna binaria que correspondería a la variable respuesta (binom), y se asignó la siguiente codificación: 0 para celdas que no presentaron incendios y 1 para las celdas que presentaban uno o más incendios. Debido a que en algunas celdas se presentó más de un incendio forestal, fue necesario hacer un balanceo de datos, el cual consistió en repetir los registros dependiendo el número de incendios que se hubieran tenido en cada celda (figura 4). Este procedimiento fue necesario, ya que al realizar las primeras pruebas del modelo, se pudo observar que subestimaba bastante las observaciones con incendios forestales.



Figura 3.4. Elaboración de la variable dependiente.

Al hacer una inspección preliminar de la ubicación de los puntos de calor para ambos periodos (2011-2014, 2015-2020), es posible notar que su concentración es menor cerca de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, en comparación con la concentración que se presenta en las otras partes del municipio de Hopolchén (Figura 5), esto puede deberse al manejo del fuego que se tiene en el municipio de Calakmul, el cual ha sido destacado por autores como Monzón-Alvarado (2018), la cual informa en su estudio que la mayor parte de los campesinos han adoptado una serie de medidas de prevención de incendios cuando realizan sus quemas agrícolas, una de estas medidas es la observación del tiempo atmosférico, en especial el viento y la lluvia, ya que si realizan las quemas en días en los cuales las corrientes de viento sean muy fuertes y las condiciones de humedad sean muy bajas, se puede correr el riesgo de que la quema se salga de control y se produzca un incendio de gran magnitud, medidas que en otros municipios no han sido realizadas de forma tan rigurosa (Monzón-Alvarado, 2018), por lo que posiblemente los habitantes del municipio de Hopolchén que se encuentran cerca de la reserva, hayan adoptado medidas similares. No obstante, es posible observar algunos puntos de calor dentro de la reserva, justo en los límites con el estado de Quintana Roo.

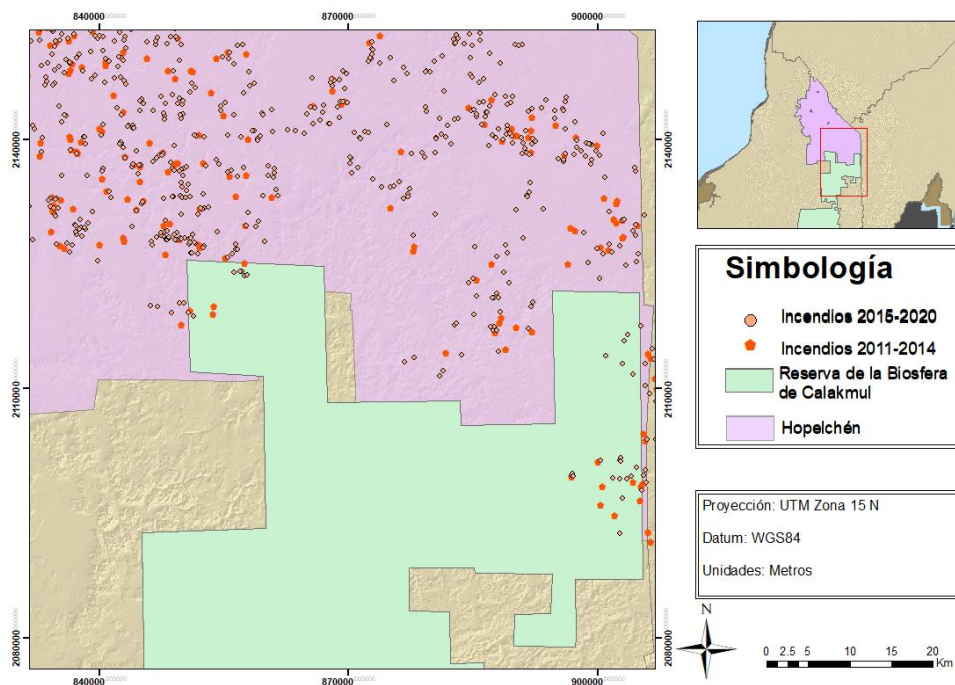


Figura 3.5. Presencia de puntos de calor cercanos a la reserva de la Biosfera de Calakmul.

Variables independientes

Las variables predictoras se dividieron en dos grupos: variables meteorológicas (Precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media) y variables antropogénicas (Distancias a zonas agrícolas de temporal, a zonas agrícolas de riego, distancias a zonas de pastizales inducidos y se creó un modelo de accesibilidad a las vías de comunicación). Dichas variables fueron elegidas con base en la revisión bibliográfica (Tabla 2).

Tabla 3.2. Variables empleadas en diversas investigaciones de incendios forestales

Variable	Unidad de medición	Autores que las han utilizado
Distancia a zonas agrícolas de temporal	Metros	Pérez-Verdín et al., 2012
Distancia a zonas agrícolas de riego	Metros	Pérez-Verdín et al., 2012
Distancia a pastizales inducidos	Metros	Pérez-Verdín et al., 2012
Distancia a vías de comunicación (Modelo de accesibilidad)	Minutos	Pérez-Verdín et al., 2012
Precipitación	mm	Pérez-Verdín et al., 2012, Vega-García et al., 1999
Temperatura media	°C	Pérez-Verdín et al., 2012; Cruz-Espíndola et al., 2017
Temperatura máxima	°C	Pérez-Verdín et al., 2012; Cruz-Espíndola et al., 2017
Temperatura mínima	°C	Pérez-Verdín et al., 2012; Cruz-Espíndola et al., 2017

Variables antropogénicas

Para crear estas variables se descargaron las series V y VI de INEGI, y se filtraron los distintos tipos de agricultura y pastizales, posteriormente, mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica se generó un raster de distancias para cada tipo de agricultura, y se extrajeron las estadísticas básicas de cada celda de 1 km x 1 km (Figuras 6 a, b y c). Para determinar el tiempo de traslado desde las vías de comunicación a la totalidad del municipio, se construyó un modelo de accesibilidad empleando la herramienta Time Travel Cost Surface Model (TTCSM), del programa ArcGis 10.1. Este modelo, tiene el objetivo de modelar el tiempo de viaje esperado desde un punto o una ubicación deseada, a cualquier otra ubicación dentro de un área de interés, para llevar a cabo este modelado, se pueden utilizar diversos insumos y productos geoespaciales, como pueden ser: una red de caminos, senderos, veredas, modelos de elevación digital, datos de coberturas terrestres, entre otros; junto con diversas técnicas de modelado que están disponibles en los sistemas de información geográfica (Frakes et al., 2015).

Las bases de este modelo suponen que las personas optimizan los medios y los ritmos de sus viajes, para poder llegar a sus respectivos destinos en el menor tiempo posible, es decir, si tienen los medios para poder disminuir el tiempo de traslado, las personas lo harán, ya sea empleando algún vehículo y conduciendo a la máxima velocidad permitida en las carreteras, o bien caminando a la máxima velocidad que le sea posible físicamente (Frakes et al., 2015).

Tomando lo anterior en cuenta, para definir el modelo de accesibilidad se deben de configurar una serie de factores principales que influyen en el tiempo de traslado de una persona, los factores que influyen en gran manera en el tiempo de traslado son: la pendiente del terreno, y el tipo de cobertura de suelo, debido a que existen sitios por los cuales un ser humano no puede cruzar, como ríos, lagos, vegetación densa, barrancos, entre otros, por lo que estos factores sirven para configurar la superficie de impedancia, la cual estará en función del tipo de terreno por el que se vaya a trasladar un individuo (Frakes et al., 2015).

Con esta herramienta se pudo obtener una capa ráster en la cual cada celda representa el valor de tiempo de traslado en minutos. Para poder elaborar este modelo se emplearon 3 insumos necesarios: un modelo de elevación digital, la red de carreteras de Hopelchén y una capa vectorial con los polígonos de distintos usos del suelo (agua, zonas urbanas, bosques y selvas, entre otros), la cual fue empleada como una capa de impedancia para establecer el costo de traslado. Esta herramienta, permite modelar el tiempo de viaje en todo el municipio, con lo cual se elaboró la variable MEAN_ACCES, la cual es de gran importancia, para poder analizar si la cercanía a las carreteras y caminos del municipio propician la ocurrencia de incendios forestales.

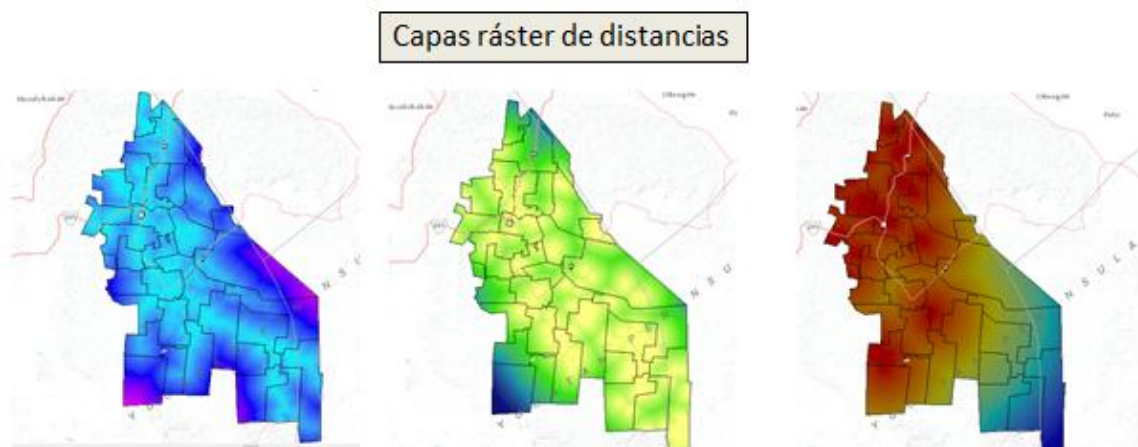
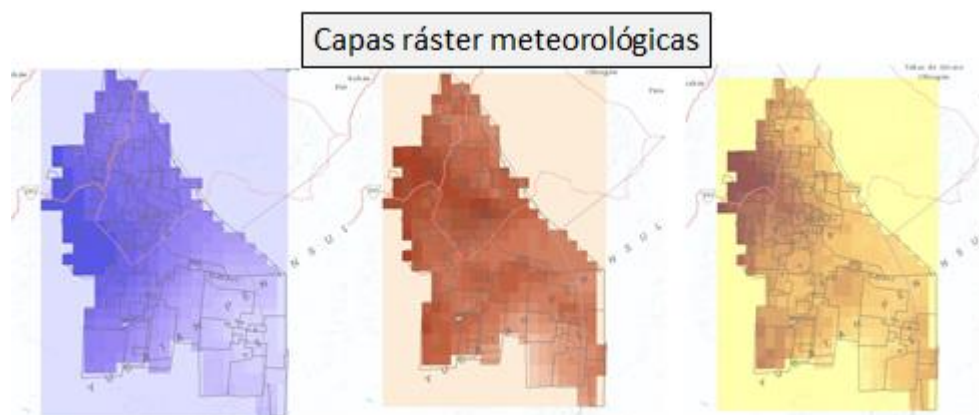


Figura 3.6 a, b y c. Generación de variables antropogénicas

Variables meteorológicas

Para la elaboración de las variables meteorológicas se utilizaron datos ráster mensuales de los años 2011-2018, con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km), la cual fue obtenida del sitio web WorldClim (Figuras 7 a, b y c). Mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica se obtuvieron los promedios de temperatura para dos periodos (2011-2014) y (2015-2020), y para la precipitación se obtuvo el valor acumulado para estos mismos intervalos de tiempo. Una vez que se generaron los rústeres de valores promedios de temperatura y el ráster de precipitación acumulada se procedió a obtener las estadísticas básicas de cada celda de 1 km x 1 km mediante herramientas de análisis espacial de un Sistema de Información Geográfica.



Figuras 3.7 a, b y c. Variables meteorológicas

3.3 Regresión Logística

3.3.1. Razón de probabilidad (*Odds ratio*)

Los odd o razón de momios son una forma para expresar la probabilidad de ocurrencia de un evento cualquiera, se entiende como la razón entre la probabilidad de ocurrencia del evento, entre la probabilidad de que no ocurra (Bland y Altman, 2000; Cerda et al., 2013). Esto puede ser calculado mediante la relación entre el número de veces en las que ocurre el evento y el número de veces que no ocurre (Bland y Altman, 2000). Por lo tanto los odds son una forma de representar la proporción de la ocurrencia de un evento, y los *Odds ratio* es una división entre dos odds, por lo tanto corresponden a una medida de asociación para variables nominales dicotómicas (Aedo et al., 2010). Esta medida permite estimar las relaciones entre variables binarias, además de que nos ofrece intervalos de confianza y con esta medida es posible examinar el efecto de las variables empleando la regresión logística, la forma en la que se lleva a cabo es mediante el cálculo del logaritmo de los *Odds ratio*, mediante la función logística (Aedo et al., 2010).

3.3.2. Función logística

Autores como Cramer (2003), Martinez (2008), entre otros, rastrearon el origen de la función logística, la cual tiene su origen en el siglo XIX, esta función fue creada para poder describir el curso de una proporción P en un tiempo t , fue muy empleada en campos como la química para poder describir el crecimiento de las poblaciones y el curso de las reacciones químicas (Cramer, 2003; Martinez, 2008). Fue el matemático Verhulst quien formalmente denominó la función logística a la siguiente ecuación:

$$P(y) = \frac{\exp^y}{1 + \exp^y} \quad (3.1)$$

donde P denota una función de probabilidad e Y indica una combinación lineal

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (3.2)$$

Definida de la forma anterior, la función logística o logit es una función monótona creciente, la cual se encuentra agotada en el intervalo $[0,1]$, la cual se representa gráficamente como una curva sinusoidal (Cramer, 2003).

3.3.3. Modelo de regresión logística

La regresión logística es un método que permite relacionar de forma funcional una variable binaria con un conjunto de variables explicativas, este método se encuentra dentro del grupo de los modelos de regresión lineal, pero, el dominio de salida de la función se encuentra entre el intervalo $[0,1]$, ya que la respuesta de la regresión, está basada en una distribución de Bernoulli, la cual consiste en una distribución de probabilidad de ceros y unos (Amat, 2016; Hilbe, 2015). El objetivo principal de este método, es estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado ajustando los datos a una curva logística (Park, 2013). Este método es valioso porque las predicciones que se obtienen a partir de un modelo ajustado son probabilidades, que están acotadas dentro de un intervalo de valores de 0 a 1, es decir, la regresión logística predice la

probabilidad de que la variable a modelar presente el valor de 1, dado un conjunto de regresores o variables independientes (Hilbe, 2015).

Existen dos tipos de modelos de regresión logística: los binomiales, y los multinomiales, dependiendo del tipo de problema que se esté planteando modelar se utilizará uno u otro (Park, 2013). Si la variable dependiente es dicotómica, se puede emplear el modelo logístico binario, y cuando la variable dependiente presenta dos o más categorías, se puede emplear el modelo logístico multinomial (Park, 2013).

Una de las razones por las cuales este modelo ha sido tan empleado dentro de los análisis estadísticos relacionados con la predicción, es debido a que proporciona dos características importantes: puede usarse para evaluar la razón de probabilidades de los predictores y para determinar la probabilidad de que ocurra un evento en función de los predictores que hayamos incluido en el modelo (Hilbe, 2015). Para poder estimar los parámetros de modelo logístico, se emplea la función de máxima verosimilitud, esta función permite limitar los valores resultantes en el intervalo 0 a 1, por lo que es posible calcular la probabilidad de pertenencia a una de las dos categorías posibles, si los resultados de la variable, se acercan al valor 1, existe una alta probabilidad de ocurrencia de un evento, y si por el contrario, los resultados se acercan a 0, significa que existe una muy baja probabilidad de ocurrencia del evento (Hilbe, 2015). La regresión logística se define de la siguiente forma:

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad (3.3)$$

donde:

Y es la probabilidad de que ocurra el evento

X_m a X_n Son las variables explicativas o regresores

β_0 Es el intercepto

β_1 a β_n Son los coeficientes de las variables explicativas

Debido a la característica de la variable dependiente que se pretende modelar en este caso (ocurrencia o ausencia de incendio forestal), y debido a que no es posible su ajuste a una distribución normal, se utilizó el modelo de regresión logística para crear un modelo predictivo de incendios forestales, el modelo fue desarrollado en software RStudio, Este método es uno de los más empleados en la elaboración de modelos de riesgo de incendios, así como para determinar los factores que más inciden en su ocurrencia (Eufrasio et al., 2019).

3.3.4. Ajuste del modelo

Como se mencionó anteriormente, la estimación se lleva a cabo mediante el método de máxima verosimilitud, en el procedimiento de este método, se seleccionan las estimaciones de los parámetros que permitan que los resultados que se observan sean lo más verosímiles posibles, la

probabilidad de los resultados obtenidos, dadas las estimaciones de los parámetros son conocidos como verosimilitud (Alderete, 2006).

El modelo que se realiza, debe seguir el principio de parsimonia, es decir, este debe ser el más reducido y que mejor explique los datos, y que tenga una congruencia fiable y pueda ser interpretado (Hair et al., 1999; Ferre, 2014). En la construcción del mismo, deben ser incluidos todos los regresores que presenten una relación univariada con la variable dependiente (Ferre, 2014). Al momento de construir un modelo de regresión, es necesario determinar cuáles variables de las propuestas en la literatura entrarán a nuestro modelo, y cuáles de ellas no deben incluirse, para lo cual existe una diversidad de técnicas que nos permiten seleccionar dichas variables adecuadas (González, 2015). Este proceso de selección de variables, está basado en dos puntos principales; tomar un criterio de selección y elegir una forma en la cual se seleccionen las variables. Se podría pensar en una selección de variables realizando distintas combinaciones de todas las variables que se hayan encontrado en la literatura, no obstante, esto sería una tarea impráctica, por lo que es necesario elegir un criterio que permita simplificar la tarea y un procedimiento que optimice el tiempo de selección (Gualdrón, 2006).

Se han desarrollado distintas estrategias para la selección de variables, y se han clasificado en tres grupos: exponenciales, secuenciales y estocásticas (Gualdrón, 2006). Para el caso de este trabajo, al contar con pocas variables se decidió emplear el método secuencial, el cual ingresa variables de forma secuencial al modelo y se termina cuando se cumple o satisface una condición (González, 2015).

La técnica de selección de variables hacia adelante (Forward) comienza con un modelo sin ninguna de las variables predictoras, solamente contempla el intercepto, posteriormente agrega secuencialmente la variable que sea más significativa, y termina el proceso cuando se satisface una condición (González, 2015). En este estudio se emplea esta técnica para la construcción de los modelos.

En la técnica pasos hacia atrás (backward) comienza de un modelo que incluye todos los regresores, y va eliminando de forma secuencial las variables que considera menos significativas (González, 2015).

En la técnica hacia delante y hacia atrás (stepwise) se combinan las dos anteriores, se parte de un modelo sencillo y se van introduciendo paso a paso nuevas variables y se evalúa si todas estas variables deben permanecer en el modelo (González, 2015).

Se realizaron pruebas con las tres técnicas de selección de variables y al observar que con las tres se construían modelos similares, se optó por elegir la técnica de selección de variables hacia delante (Forward), ya que este modelo presentó un menor criterio de akaike.

Como se mencionó con anterioridad, el modelo fue construido empleando la técnica forward, para la creación de la variable dependiente se emplearon los datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). de ubicaciones de incendios forestales en un periodo de 10 años (2011-

2020). La variable fue codificada como 1 ocurrencia de incendio y 0 ausencia de incendio y para el ajuste del mismo se utilizaron las siguientes variables independientes (Tabla 3):

Tabla 3.3. Variables independientes

Variable	Clave	Unidad de medición
Modelo de accesibilidad	MEAN_ACCES	minutos
Distancia a pastizales	MEAN_PAST	metros
Distancia a zonas de agricultura de temporal	MEAN_TEMP	metros
Distancia a zonas de agricultura de riego	MEAN_RIEGO	metros
Temperatura máxima	MEAN_TMAX	°C
Temperatura mínima	MEAN_TMIN	°C
Temperatura media	MEAN_TMED	°C
Precipitación	MEAN_PREC	mm

3.3.5. Supuestos del modelo

Como el modelo de regresión lineal, la regresión logística debe cumplir una serie de supuestos con los que se evite que los resultados que se obtengan puedan ser espurios o dudosos, dichos supuestos están relacionados con la construcción del valor teórico o a la función discriminante, es decir, debe de cumplir un supuesto de linealidad, multicolinealidad y de independencia de los errores (Hair et al., 1999; Ferre, 2015).

El principio de linealidad básicamente se refiere a que la variable dependiente presenta una relación lineal con los regresores, pero, debido a que en regresión logística la variable a modelar es categórica este supuesto se viola, debido a esto se debe emplear el logit, de esta forma el supuesto de linealidad se debe cumplir para cada regresor y el logaritmo de la variable dependiente (Ferre, 2015).

Otro de los supuestos que deben cumplirse al hacer un modelo de regresión, es evitar que exista multicolinealidad en las variables independientes, esta situación se da cuando alguno de los regresores es muy bien explicado por cualquier otro regresor, lo que hace que dicho regresor no aporte información importante al modelo (Hair et al., 1999). Para poder identificar esta situación, existen varias pruebas estadísticas, una de las más comunes y la que se emplea en este trabajo es el Factor de Inflación de la Varianza (VIF), básicamente, estas métricas analizan el grado de relación que tiene cada uno de los regresores con todos los demás, con esto se obtiene información acerca de que tanto una variable independiente explica otra, generalmente se menciona que si una variable presenta valores VIF superiores a 7, ya existe multicolinealidad, por lo que se deben seguir ciertos métodos para poder evitar este problema (Hair et al., 1999; Ferre, 2015).

3.3.6. Bondad de ajuste del modelo

Una vez que se construye el modelo de regresión logística, es necesario cerciorarse que tan bueno fue el ajuste de los resultados observados con los que predice el modelo, para lo cual se pueden

emplear una serie de métodos estadísticos y pruebas que nos permiten comprobar esta fase de la creación del modelo (Iglesias, 2013). Para explicar el nivel de ajuste, en la regresión lineal, se emplea la prueba R^2 , la cual evalúa el grado de ajuste entre los datos observados y los predichos por el modelo, pero en la regresión logística se emplea la métrica *log-likelihood*, o logaritmo de la razón de la verosimilitud, la cual está basada en la suma de los pronósticos realizados y las observaciones (Field et al., 2012),

Otra de las métricas que se emplean para la evaluación de la bondad de ajuste es la devianza, la cual está definida como el doble logaritmo de la razón de verosimilitud (Field et al., 2012). La devianza se define de la siguiente forma:

$$\text{Devianza} = -2 \times \text{Log-likelihood}$$

Field et al. (2012) sugiere que en lugar de usar el logaritmo de máxima verosimilitud para evaluar la bondad de ajuste del modelo, se utilice la devianza, ya que presenta una distribución Chi cuadrada, lo que facilita el cálculo de la significancia. La forma en la que este indicador realiza la evaluación, es por medio de la comparación de los valores predichos y los valores observados en dos momentos: el primero, evaluando el modelo sin variables predictoras, únicamente tomando el intercepto, a este se le conoce como modelo nulo. El segundo momento es evaluando el modelo con sus variables predictoras. De esta forma se puede restar la devianza del modelo que incluye todas sus variables predictoras, de la devianza del modelo nulo, la cual es conocida como *ratio-likelihood*, la devianza debe disminuir considerablemente (Field et al., 2012).

3.3.7 Validación del modelo

3.3.7.1. Validación simple

Una vez que se construyó el modelo adecuado, es necesario validarlo, es decir, se tiene que probar si el modelo es capaz de funcionar igual que con los datos con los que se entrenó (Hilbe, 2015; Fernández, 2018). Esta validación tiene la intención de evaluar si el modelo tiene la capacidad de predecir los valores de la variable respuesta en otro conjunto de datos (López Roldán et al., 2016; Fernández, 2018). Existen diferentes métodos de validación, el más sencillo es la partición de datos o división de datos, en la cual se dividen los datos de forma aleatoria en una proporción que por lo general es de 70% datos para el entrenamiento del modelo, y 30% datos para su validación (Fernández, 2018). Fernández (2018), menciona que este método presenta una serie de desventajas, pues al emplear solo una parte de los datos para la creación del modelo y las distintas posibles divisiones que se realizan en la muestra original de datos pueden conducir a diferentes resultados. Este método no se recomienda cuando el tamaño de la muestra es muy pequeño, pues autores como Steyerberg demostraron que cuando las muestras son muy pequeñas los resultados de la validación no resultan ser muy confiables, para el caso de esta investigación, al contar con una muestra mayor a las 100 observaciones, se emplea como un primer método de validación este procedimiento.

3.3.7.2 Validación cruzada.

Otro de los métodos que existen, es la validación cruzada, la cual es una extensión de la validación simple (Refaeilzadeh et al., 2009; Fernández, 2018). Una de las ventajas que ofrece este método, es que permite reducir el sesgo en la evaluación del rendimiento del modelo así como en su variabilidad (Fernández, 2018). Básicamente la forma en la que procede es similar a la validación simple, comienza dividiendo los datos en dos grupos de igual tamaño, en el proceso, el modelo se crea con un grupo de datos y se valida con otro, en este caso, a diferencia de la validación simple, el modelo se crea utilizando todos los datos, y, después valida el modelo cruzando los datos de entrenamiento y validación. Con este proceso, se asegura que cada dato sea validado una vez, y la medida de rendimiento que se reporta es el promedio de las k medidas calculadas (Fernández, 2018). En esta investigación, con la finalidad de validar correctamente el modelo creado, se realizará también un proceso de validación cruzada.

3.3.7.3 Curva Característica del Receptor (Curva ROC)

Para poder realizar una representación gráfica del rendimiento del modelo, se empleó el método de la Curva Característica del Receptor, este gráfico nos permite evaluar el nivel de clasificación de un clasificador binario (Dominguez y González, 2002). Básicamente el resultado que nos ofrece este gráfico, es la proporción de verdaderos positivos, los cuales son denominados Sensibilidad, frente a la razón de falsos positivos, los cuales son denominados Especificidad. Si en el gráfico resultante, la línea que obtenemos se acerca más a los valores de 1 en el eje de la sensibilidad (esquina superior izquierda), significa que el modelo que se obtuvo, presentó un excelente resultado (Figura 8), es decir, el modelo que se creó fue capaz de clasificar correctamente el 100% de resultados positivos (Castro, 2020). Con el análisis del gráfico, es posible seleccionar el modelo que haya tenido resultados más óptimos y así poder descartar los modelos que hayan tenido un rendimiento inferior (Castro, 2020).

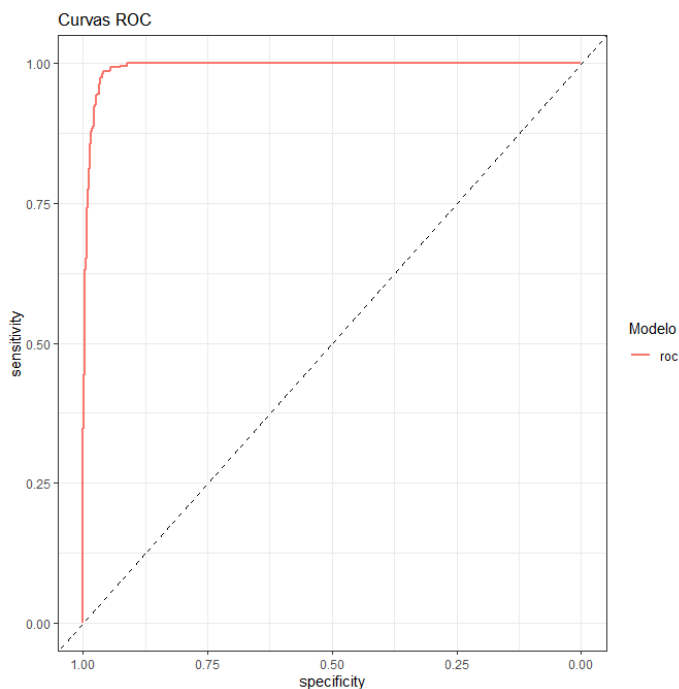


Figura 3.8. Curva ROC.

3.3.7.4 Matrices de Confusión

Para poder evaluar la exactitud predictiva del modelo, es posible la creación de matrices que indique si cada observación fue clasificada correctamente, estas matrices básicamente comparan la información verdadera, con el modelo que resultó de la regresión logística (Hair et al., 1999; Castro, 2020). En las columnas de la matriz se ubican los datos que el modelo pronóstico, y en las filas se encuentran los datos reales, y los datos que se localizan en la diagonal principal son los datos que fueron correctamente clasificados en la regresión, los datos que se localizan fuera de la diagonal corresponden a datos que fueron mal clasificados (Hair et al., 1999; Castro, 2020). La matriz da como resultado una serie de métricas con las cuales podemos determinar la eficiencia del modelo, la medida principal es la precisión global o *accuracy*, la cual nos indica la proporción de predicciones que fueron correctamente clasificadas, es la razón entre los casos bien clasificados, es decir, los verdaderos positivos y verdaderos negativos entre el número total de observaciones (Hair et al., 1999). Otra de las medidas de importancia, es la precisión, la cual indica la cercanía que tuvo la predicción con respecto al valor verdadero, esta métrica se obtiene al dividir el número de casos positivos bien clasificados por el modelo de regresión, entre el total de predicciones positivas (López-Roldán, Fachelli, 2016; Barrios, 2019). La tercera métrica que ofrece la matriz de confusión, es la Sensibilidad, la cual es el porcentaje de observaciones que corresponden a un valor positivo y fueron clasificadas correctamente dentro de esa categoría, o bien verdaderos positivos. La cuarta métrica es la Especificidad, la cual es la tasa de las observaciones negativas que fueron clasificadas en esta categoría, o verdaderos negativos (Barrios, 2019).

Capítulo 4. Resultados

4.1 Modelo para la temporalidad 2011-2014

Como se mencionó en la metodología, para la creación de los modelos primero se dividieron los datos en dos temporalidades (2011-2014) y (2015-2020). Con la intención de evitar que los cambios en las dimensiones de las fronteras agropecuarias provocaran estimaciones sesgadas. Además se empleó el método paso a paso hacia adelante para la creación de diversos modelos. En la siguiente tabla se observan los modelos generados con el método Forward (Tabla 4).

Tabla 4.1. Modelos creados para el primer intervalo de tiempo (2011-2014).

Variables incluidas en el modelo	Criterio de Akaike
Modelo nulo (Solo con intercepto)	1477.72
Modelo con una variable: MEAN_RIEGO	907.78
Modelo con dos variables: MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO	891.73
Modelo con tres variables: MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO y MEAN_ACCES	889.16
Modelo con cuatro variables: MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO, MEAN_ACCES y MEAN_PREC	889.13
Modelo con cinco variables: MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO, MEAN_ACCES, MEAN_PREC y MEAN_TMAX	445.61
Modelo con seis variables: MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO, MEAN_ACCES, MEAN_PREC, MEAN_TMAX y MEAN_TMIN	266,81
Modelo con siete variables: MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO, MEAN_ACCES, MEAN_PREC, MEAN_TMAX, MEAN_TMIN	235.84

4.1.2. Modelo con variables meteorológicas.

Para la primera temporalidad (2011-2014) el algoritmo forward generó 6 modelos, de los cuales el que menor criterio de Akaike tuvo fue el que integró 7 de las 9 variables que se construyeron (Tabla 5). Este modelo presentó un excelente ajuste a los datos, pues en la curva ROC se obtuvo un valor de 0.9927 (Figura 9) y una significancia menor al 0.05 (Tabla 5). Por lo que se procedió a continuar con las pruebas de linealidad, multicolinealidad y de validación para constatar que el modelo estuviera bien calibrado. En dichas pruebas se pudo corroborar que este modelo tenía un excelente poder predictivo, no obstante, se verificó que tres variables presentan multicolinealidad mediante el valor de Factor de Inflación de la Varianza, Con las pruebas de multicolinealidad y de linealidad se verificó que las variables que ocasionaron el problema de la multicolinealidad, fueron las variables meteorológicas, por lo que se tuvieron que retirar del modelo, lo que disminuyó la capacidad de predicción del modelo de excelente a aceptable.

Tabla 4.2. Poder de predicción del modelo con variables atmosféricas.

Positivos observados	Negativos Observados	Positivos predichos	Negativos predichos	AUC	Devianza	Significancia	R2 de McFadden
164	307	165	306	0.992710	1225.82	0.000	0.8479

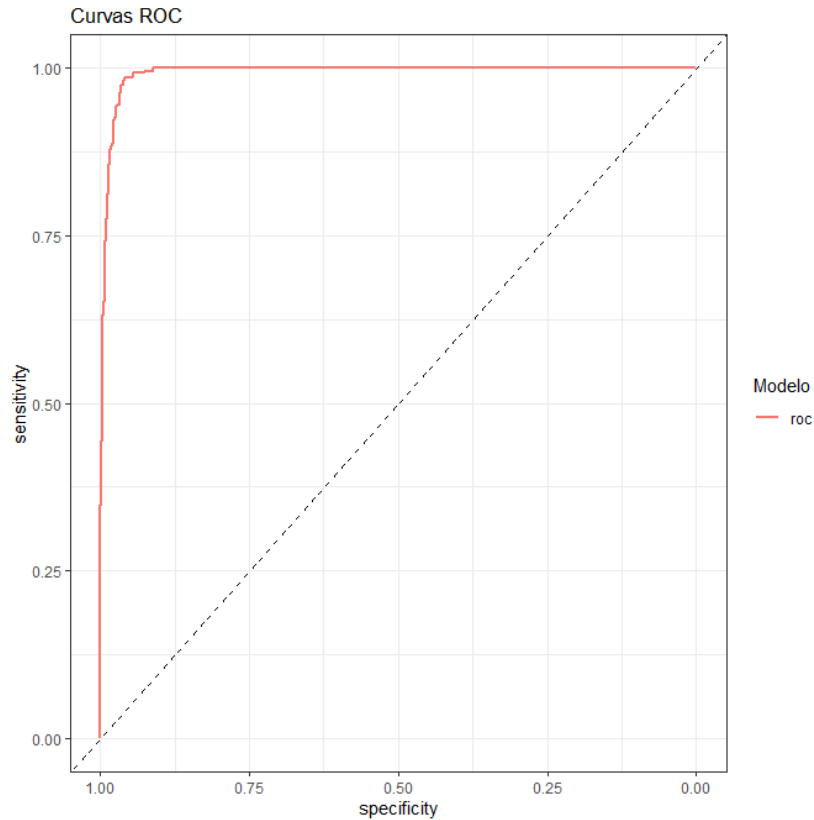


Figura 4.1. Área bajo la curva del modelo con variables meteorológicas.

Al realizar la validación simple de este modelo con el conjunto de datos test, se obtuvieron las métricas de la matriz de confusión (Tabla 6), con las que se pudo observar que la precisión global era casi perfecta, la tasa de error de clasificación fue bastante baja y la sensibilidad del modelo, es decir, la capacidad que tiene para predecir los valores positivos ó en este caso los incendios forestales, fue bastante alta. Además, se pudo corroborar que los errores de clasificación fueron bastante bajos.

Tabla 4.3. Métricas de la matriz de confusión para el modelo con variables atmosféricas.

Precisión Global	Tasa de error	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	F1-Score	Balanced accuracy
0.955414	0.04458599	0.9390244	0.9641694	0.9333333	0.9361702	0.9515969
<i>True positive</i>	<i>True negative</i>	<i>False positive</i>	<i>False Negative</i>	<i>Cutoff</i>		
154	296	11	10	0.457896		

4.1.3. Modelo sin variables meteorológicas.

Como se mencionó anteriormente, debido a los problemas de multicolinealidad, fue necesario retirar las variables meteorológicas y correr el modelo sin estas variables por lo que el modelo sólo incluyó dos variables, en algunas pruebas se dejó sólo una variable meteorológica obteniendo un área bajo la curva ROC alta, pero los problemas de multicolinealidad permanecían. El modelo quedó definido de la siguiente forma:

$$MEAN_RIEGO, MEAN_TEMPO$$

Al hacer este procedimiento, la sensibilidad de modelo se vio un tanto afectada, ya que clasificó algunas de las observaciones erróneamente (Tabla 7), el área bajo la curva disminuyó a 0.86 (Figura 10). En la figura se puede apreciar que al retirar las variables atmosféricas del modelo disminuye la sensibilidad y la especificidad, no obstante, al obtener el valor de inflación de la varianza se pudo verificar que las variables que se mantuvieron en el modelo no presentaron problemas de multicolinealidad. Además el valor obtenido en la prueba de R2 de McFadden, muestran que el modelo cuenta aún con una buena capacidad predictiva.

Tabla 4.4. Poder predictivo del modelo sin variables meteorológicas.

Positivos observados	Negativos Observados	Positivos predichos	Negativos predichos	AUC	Devianza	Significancia	R2 de McFadden
164	307	194	277	0.86224859	564.5619	0.000	0.3905059

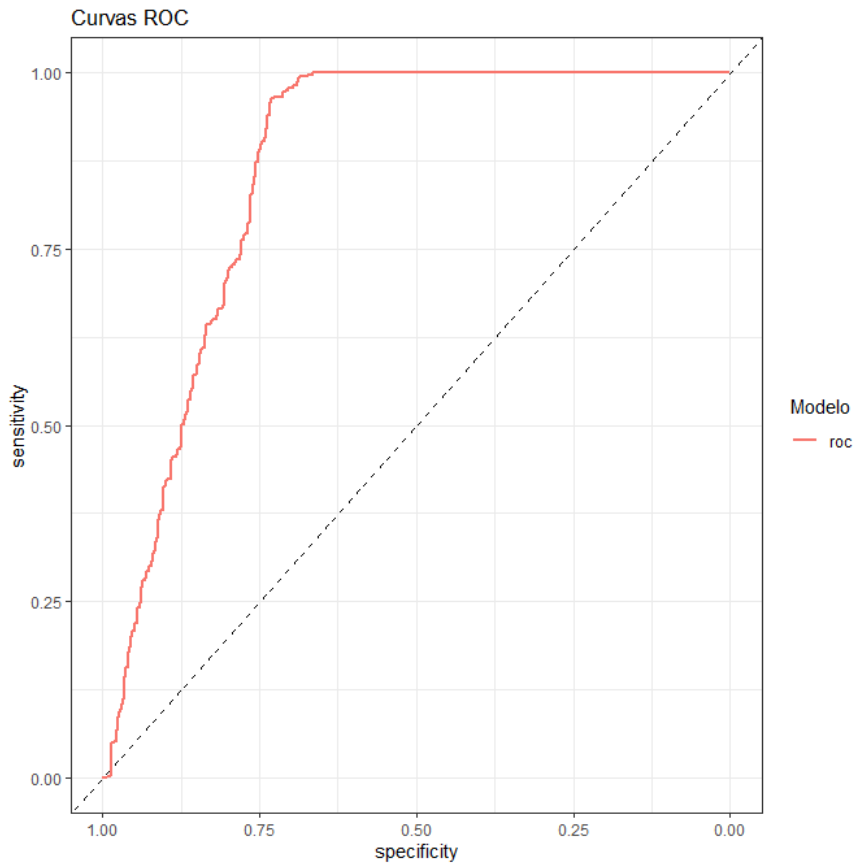


Figura 4.2. Área bajo la curva del modelo sin variables meteorológicas.

Una vez realizada la validación simple del modelo con el conjunto de datos test, se pudo verificar que la precisión global del modelo disminuye en comparación con el modelo anterior (Tabla 8), no obstante se puede apreciar que el modelo aún permanece en una categoría aceptable en la predicción, pues la métrica de *Balanced accuracy* está cerca de 0.8, y se puede observar que la tasa de error del nuevo modelo no es muy elevada. También en la matriz de confusión se aprecia que aunque baja la precisión global del modelo, aún mantiene un buen desempeño en la clasificación.

Tabla 4.5. Métricas de la validación simple para el modelo sin variables meteorológicas.

Precisión Global	Tasa de error	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	F1-Score	<i>Balanced accuracy</i>
0.7834395	0.2165605	0.8192771	0.7639344	0.6538462	0.7272727	0.7916058
<i>True positive</i>	<i>True negative</i>	<i>False positive</i>	<i>False Negative</i>	<i>Cutoff</i>		
136	233	72	30	0.3577579		

En cuanto a la validación cruzada para el modelo de esta temporalidad, se dividieron los datos en 10 distintos grupos y se utilizaron 9 grupos para el desarrollo del modelo, mientras que uno fue empleado para realizar la validación, se repitió el procedimiento hasta que cada grupo fue utilizado una vez como grupo de validación, este procedimiento se llevó a cabo para estimar el desempeño del modelo desarrollado, y después se obtuvo el promedio de los 10 grupos para estimar su rendimiento. Se pudo verificar que de los diez grupos hechos para entrenar el modelo en la validación cruzada, este presentó un rendimiento aceptable (Tabla 9).

Tabla 4.6. Grupos de validación cruzada para el modelo sin variables meteorológicas

Grupo de entrenamiento <i>Cross Validation</i>	<i>Accuracy</i>
Grupo 1	0.825
Grupo 2	0.822
Grupo 3	0.869
Grupo 4	0.825
Grupo 5	0.831
Grupo 6	0.892
Grupo 7	0.828
Grupo 8	0.854
Grupo 9	0.831
Grupo 10	0.840
Promedio	0.8416177

Una vez obtenida la ecuación de regresión logística y por lo tanto los coeficientes, se procedió a espacializar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el municipio de Hopelchén mediante el uso de la calculadora de ráster del software QGis, en la siguiente tabla se muestran los intervalos de probabilidades obtenidos, y la clasificación que se realizó para el índice de riesgo de incendio (Tabla 10). La ecuación para calcular la probabilidad de ocurrencia quedó definida de la siguiente forma:

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-(\dots - \dots (MEAN_RIEGO) - \dots (MEAN_TEMPO))}} \quad (4.1)$$

Tabla 4.7. Intervalos de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Símbolo	Intervalo de probabilidad	Etiqueta
	0.00000 - 0.298123	Muy bajo
	0.298123 - 0.345316	Bajo
	0.345316 - 0.581278	Medio
	0.581278 - 0.788925	Alto
	0.788925 - 0.899828	Muy alto

El mapa de riesgo fue clasificado en 5 categorías empleando quintiles (Figura 11). Al hacer la primera inspección de los resultados obtenidos, se puede apreciar que ambas variables son estadísticamente significativas, pues la medida de significancia es menor que 0.05 y el estadístico z es menor que -1.96, además la relación que estas dos variables independientes tienen con respecto a la dependiente es inversa, es decir; a medida que incrementa la distancia de las zonas de agricultura de riego y de temporal, disminuye la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Otra de las medidas de importancia en un modelo de regresión logística, son los *Odds ratio* (Tabla 11), los cuales nos dicen que son la razón entre la probabilidad de ocurrencia del evento, y la probabilidad de no ocurrencia. En el resultado que regresa el software Rstudio, estos vienen en la columna etiquetada como *Exp* y es básicamente la exponencial del valor del coeficiente obtenido, esta medida es de gran importancia, puesto que nos indica el cambio en los odds que resulta de un cambio en una unidad en el predictor o en la variable independiente. El primer aspecto que se observa, es que el valor de los *Odds ratio*, son menores que 1, por lo tanto nos están indicando que los *odds* o las probabilidades de la variable dependiente Y, se disminuye en cada incremento de las variables explicativas, lo cual tiene completamente sentido, puesto que a medida que un punto en particular se encuentra más lejos de una zona de agricultura de temporal o de riego (variables explicativas), tendrá una menor probabilidad de que presente un incendio forestal.

Tabla 4.8. Coeficientes obtenidos del modelo para la temporalidad 2011-2014.

Variable	Coefficiente	Error estándar	Valor z	Significancia	Exp
Intercepto	1.6093	0.1455	11.063	2×10^{-16}	4.810914
MEAN_RIEGO	-16.4592	1.4554	-11.309	2×10^{-16}	5.417024×10^{-7}
MEAN_TEMPO	-3.5899	0.9517	-3.772	0.000162	9.823339×10^{-3}

Al dejar únicamente estas dos variables en el modelo, es cierto que se reduce su capacidad de predicción, no obstante, se sigue el principio de parsimonia, el cual señala que ante dos posibles

explicaciones, se debe optar por la explicación más sencilla, en este caso sería optar por el modelo más sencillo, además se evitaron resultados espurios por problemas de multicolinealidad. Una vez realizado este análisis, se procedió a realizar el mapa de riesgo para la primera temporalidad analizada. En el mapa podemos observar que el mayor riesgo de ocurrencia de incendios forestales, es en el norte del municipio, principalmente en los límites con los municipios de Hecelchakán, Tenabo y Campeche, y hacia el oeste y suroeste, en las fronteras con los municipios de Campeche y Champotón. Mientras que el riesgo más bajo de ocurrencia de incendio forestal es en el sur y sureste, hacia la frontera con el municipio de Calakmul.

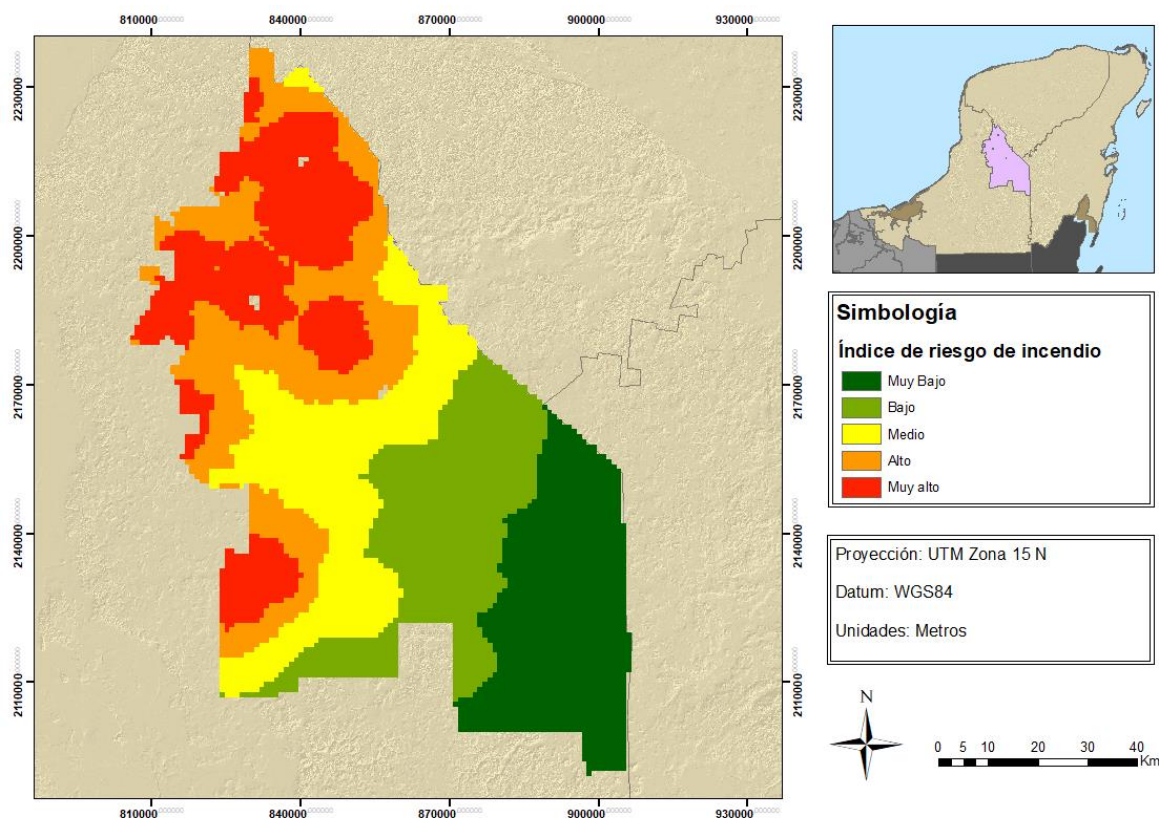


Figura 4.3. Probabilidad de ocurrencia de incendios en Hopelchén, Campeche 2011-2014.

4. 2. Modelo para la temporalidad 2015-2020

4.2.1. Modelos creados

Con el método forward se realizaron 8 modelos de los cuales el que incluyó 7 de las 8 variables, fue el que tuvo un criterio de akaike más bajo, por lo que fue el seleccionado para realizar las primeras pruebas y es el modelo que se expone más adelante, en la siguiente tabla se reportan todos los valores de akaike que se obtuvieron con las distintas combinaciones que el método forward arrojó (Tabla 12).

Tabla 4.9. Modelos creados con método forward para la temporalidad 2015-2020.

Variables incluidas	Criterio de Akaike
Modelo nulo (Solo intercepto)	6077.17
Modelo con una variable: MEAN_PREC_ACUM	3098.92
Modelo con dos variables: MEAN_PREC_ACUM + MEAN_PAST	2439.18
Modelo con tres variables: MEAN_PREC_ACUM + MEAN_PAST + MEAN_RIEGO	2263.22
Modelo con cuatro variables: MEAN_PREC_ACUM + MEAN_PAST + MEAN_RIEGO + MEAN_TMAX	2163.69
Modelo con cinco variables: MEAN_PREC_ACUM + MEAN_PAST + MEAN_RIEGO + MEAN_TMAX + MEAN_MIN	951.15
Modelo con seis variables: MEAN_PREC_ACUM + MEAN_PAST + MEAN_RIEGO + MEAN_TMAX + MEAN_MIN + MEAN_ACCES	793.74
Modelo con siete variables: MEAN_PREC_ACUM + MEAN_PAST + MEAN_RIEGO + MEAN_TMAX + MEAN_MIN + MEAN_ACCES + MEAN_TEMPO	740.91

4.2.2. Modelo con variables meteorológicas

Para el intervalo de tiempo de 2015 al 2020, sucedió la misma situación, al incluir siete de las 8 variables en el modelo, el poder predictivo era casi del 100%, como se puede apreciar en la siguiente (Tabla 13), el modelo es capaz de clasificar de forma correcta casi la totalidad de observaciones reales y presenta una significancia menor a 0.05, por lo que el modelo es estadísticamente significativo, no obstante, autores como Hilbe (2015), mencionan que en ciertas ocasiones cuando los modelos llegan a valores en la curva ROC muy elevados (>0.9), se puede correr el riesgo de tener un sobreajuste, por lo que es necesario tener precaución.

Tabla 4.10. Poder predictivo de modelo con variables atmosféricas.

Positivos observados	Negativos Observados	Positivos predichos	Negativos predichos	AUC	Devianza	Significancia	R2 de McFadden
748	1173	744	1177	0.9960876	5369.715	0.000	0.883472

Como se vio anteriormente, la curva ROC nos proporciona dos medidas importantes: la sensibilidad (probabilidad de clasificar correctamente las observaciones positivas) y la

especificidad (probabilidad de clasificar correctamente las observaciones negativas). Como se puede observar en la curva ROC (Figura 12), el modelo con todas las variables incluidas, tiene un poder predictivo bastante elevado, Dado que es posible observar que casi el 100% tanto de sensibilidad como de especificidad pasa por el extremo superior izquierdo, si ocurriera que la curva se encontrara cercana a la diagonal punteada, significa que el modelo carece completamente de un poder de predicción. Esta alta capacidad predictiva se representa por el área bajo la curva, que para el primer modelo llegó casi al 100%. No obstante, al revisar el estadístico R^2 de McFadden, se puede notar una cuestión peculiar, presenta valores cercanos a uno, por lo que el modelo que incluye todas las variables si pueda presentar un sobre ajuste, puesto que el mismo McFadden (1979), menciona que los valores que indican un buen ajuste a los datos se encuentra dentro del intervalo 0.2-0.4.

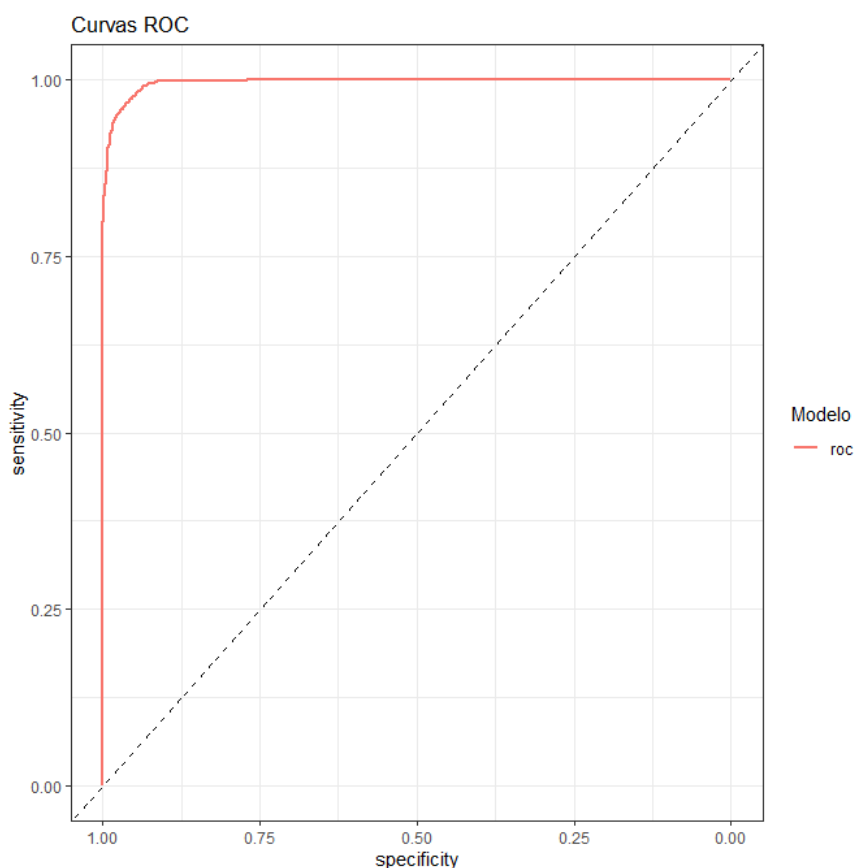


Figura 4.4. AUC del modelo con variables meteorológicas.

De igual forma, al llevar a cabo la validación simple de este modelo se pudo observar que la precisión global o *accuracy* del modelo era muy elevada, esta medida indica la cantidad total de aciertos que tuvo el modelo, tanto si fueron incendios forestales, como si no lo fueron. La tasa de error de clasificación fue muy baja y la medida de *balanced accuracy* resultó muy alta, lo que nos indica que la capacidad de predicción de este modelo es muy eficaz, puesto que fue capaz de clasificar las observaciones que realmente correspondían a incendios forestales casi en un 100%.

También podemos ver que la medida de precisión nos indica casi un 96%, esto básicamente es la probabilidad que tiene una observación positiva de serlo realmente, lo que es posible observar en las siguientes tablas (Tabla 14). Además las medidas de sensibilidad, que es el porcentaje de verdaderos incendios correctamente predichos por el modelo y la especificidad, que son el porcentaje de las observaciones que no corresponden a incendios forestales, presentan valores cercanos al 100% también.

Tabla 4.11. Métricas de validación simple

Precisión Global	Tasa de error	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	F1-Score	Balanced accuracy
0.9646018	0.0353982	0.9518717	0.9727195	0.9569892	0.9544236	0.9622956
<i>True positive</i>	<i>True negative</i>	<i>False positive</i>	<i>False Negative</i>	<i>Cutoff</i>		
712	1141	32	36	0.52		

Como se mencionó en el apartado de metodología, la validación cruzada consiste en la segmentación del conjunto de datos en, k grupos de tamaño similar, y se utilizan $k-1$. Al llevar a cabo la validación cruzada, en este caso k fue igual a diez grupos, por lo que se emplearon 9 grupos para el desarrollo del modelo y uno para su validación, este procedimiento fue repetido 10 veces, hasta que cada subgrupo fue empleado como un grupo de validación (Tabla 15).

Tabla 4,12. Validación cruzada.

Grupo de entrenamiento	Cross Validation	Accuracy
Grupo 1		0.807
Grupo 2		0.830
Grupo 3		0.817
Grupo 4		0.810
Grupo 5		0.830
Grupo 6		0.813
Grupo 7		0.828
Grupo 8		0.817
Grupo 9		0.819
Grupo 10		0.828
Promedio		0.8198212

Al llevar a cabo la revisión de los coeficientes (Tabla 16) de este primer modelo se analizó la relación que cada una de las variables explicativas presentaban con respecto a la variable respuesta, y se puede notar que las variables de distancia a zonas agrícolas presentan una relación negativa, lo que tiene bastante sentido, como se mencionó anteriormente. Pero la variable de distancia a zonas de pastizal presentó una relación positiva, lo que nos indica que a medida que

aumenta la distancia a zonas de pastizales, la probabilidad de ocurrencia también aumenta, es decir, entre más lejos se localice un punto de una zona de pastizales, tiene una mayor probabilidad de presentar un incendio forestal. Otra de las variables explicativas que presentaron una relación positiva con la variable respuesta, fue el modelo de accesibilidad, para este regresor, la relación también nos indica que entre mayor sea la distancia a las localidades, mayor probabilidad de ocurrencia de incendios. Así mismo, la variable precipitación y la temperatura mínima, presentaron signos positivos, pero los valores de los coeficientes eran muy altos, aún llevando a cabo un escalamiento de las variables, por lo que se revisó su valor de inflación de la varianza y se pudo constatar que estas variables presentaban multicolinealidad, por lo que tuvieron que ser retiradas del modelo.

Tabla 4.13. Coeficientes del modelo con variables meteorológicas.

Variable	Coefficiente	Error estándar	Valor z	Significancia	Exp
Intercepto	-8.5133	0.6937	-12.272	2×10^{-16}	2.007726e-04
MEAN_PREC	11.7863	1.1307	10.424	2×10^{-16}	1.314407e+05
MEAN_PAST	3.2277	0.2310	13.975	2×10^{-16}	2.522216e+01
MEAN_RIEGO	-4.6343	0.4963	-9.338	2×10^{-16}	9.713068e-03
MEAN_TMAX	-126.4631	6.9737	-18.134	2×10^{-16}	1.196142e-55
MEAN_TMIN	124.3340	6.8638	18.115	2×10^{-16}	9.944554e+53
MEAN_ACCES	1.6114	0.1482	10.871	2×10^{-16}	5.009647
MEAN_TEMPO	-2.0141	0.2739	-7.353	1.94e-13	1.334361e-01

4.2.3. Modelo sin variables meteorológicas

Cuando se eliminaron las variables meteorológicas del modelo, se evitó el problema de multicolinealidad, y la capacidad de predicción del modelo llegó hasta un 84% (AUC de la tabla 17). Sin embargo la medida de R^2 de McFadden, se mantuvo en los intervalos que el autor especifica como adecuados para un modelo que presenta una buena capacidad de predicción (McFadden, 1979).

Además, la significancia estadística del modelo, permanece por debajo de 0.05, y la devianza del modelo fue menor que en la del modelo nulo, por lo que se puede decir que al incluir las variables seleccionadas, se está prediciendo la variable respuesta con mejor precisión de lo que sucedería únicamente con el modelo que solo cuenta con el intercepto.

Tabla 4.14. Poder de predicción para el modelo sin variables atmosféricas.

Positivos observados	Negativos Observados	Positivos predichos	Negativos predichos	AUC	Devianza	Significancia	R2 de McFadden
748	1173	1001	920	0.846226	2045.762	0.000	0.3365865

A diferencia del modelo anterior, éste presenta una curva AUC menor (Figura 13), sin embargo aún está dentro de los límites que marcan un modelo con una buena capacidad de predicción

(Valores superiores al 65% de AUC), si esta curva presentará un valor inferior a 0.65, el modelo sería incapaz de clasificar las observaciones, es decir; no podría distinguir si una observación pertenece al grupo de eventos que corresponden a incendios forestales o si pertenece al grupo que no son incendios forestales, por lo que el modelo sería incapaz de predecir.

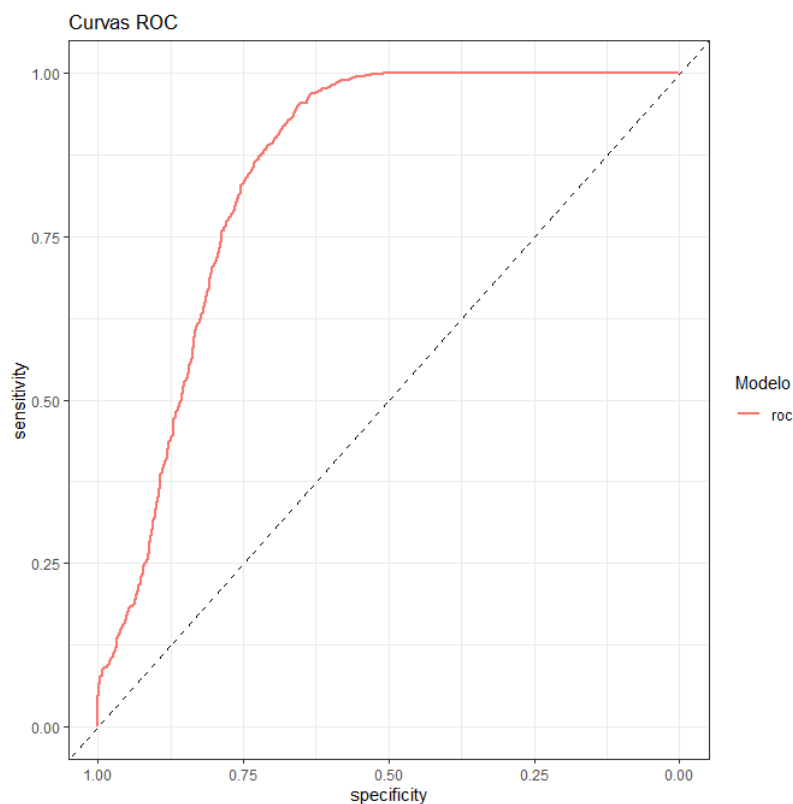


Figura 4.5. AUC del modelo sin variables atmosféricas

En cuanto a las métricas que nos ofrece la validación simple, se puede apreciar que la precisión global (la totalidad de observaciones clasificadas correctamente) disminuyó considerablemente con respecto al modelo que incluye las variables meteorológicas, así mismo la tasa de error aumentó a un 0.22, y las medidas de *Balanced Accuracy* y *F1 Score* disminuyeron. No obstante la medida de sensibilidad casi no disminuyó, pues presentó un valor de 0.88, lo que nos indica que el modelo sigue identificando correctamente las observaciones que corresponden a incendios forestales (Tabla 18).

Tabla 4.15. Métricas de validación simple

Precisión Global	Tasa de error	Sensibilidad	Especificidad	Precisión	F1-Score	Balanced accuracy
0.7787611	0.2212389	0.8850267	0.7109974	0.6613387	0.757004	0.7980121
<i>True positive</i>	<i>True negative</i>	<i>False positive</i>	<i>False Negative</i>	<i>Cutoff</i>		
662	834	339	86	0.4362735		

En los resultados de la validación cruzada, se puede constatar que en los diez grupos formados, se presentaron valores de precisión global aceptables, todos ellos mayores al 0.8, lo que indica que el modelo que empleó las variables antes mencionadas, presenta un buen rendimiento. (Tabla 19). Como se puede apreciar en la tabla, todos los grupos que se generaron, obtuvieron un valor de precisión aceptable, por lo que podemos decir que el modelo desarrollado presentó una capacidad de predicción aceptable.

Tabla 4.16. Validación cruzada para el modelo sin variables atmosféricas.

Grupo de entrenamiento <i>Cross Validation</i>	<i>Accuracy</i>
Grupo 1	0.814
Grupo 2	0.842
Grupo 3	0.820
Grupo 4	0.804
Grupo 5	0.825
Grupo 6	0.826
Grupo 7	0.815
Grupo 8	0.811
Grupo 9	0.820
Grupo 10	0.819
Promedio	0.8195868

Los resultados de los coeficientes obtenidos (Tabla 20), podemos apreciar que las variables distancia a zonas de agricultura de temporal y de agricultura de riego, presentan una relación negativa con la variable respuesta. Lo que nos indica que a medida que se incrementa la distancia a estos lugares provoca una disminución en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. Y al analizar los *Odds ratio*, podemos apreciar que los valores son inferiores a 1, por lo que podemos decir que los regresores efectivamente presentan una relación con la variable respuesta. Y al obtener el inverso de los *Odds ratio*, se puede asegurar que por cada unidad que incrementa en el eje x (distancia a las zonas agrícolas), la probabilidad de que no ocurra un incendio forestal es muy alta.

En cuanto a las variables distancia a zonas de pastizales y el modelo de accesibilidad, se puede observar que presentan una relación positiva, lo que nos indica que a mayor distancia de estos sitios, se incrementa a la posibilidad de ocurrencia de un evento, y al analizar los *Odds ratio* de

estos dos regresores se puede afirmar, que también tienen una relación significativa con la variable dependiente, incluso es posible mencionar, que al estar lejos de una localidad existe una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. En primera instancia, parecería que estos dos últimos resultados no pudieran tener sentido, puesto que por lógica se esperaría que en las localidades se presentaran una mayor cantidad de incendios forestales, por la presencia de personas, no obstante, el modelo parece indicar que los sitios que incrementan la ocurrencia de incendios forestales, son las zonas agrícolas.

Tabla 4.17. Coeficientes del modelo sin variables atmosféricas.

Variable	Coefficiente	Error estándar	Valor z	Significancia	Exp
Intercepto	-1.34856	0.06823	-19.764	2×10^{-16}	0.2596147
MEAN_PAST	0.76950	0.05320	14.464	2×10^{-16}	2.1586943
MEAN_RIEGO	-2.70527	0.12215	-22.147	2×10^{-16}	0.0668523
MEAN_ACCES	0.18323	0.05041	3.635	0.000278	1.2010926
MEAN_TEMPO	-0.67099	0.07670	-8.748	2×10^{-16}	0.5112016

Una vez analizados los coeficientes y los *Odds ratio*, de las variables que componen el modelo final, se procedió a espacializar dichos valores para poder obtener un mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, fue empleado el mismo procedimiento que en el modelo anterior, se emplearon quintiles para realizar la clasificación de los intervalos de probabilidades (Tabla 21). La ecuación para la obtención del mapa de probabilidad de ocurrencia para este modelo quedó definida de la siguiente forma:

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-(\dots + \dots (MEAN_PAS) - \dots (MEAN_RIEGO) + \dots (MEAN_ACCES) - \dots (MEAN_TEMPO))}} \quad (4.2)$$

Tabla 4.18. Intervalos de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Símbolo	Intervalo de probabilidad	Etiqueta
	0.000000 - 0.244543	Muy bajo
	0.244543 - 0.464950	Bajo
	0.464950 - 0.610859	Medio
	0.610859 - 0.713307	Alto
	0.713307 - 0.905783	Muy alto

Posteriormente fue creado un índice de riesgo con el cual se generó el mapa final (Figura 14) que muestra las zonas con un mayor riesgo de ocurrencia de incendios forestales. En el cual se observa que las zonas con un mayor riesgo de ocurrencia de incendios forestales, se encuentra al norte del municipio hacia lo límites con los municipios de Hecelchakán, Tenabo y Dzitbalché, la zona suroeste, hacia los límites del municipio de Campeche y una porción central de la entidad, los sitios con una muy baja posibilidad de ocurrencia de incendios forestales se encuentran hacia la parte sur oriental estado, hacia los límites con el municipio de Calakmul y los límites con el Estado de Quintana Roo y una fracción de la parte suroccidental del estado de Yucatán.

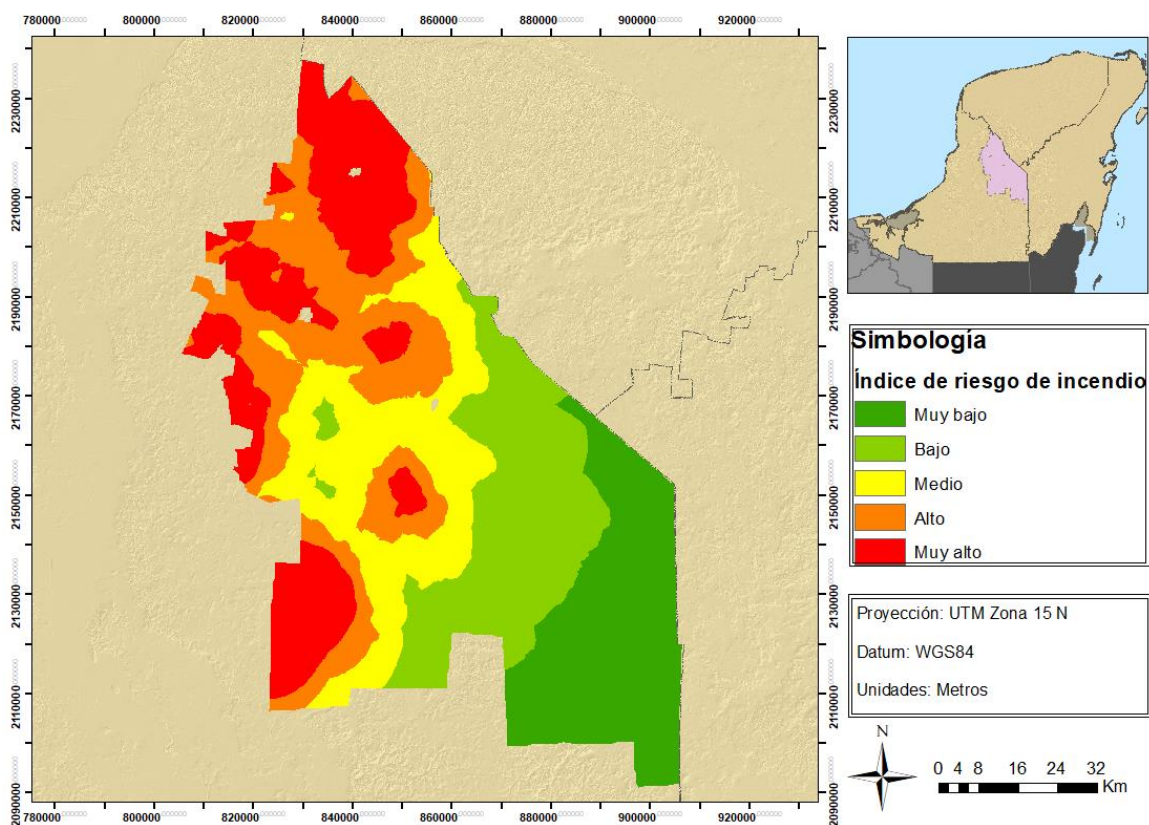


Figura 4.6. Probabilidad de ocurrencia de incendios en Hopelchén, Campeche 2015-2020.

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

5.1. Discusión

Los resultados muestran que al haber dividido los datos en dos temporalidades para tomar en cuenta la diferencia en dimensiones espaciales de zonas agropecuarias, resultó en un modelo con una capacidad aceptable de predicción de incendios forestales. Además al tener dos temporalidades, es posible observar si existió un incremento en la superficie con una mayor probabilidad de ocurrencia entre estos dos intervalos de tiempo, o bien, si la superficie con una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales disminuyó.

Los modelos elaborados permitieron identificar las variables que tienen una mayor incidencia en la ocurrencia de incendios, así como la relación que estas presentan. Para el modelo de la temporalidad (2011-2014) se pudo observar que las variables “distancia a zonas de agricultura de riego” y “distancia a zonas de agricultura de temporal” presentaron una fuerte relación inversa, es decir, mientras más se incrementa la distancia de estos sitios, se disminuye la probabilidad de que ocurra un incendio forestal, lo cual indica la enorme presión que estas actividades están provocando a los ecosistemas.

Para el segundo modelo (2015-2020), se observó que las variables que incrementan la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales son: “distancia a zonas de agricultura de riego”, “distancia a zonas de agricultura de temporal”, “distancia a pastizales inducidos” y “modelo de accesibilidad”. De estas variables, los signos de las dos primeras eran esperados, que presentaran una relación inversamente proporcional, que a medida que se disminuye la distancia, se incrementa la probabilidad de ocurrencia de incendios. De la variable que no se esperaba dicha relación, fue la distancia a pastizales, pues el modelo nos indica que a medida que se incrementa la distancia de estos sitios, también se incrementa la probabilidad de ocurrencia de incendios, esto posiblemente pueda deberse a que las actividades relacionadas con la agricultura intensiva tienen un mayor efecto en la aparición de incendios.

En cuanto a la variable “modelo de accesibilidad”, la relación que presentó con respecto a la variable dependiente, fue positiva, es decir, mientras sea mayor el tiempo de traslado a un punto de una vía de comunicación, se incrementa la probabilidad de aparición de un incendio, esto sugiere que los incendios se dan con más frecuencia lejos de las vías de comunicación, en sitios más apartados o inaccesibles. Estos resultados no concuerdan con investigaciones como las de Muñoz et al., (2005); Roman y Martínez (2006); Villers (2015), en las cuales la distancia a vías de comunicación presentan una influencia negativa, es decir; a menor distancia de las vías de comunicación, se incrementa la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, esta diferencia en los resultados, quizá pueda deberse a la dinámica distinta entre los lugares en que se llevó a cabo la investigación y la creciente expansión de los cultivos mecanizados que se están dando en Hopelchén.

En ambos casos, (2011-2014, 2015-2020) la variable MEAN_RIEGO resultó tener un mayor efecto en la ocurrencia de incendios forestales en el municipio de Hopelchén, esto quizá pueda deberse al incremento en la superficie de agricultura de riego, la cual ha ido en crecimiento a la

mano de los cultivos de soya, entre el 2004 y 2014, la superficie cosechada de soya pasó de 200 ha a 16 300 ha y hasta el 2016, el 90% de la producción de este grano estaba en manos de productores menonitas (Echánove, 2016). Por ejemplo, en el ejido de Dzibalchén, la probabilidad de ocurrencia de incendios resultó ser de alta a muy alta, y de acuerdo con Torres (2020), este ejido es uno de los que presentan una mayor cantidad de superficie utilizada para agricultura intensiva, lo mismo que en ejidos como Chencó y Chunchintoc, en los cuales la probabilidad de que ocurra un incendios forestal va desde media a alta.

La variable MEAN_TEMPO también presentó una relación negativa, lo que indica que a medida que la distancia se incrementa hacia estas zonas, disminuye la probabilidad de la aparición de incendios forestales, pero el valor que se obtuvo en los coeficientes para esta variable fueron menores que para la variable de agricultura de riego. Esto es interesante, puesto que en la parte sureste del municipio en donde la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales es baja, se extienden grandes superficies de zonas de agricultura de temporal, mientras que en la parte noroeste se localizan tanto zonas de agricultura de riego y temporal, y en donde se presentó la mayor probabilidad de ocurrencia de incendios. Estos resultados coinciden con investigaciones como la llevada a cabo por Roman y Martínez (2006), en la cual observan que la mayor incidencia de incendios forestales se relaciona directamente con una mayor extensión de superficies agrícolas. Los resultados obtenidos también concuerdan con los obtenidos por Rodríguez et al. (2011), ya que menciona que el mayor riesgo de incendios en la península de Yucatán ocurre en las zonas que presentan una mayor carga de actividades agrícolas y de uso del fuego para las mismas.

Los resultados mostraron que las superficies con una probabilidad muy alta de presentar incendios forestales se encuentran cerca de las ubicaciones de las colonias menonitas, esto es importante, pues diversas investigaciones han mencionado que estas colonias han sido uno de los motores principales en la deforestación en Hopelchén (Torres et al., 2020). Por ejemplo, en Torres et al. (2020), se menciona que en el año 2007 se establecieron dos contratos de usufructo en tierras de uso común en el ejido de Chencoh de 500 ha por un periodo de diez años y posteriormente en el año 2009 se incrementaron a 1128 ha, dicha superficie colinda con el campo menonita de las Flores, en esta superficie se presentó un incendio en el año 2006, y se quemaron 1600 ha, por lo que en dicha área se llevó a cabo un cambio en el uso del suelo, de forestal a usos agrícolas, en dónde actualmente los menonitas cultivan soya. Y este tipo de contratos es bastante común en el municipio, pues se sabe que en la mayoría de los ejidos de Hopelchén áreas que han sido desmontadas, son arrendadas, tanto a menonitas, como a empresarios mexicanos. Situación que va en contra de la ley, puesto que el gobierno mexicano ha ratificado que es considerado un delito llevar a cabo cambio de uso de suelo o bien cualquier tipo de actividad ajena a la restauración en terrenos que hayan presentado un incendio, lo cual está convenido en el artículo 155 fracción XXV de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. y que además no se pueden otorgar permisos de cambio de uso de suelo, sin que hayan pasado 20 años, lo cual está establecido en el artículo 97, de la ley antes mencionada.

La variable distancia a pastizales sólo fue significativa en el modelo para la temporalidad 2015-2020, y la relación que presentó fue positiva, lo cual no era un resultado esperado, sin embargo, esta relación puede deberse a que Hopelchén no figura como uno de los municipios principales en la actividad ganadera, ya que según datos de SIAP (2016), los municipios que dedican una mayor superficie a la ganadería, son Candelaria, Carmen, Champotón y Escárcega, siendo el municipio de Carmen el que cuenta con una mayor tasa de deforestación atribuida a la actividad ganadera. Esto es interesante, puesto que para el caso de Hopelchén, la actividad que se considera como el motor principal de deforestación, son las actividades de agricultura intensiva y es precisamente esa variable la que arrojó un mayor valor en el coeficiente. Otra de las posibles explicaciones de la baja relación entre incendios y distancia a pastizales, la explica el Dr. C. Neger del Instituto de Geografía de la UNAM basándose en su experiencia profesional: “En mis investigaciones muchos ganaderos no usan el fuego por miedo a que se quemen sus cercas o que el fuego mate al ganado” (comunicación personal, 31 de marzo 2023).

En cuanto a las zonas que presentaron una menor probabilidad de riesgo, estas se encuentran hacia el sur del municipio, colindando con reservas naturales como la de Calakmul, además es de hacerse notar que también la menor probabilidad de ocurrencia de incendios se da en la región conocida como “La montaña”, en la cual se tiene como una de las actividades económicas principales la apicultura, la cual figura como una actividad económica ecológicamente “amigable” que permite a los campesinos obtener ingresos y situarse en un mercado internacional, pero a su vez fomentando el cuidado de las selvas (Ellis et al., 2018).

Las ventajas de aplicar el modelo de regresión logística en esta zona de estudio, son que con datos accesibles y disponibles para cualquier usuario, se pudo establecer una clasificación de riesgo de incendios en todo el territorio municipal, identificando las zonas que tienen una mayor probabilidad de presentar un incendio. Esta información es de gran utilidad para el desarrollo de planes de prevención de incendios y puede permitir a los habitantes la identificación de los sitios en los cuales se deben tomar medidas más contundentes y efectivas para la prevención de incendios. Además, fue posible identificar la relación y el efecto que cada variable elegida tiene con la incidencia de incendios forestales, esta información puede servir para justificar las demandas de ciertos grupos sociales ante las autoridades competentes, para implementar las medidas necesarias para la reducción y la prevención de incendios forestales en las selvas de Hopelchén.

No obstante, se debe tener en cuenta que el modelo ofrece un panorama preliminar de los factores que provocan el incremento en la ocurrencia de estos eventos y aún haría falta un estudio profundo en la dinámica social y legal que propicia las condiciones para el incremento de los incendios forestales, puesto que en la revisión bibliográfica, se pudo notar que el arrendamiento, usufructo y venta de tierras a ciertos grupos, han sido algunas de las acciones que han incrementado el empleo del fuego para el cambio de uso del suelo, por lo cual sería necesario implementar una metodología que permita incorporar este tipo de variables a un estudio posterior, para poder identificar el efecto que este tipo de acciones tienen con respecto a la

presencia de incendios forestales y poder conocer con mayor profundidad las interacciones entre los distintos actores del municipio.

Como trabajo a futuro en lo que respecta al modelado de la probabilidad de ocurrencia, sería necesario incorporar algunas variables que requieren de un arduo trabajo de campo y muestreo tales como: carga de combustibles por área, esta variable es considerada por otros autores como una de las principales en cuanto al comportamiento que el fuego tendrá (Rodríguez et al., 2011), pero, para obtenerla, se necesita realizar un muestreo en la mayor parte del territorio del municipio, además, las muestras deben de ser sometidas a un proceso posterior para calcular su carga, por lo cual requiere de cierto tiempo para poder planificar dicho muestreo y calcular la carga por área, por lo que en esta investigación no fue posible realizar dicho muestreo. La integración de esta variable al modelo podría complementar el análisis enormemente, puesto que se contaría con los sitios que presentan una mayor cantidad de combustible disponible y por lo tanto, los sitios en los cuales se puede presentar un incendio de alta severidad, así como del posible comportamiento que este pueda presentar.

También sería necesario implementar una estrategia metodológica que permita la combinación de una metodología tanto cualitativa como cuantitativa, con la cual se pueda conocer a un nivel más profundo la interacción entre los distintos actores sociales y económicos en el municipio y crear una base de datos actualizada con el número de contratos y cantidad de superficie que está siendo trasladada de una propiedad ejidal hacia una privada en el municipio, para incorporar una variable que permita identificar el tipo de relación que pueda existir en el porcentaje de la cantidad total de tierra que está siendo vendida, arrendada o usufructuada, para conocer qué tanto influyen estas acciones en la presencia de incendios.

Otro de los aspectos a ser tomados en cuenta a futuro, sería poder elaborar un modelo dinámico, que permitiera la predicción diaria de la probabilidad de ocurrencia, en función de las condiciones meteorológicas y algunas variables físicas, tales como la carga de combustibles por área y el nivel de humedad en el combustible (Vega-Nieva et al., 2018) y así poder ofrecer a los usuarios del modelo, la capacidad de modificar los parámetros necesarios para obtener como resultado la probabilidad de ocurrencia en el territorio del municipio.

5.2. Conclusiones

Se considera que la hipótesis principal se cumplió y que los incendios forestales tienden a presentar un mayor ocurrencia en las zonas cercanas a sitios agroindustriales, en especial en la parte norte, oeste y noroeste del municipio, mientras que las probabilidades más bajas de ocurrencia de incendios se encuentra hacia la parte sur del municipio, colindando con la reserva de Calakmul, por lo cual es necesario que las autoridades municipales puedan llevar a cabo medidas eficaces e implementar un manejo prudente del fuego en el municipio, para evitar la degeneración de las selvas de Hopelchén.

Se concluye que las variables distancia a zonas de agricultura de riego y temporal, son adecuadas para la predicción del peligro de incendios en Hopelchén, debido a que los coeficientes que se obtuvieron en la regresión fueron los más grandes, además, otros autores las han empleado para

explicar la ocurrencia de estos eventos. La metodología empleada utilizando la regresión logística se mostró adecuada para la identificación de las variables que tienen una mayor incidencia en la ocurrencia de incendios forestales en el municipio, así como conocer el tipo de efecto que estas presentan en la ocurrencia de los incendios.

Los mapas de probabilidad de ocurrencia coinciden con notas e investigaciones revisadas, en las cuales se exponen los problemas con incendio forestales propiciados por actividades de la agroindustria, lo cual indica que el modelo elaborado permite una estimación adecuada de zonas con alta probabilidad de aparición de incendios, además, al identificar los sitios más riesgosos, permite dirigir hacia estos los recursos necesarios para reducir la incidencia de incendios forestales y poder fortalecer el cuidado de las selvas de estas zonas.

El modelo generado cumplió con el principio de parsimonia, por lo cual resulta ser un modelo sencillo de aplicación y está construido con variables de rápido acceso, por lo cual cualquier analista de riesgo o encargado del cuidado de los recursos del municipio puede aplicarlo para distintas temporalidades y obtener un mapa actualizado de riesgo de incendios forestales. Aunque el modelo se considera apto solo para la parte de la península de Yucatán, puesto que en él, no se incluyó la variable de exposición ni pendiente, debido a la topografía prácticamente llana de la zona de estudio.

Referencias

Alderete A. (2006). Fundamentos del análisis de Regresión Logística en la Investigación Psicológica. Universidad Nacional de Córdoba.

Aneas de Castro S. (2000). Riesgos y peligro: una visión desde la geografía. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*.

Balde B. y Vega-García C. (2019). Estimación de emisiones de GEI y sus trayectorias en grandes incendios forestales en Cataluña, España. *Madera y Bosques* No. 25.

Bartlow J., Peres C., Lagan B., Haugaasen T. (2003). Large tree mortality and the decline of forest biomass following Amazonian wildfires. Researchgate.

Barrios J. (26 de julio de 2019). La matriz de confusión y sus métricas. Recuperado el 15 de junio de 2021. Disponible en: <https://www.juanbarrios.com/la-matriz-de-confusion-y-sus-metricas/>

Bautista F. (2015). Emisiones totales anuales de CO2 por incendios forestales en el periodo 1999-2010 en México y estimación de índice riesgo. Tesis doctoral.

Bland J. y Altman D. (2000) The odd ratio. *Statistics Notes*. BMJ. Volume 320.

Bond W. y Keeley J. (2005). Fire as a global „herbivore“: the ecology and evolution of flammable ecosystems.

Bowman M., Amacher G., Merry F. (2008). Fire use and prevention by traditional households in the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*.

Calderón G. (1998). Geografía de riesgos. Fundamentos económicos y sociales. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.

Canul R. (2020). México: esto sucede cuando se tumba selva en territorio maya. Mongabay. Periodismo ambiental independiente.

CONABIO (2015). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Sistema de alerta temprana de incendios forestales.

Chuvieco E. Y Salas J. (1996). Mapping the spatial distribution of forest fire danger

CENAPRED. (2008). Incendios Forestales. Centro Nacional de Prevención de Desastres. 3ra. Edición.

Cerda J., Vera C., Rada G. (2013). Odd ratio: aspectos teóricos y prácticos. *Revista médica de Chile*.

Cochrane M. (2009). Tropical fire ecology. *Climate change, Land use and ecosystem dynamics*.

CONAFOR (2010). Incendios Forestales. Guía práctica para comunicadores. Zapopan Jalisco.

CONAFOR (2020). Programa de manejo del fuego.

Cruz-Espíndola M., Rodríguez-Trejo D., Villanueva A., Santillán J. (2017). Factores sociales de uso del suelo y vegetación asociados a los incendios forestales en Hidalgo. *Revista mexicana de ciencias forestales*.

Díaz García R. (2013). Caracterización de combustibles forestales Mediante un muestreo directo de plantaciones forestales. En: Memoria del cuarto simposio internacional sobre Política, planificación y Economía de los incendios forestales: Cambio climático e incendios forestales.

Domínguez E. González R. (2002). Análisis de las curvas Receiver-Operating Characteristic: un método útil para evaluar procedimientos diagnósticos. *Revista cubana Endocrinol.* Vol. 13.

Ellis E., Romero J., Hernández I., Álvarez M., Sánchez M., Porter-Bolland L., Serrano A. (2018). Estudio técnico del programa de ordenamiento ecológico del municipio de Hopelchén, Campeche.

Epsting J., Verbyla D., Sorbel B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*

Erikssen C. (2007). Why Do They Burn the „Bush“? Fire Rural Livelihoods, and Conservation in Zambia. *The Geographical Journal*.

Eva H. & Lambin E. (2000). Fires and land-cover changes in the tropics: a remote sensing analysis at the landscape scale

Fulé P. & Covington W. (1999). Fire Regime Change in La Michilia Biosphere Reserve, Durango México.

Iglesias T. (2013). Métodos de bondad de ajuste en Regresión Logística. Tesis de Maestría. Universidad de Granada.

Galanter M., Levy H., Carmichael G. (2000). Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x and O₃. *Journal of Geophysical Research*.

Gómez T. (2020). Incendios que siembran la deforestación en la península de Yucatán. MONGABAY Periodismo ambiental independiente. Recuperado de: <https://es.mongabay.com/2020/05/mexico-incendios-deforestacion-en-selva-maya-yucatan/>

Gomollan F. (2017). La química de los incendios forestales Consultado en: <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2017/07/15/la-quimica-los-incendios-1186910-310.html?autoref=true>

González F., Almendros G., González-Pérez J., Knicker H., González-Vázquez R., Hernández Z., Piedra A., Rosa J. (2009). Transformaciones de la materia orgánica el suelo por incendios naturales ya calentamientos controlados en condiciones de laboratorio

Gutiérrez A., García L., Parra M., Rosset P. (2017). De la supresión al manejo del fuego en la Reserva de la Biosfera la Sepultura, Chiapas: perspectivas campesinas. *Región y Sociedad*. No. 17

Hardesty J., Myers R., Fulks W., (2005). Fire ecosystems and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *The George Wright Forum* 22.

Hilbe J. (2015). Practical guide to logistic regression. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology.

Hudak A., Morgan P., Bobbit M., Smith A., Lewis S., Lentile L. Robichaud P., Clark J. & McKinley R. (2007). The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects. *Fire Ecology*.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2017). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México.

Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2021). Aspectos geográficos Campeche. En: Anuario estadístico y geográfico de Campeche 2021. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_04.pdf

Jardel E., Ramírez R., Castillo-Navarro F., García-Ruvalcaba S., Balcázar O., Chacón J., Mortin J. (2010). Manejo del Fuego, Conservación y Silvicultura. El caso de la Sierra de Manantlán, México.

Key C. & Benson N. (2006). Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burned Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. ResearchGate

López A. (2012). Estudio de la severidad del incendio de 2012 y regeneración de la vegetación del Bosque de La Primavera, México, mediante imágenes Landsat 7.

López V. (2019). Reporta Global Forest Watch Máximos en pérdida de cobertura forestal desde 2001. WRI México. Recuperado de: <https://wrimexico.org/bloga/reporta-global-forest-watch-m%C3%A1ximos-en-p%C3%A9rdida-de-cobertura-forestal-desde-2001>

Manzo-Delgado L., López J. (2013). Role of forest conservation in lessing land degradation in a temperate region: The Monarch Butterfly Biosphere Reserve, México.

Martínez J. De las Heras J. Herranz J. (1991). Impacto ecológico de los incendios forestales. La Mancha

Mas-Caussel J., Morles-Manilla L., Ocegüera-Salazar K. (2020). Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacan, Mexico. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*.

McFadden D. Methods for Analyzing Travel Behaviour on Individuals: Some Recent Developments. En : Hensher D. Stopher P. (1979). Behavioural Travel Modelling.

Montero M., Polanco J., Oropeza F. (2004). Implementación de un algoritmo para la detección de fuegos usando imágenes GOES. En: Incendios forestales en México. Métodos de evaluación.

Montorio-Lloveria R., Pérez-Cabello F., García-Martin A., Vlassova L., De la Riva-Fernández J., (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales.

Monzón-Alvarado C., (2018). El manejo del fuego en Calakmul. Campeche: incendios forestales, gobernanza y variabilidad local de la precipitación. *Ciencia ergo-sum*.

Morgan P., Hardy C., Swetnam T., Rollins M., Long D. (2001). Mapping fire regimes across time and space. Understanding coarse and fire-scale fire patterns.

Mutch R., Lee B., Perkins J. (1999). Public policies affecting forest fires in the Americas and the Caribbean. Proceedings FAO Meeting on Public Policies Affecting Forest Fires.

Muñoz C. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México.

Navar-Cháidez J. (2009). Modelación del contenido de agua de los suelos y su relación con los incendios forestales en la Sierra Madre Occidental de Durango, México.

Neger C. (2021). Configuración territorial de los actores sociales involucrados en el manejo del fuego en la sierra de los Tuxtlas (México). *Boletín De La Asociación de Geógrafos Españoles*.

Neger C. & Manzo-Delgado L. (2021). La gestión del riesgo de los incendios forestales en áreas naturales protegidas: el caso de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (México). Cuadernos Geográficos. *Universidad de Granada*.

Neger C., Manzo-Delgado L., Galicia-Sarmiento L. (2022). La investigación geográfica de los incendios forestales en México: una perspectiva bibliométrica y territorial. *Investigaciones Geográficas*.

Nearby D., Ryan K., DeBano L. (2008). Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water

Ortiz M., Vidal R., Gómez G., Álvarez R. (2003). Evaluación de las plumas de humo de los incendios forestales de 1998 en México y la utilidad de las imágenes NOAA-AVHRR

Parisien A., Kafka G. Hirsch G. Todd B. Lavoie G. Maczek D. (2005). Mapping wildfire susceptibility with the BURN-P3 simulation model (Information Report). Edmonton: Natural Resources Canada.

- Pantoja-Campa V. (2016). Mapeo analítico de la problemática del manejo del fuego en la Región de la Selva Maya. El Colegio de la Frontera Sur.
- Pereira G., Shimabukuro Y., Moraes E., Freitas S., Cardozo F., Longo K. (2011). Monitoring the transport of biomass burning emission in South America. Atmospheric Pollution Research.
- Pérez-Verdín, G. Márquez, M. Cotéz, A. Salmerón, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México.
- Pineda, N. Bosque, J. Gómez, M. Plata, W. (2009). Análisis del cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante Sistemas de Información Geográfica y técnicas de regresión multivariante. Una aproximación a los procesos de deforestación. Instituto de Geografía. UNAM.
- Pompa-García M., Y Hernández P. (2012). Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México.
- Priego B., Castillo E., Bustamante A., Olmos I. (2014). Extracción y clasificación de características de imágenes de incendios forestales.
- Radwin M. (2019). La reserva de la Biosfera de Calakmul. MONGABAY Periodismo ambiental independiente. Recuperado de: <https://es.mongabay.com/2019/09/mexico-deforestacion-incendios-calakmul/>
- Refaeilzadeh P., Tang L., Liu H. (2009). Cross-Validation. En: Liu H., Ozsu M. Encyclopedia of Database System. Springer. Boston, Massachusetts.
- Roberts S. (2000). Tropical fire ecology. En: Progress in Physical Geography.
- Robles C., Treviño E. (2005). Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental.
- Rodríguez-Trejo A. (2002). Ecología del fuego en el ecosistema de pinus hartwegii Lindl
- Rodríguez A. Y Fulé P. (2003). Fire ecology of Mexican pines and fire management proposal.
- Rodríguez A. Y Flores J. (2005). Incendios forestales: definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades., educación y divulgación.
- Rodríguez-Trejo A. (2008). Fire regimes, fire ecology and fire management in Mexico.
- Rodríguez-Trejo A., Martínez P., Martínez J. (2019). Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. Ciencia Forestal. Núm. 29
- Rosero J. Osorio I. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del Arte.

- Ruiz J., Blanco L, (2004). Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán La Malinche.
- Ryan K. (2002). Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems
- Sánchez M. (2022). Soya: La agroindustria que arrasa con la selva maya. MONGABAY. Periodismo ambiental independiente.
- Silva J., Sá A., Pereira J. (2005). Comparission of burned area estimates
- Simental-Ávila J. Pompa-García M. (2016) Incendios forestales: Autocorrelación espacial de topografía y temporalidad.
- Sobrino J., Llorens R., Fernández C., Fernández A. (2019). Relationship between Soil Burn Severity in Forest Fires Measured.
- Sotile D., Giaché S., Bianchi M. (2018). Reconstrucción del régimen de incendios en ecosistemas templados patagónicos sobre la base de registros de Carbón vegetal sedimentario y polén durante el cuaternario tardío. Tendencias metodológicas resultados y perspectivas.
- Tanase M., De la Riva J., Pérez-Cabello F. (2011). Estimating burn severity at the regional level using optically based índices.
- Torraza A. (2014). Desarrollo del motor de Cálculo de un Simulador de Incendios Forestales.
- Ubeda X. Y Sala M. (1996). Cambios en la química del suelo e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio forestal.
- Vega-García C., Woodard P., Titus S., Adamowicz W., Lee B. (1999). Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canadá.
- Vega A., López J., Manzo-Delgado L. (2008). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales del corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México.
- Vilar del Hoyo L., Gómez I., Martín M. Martínez F. (2007). Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. Wildfire. España.
- Vilchis A., Díaz-Delgado C., Magaña D., Ba M. Gómez-Albores M. (2015). Modelado espacial para el peligro de incendios forestales con predicción diaria en la Cuenca del Río Balsas. *Agrociencia*.
- Vilchis A., Díaz-Delgado C., Gómez M. Ángel M. Bak M., Becerril R. Y Mastachi C. (2018). Modelado de dinámica de sequías para predicción de incendios forestales en el estado de Morelos. México.

Villers L. Y López-Blanco J. (2004). Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo de incendios en las áreas forestales de México: Un estudio en el volcán La Malinche. En: Villers y Blanco. Incendios forestales en México. Métodos de evaluación.

Villers L. (2006). Incendios Forestales. Revista UNAM.

Ward D. (2001). Combustion chemistry and smoke. En: Johnson & Miyanishi. Forest Fires Behaviors and Ecological Effects.

Wong J., Villers M. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales. Un estudio en el Parque Nacional La Malinche.

Wilson R. (1985). Observations of extinction and marginal Burning states in free burning porous fuel beds.

Zárate-López L. (2004). Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales. Tesis Doctoral. UPC. Departament d'Enginyeria Química.