



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

RELACIONES ESTADÍSTICAS ENTRE LOS INCENDIOS FORESTALES Y
VARIABLES DE VIENTO, HUMEDAD Y TEMPERATURA: EL CASO DE LA
REGIÓN METROPOLITANA EN EL PERIODO 2010-2017

Memoria para optar al título de Geógrafa

Marcela Patricia Navarro Guerra

Profesor Guía: Pablo Sarricolea

SANTIAGO – CHILE

2020

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas que han formado parte de mi vida durante este proceso, desde mi familia y amigos hasta los increíbles profesores de la facultad, que junto a su buena disposición, consejos y apoyo, ayudaron a dar forma a este trabajo.

RESUMEN

La presente investigación analiza la relación estadística entre la superficie quemada por incendios forestales en la Región Metropolitana para el periodo de incendios 2010-2017 y las variables meteorológicas de velocidad del viento, humedad relativa y temperatura. Para esto se realizó el estudio a través del uso del coeficiente de correlación de Spearman y posteriormente se estableció un modelo de regresión lineal múltiple determinando cuánto describen estas variables meteorológicas la superficie quemada dentro de la región. Finalmente, a través del uso de imágenes MODIS fueron detectadas y analizadas las áreas quemadas de la temporada de incendios 2016-2017 y se obtuvo el uso de suelo a través del catastro de uso de suelo y vegetación de CONAF (2013), finalmente se vio cómo variaba el NDVI de estas áreas quemadas con los grandes incendios forestales que las afectaron, demostrando si el vigor de la vegetación se recuperó y a qué ritmo.

Palabras claves: *Incendios Forestales, Región Metropolitana, relaciones estadísticas, superficie quemada, variables meteorológicas, imágenes MODIS, uso de suelo y vegetación, NDVI.*

ABSTRACT

This research analyzes the statistical relationship between the area burned by forest fires in the Metropolitan Region for the 2010-2017 fire period and the meteorological variables of wind speed, relative humidity and temperature; For this, the study was carried out through the use of the Spearman correlation coefficient and subsequently a multiple linear regression model was established determining how much these meteorological variables describe the burned area within the region. Finally, through the use of MODIS images, the burned areas of the fire season 2016-2017 were detected and analyzed and land use was obtained through the land use and vegetation cadastre of CONAF (2013), finally it was seen how the NDVI of these burned areas varied with the large forest fires that affected them, demonstrating whether the vigor of the vegetation recovered.

Keywords: *Forests Fires, Region Metropolitana, statisticals relations, burned area, meteorological variables, MODIS images, land and vegetation use, NDVI*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3 ÁREA DE ESTUDIO	12
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	14
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	15
2.1 ECOLOGÍA DEL FUEGO	15
2.2 INCENDIOS FORESTALES EN CHILE	16
2.3 INCENDIOS DE MAGNITUD	19
2.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS INCENDIOS FORESTALES	19
2.4.1 <i>Meteorología</i>	20
2.4.2 <i>Vegetación</i>	20
2.4.3 <i>Actividad humana</i>	21
2.5 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES	22
2.6 ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LA VEGETACIÓN POST INCENDIO.....	22
2.6.1 <i>Sensor MODIS</i>	23
2.6.2 <i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</i>	23
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 MATERIALES	24
3.2 MÉTODOS	24
3.2.1 <i>Exploración de datos</i>	25
3.2.2 <i>Relaciones estadísticas</i>	25
3.2.3 <i>Área quemada</i>	26
3.2.4 <i>Catastro de Uso de Suelo y Vegetación</i>	26
3.2.5 <i>Vigor vegetacional</i>	26
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	29
4.1 RESULTADOS GENERALES	29
4.2 RELACIONES ENTRE SUPERFICIE QUEMADA Y VARIABLES METEOROLÓGICAS	32
4.3 RELACIONES ENTRE SUPERFICIE QUEMADA DE LOS INCENDIOS DE MAGNITUD Y VARIABLES METEOROLÓGICAS	37
4.4 DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS	43
4.5 USO DE SUELO AFECTADO POR LOS INCENDIOS	45
4.6 VIGOR VEGETACIONAL EN ÁREAS QUEMADAS	50
4.6.1 <i>La Tetilla</i>	50
4.6.2 <i>Cerro Gacel</i>	50
4.6.3 <i>Talami sur</i>	51
4.6.4 <i>Alto Jahuel</i>	52
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	54
RELACIONES ESTADÍSTICAS PARA EL PERIODO 2010-2017.....	54
TEMPORADA DE INCENDIOS FORESTALES 2016-2017, USOS DE SUELO Y NDVI.....	55

BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Región Metropolitana de Santiago	13
Figura 2: Incendios Forestales normales y de magnitud para el periodo 1985-2009	19
Figura 3: Síntesis metodológica	28
Figura 4: Distribución de incendios forestales en la Región Metropolitana entre 2010 y 2017	31
Figura 5: Superficie de incendios forestales en función de temperatura versus humedad relativa	36
Figura 6: Superficie de incendios forestales en función de temperatura versus velocidad del viento	37
Figura 7: Superficie de incendios forestales de magnitud en función de temperatura versus humedad Relativa	42
Figura 8: Superficie de incendios forestales de magnitud en función de temperatura versus velocidad del viento.....	43
Figura 9: Áreas quemadas de la Región Metropolitana entre 2016 y 2017	44
Figura 10: Catastro de uso de suelo para área quemada La Tetilla	45
Figura 11: Superficie de uso de suelo en La Tetilla	46
Figura 12: Catastro de uso de suelo para área quemada Cerro Gacel	47
Figura 13: Superficie de uso de suelo en Cerro Gacel	47
Figura 14: Catastro de uso de suelo para área quemada Talami sur.....	48
Figura 15: Superficie de uso de suelo en Talami sur.....	48
Figura 16: Catastro de uso de suelo para área quemada Alto Jahuel	49
Figura 17: Superficie de uso de suelo en Alto Jahuel.....	49
Figura 18: NDVI de La Tetilla	50
Figura 19: NDVI de Cerro Gacel	51
Figura 20: NDVI de Talami sur.....	52
Figura 21: NDVI de Alto Jahuel.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Causas generales de incendios forestales en Chile para el periodo 2003-2017	18
Tabla 2: Incendios forestales para la Región Metropolitana en el periodo 2010-2017	29
Tabla 3: Área quemada de Incendios forestales de magnitud y normales para la Región Metropolitana en el período 2010-2017	30
Tabla 4: Coeficientes de correlación (r) entre superficie quemada, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.....	32

Tabla 5: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales en función de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento	33
Tabla 6: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales en función de humedad relativa y velocidad del viento	34
Tabla 7: Coeficientes de Correlación para incendios forestales de magnitud entre superficie, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento	38
Tabla 8: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales de magnitud en función de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento	39
Tabla 9: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios de magnitud en función de humedad relativa y velocidad del viento	40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Áreas de monitoreo de EMAs para la Región Metropolitana.....	61
---	----

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

A nivel internacional suceden gran cantidad de incendios de diversa índole, entre ellos se encuentran los incendios forestales, altamente importantes debido al daño que generan destruyendo la flora y fauna, alterando los ecosistemas y aportando emisiones de gases de efecto invernadero al medioambiente.

El bosque nativo es un elemento primordial de la flora chilena, el 23,3% del territorio nacional está cubierto por bosques con 17,66 millones de hectáreas; de éstas el bosque nativo alcanza 14,41 millones de hectáreas lo que representa el 19,04% del territorio, y el 4,07% es ocupado por plantaciones forestales. (CONAF, Actualizado al 2017)

La mayor cantidad de incendios ocurren en la temporada más seca del año, llamando a cada periodo “Temporada de Incendio”, durante la temporada 2016-2017 ocurrió la mayor cantidad de eventos de gran tamaño del que se tiene registro en el país, denominando como Mega Incendios a los de inicios de enero del 2017.

La vegetación, los elementos climáticos y el efecto antrópico inciden directamente en el inicio, propagación y control del fuego a nivel nacional. En Chile, casi todos los incendios registrados por la Corporación Nacional Forestal son de origen antrópico. Sin embargo, los elementos climáticos permiten determinar cómo se comportará un incendio, ya que según plantea Ortiz en Dominguez (2016) cuando la temperatura supera los 30°C, hay una humedad relativa menor al 30% y una velocidad del viento superior a 30km/hr se genera el escenario perfecto para la propagación de los incendios forestales en el territorio chileno.

En Chile, la región que concentra la mayor cantidad de población es la región Metropolitana con una población de los 7.112.808 habitantes para el Censo del 2017 citado por la BCN (2019), una superficie de 15.403,2 km² con presencia de 3.639,54 km² de Bosque Nativo (CONAF, 2019b) representando el 24% del territorio regional, cifra no menos importante considerando que este porcentaje no se encuentra disperso en la región, sino concentrado en la zona oeste de la misma, por lo que la mayor concentración de incendios forestales suceden en ese lugar.

Es de vital importancia el estudio de los incendios forestales por el aumento considerable que han tenido a nivel internacional teniendo en cuenta el aumento de la temperatura a nivel mundial con la exacerbación del cambio climático, la disminución de la humedad y la pérdida de la cobertura vegetal propia de cada lugar geográfico, lo que resulta en la reducción de la variabilidad de especies y alteración del balance hídrico local provocando un ciclo de

interacción entre los factores que sólo aumenta la probabilidad de incendios y dificulta las condiciones para su prevención, control y extinción.

1.2 Planteamiento del problema

Los incendios son parte de los ecosistemas naturales, cuando suceden de manera descontrolada pueden generar diversos daños en la economía, efectos sociales, afectar plantaciones, infraestructura urbana y rural, generar daño directo a personas y animales, entre otros.

Los incendios forestales a nivel mundial han intensificado su frecuencia y severidad durante las últimas décadas en diversas regiones del mundo. Mann y Kump (2009), destacan que para el caso de Estados Unidos ha habido un aumento de 6 veces durante las dos décadas más recientes. Westerling, Hidalgo, Cayan y Swetnam (2006) mencionan como principales patrones en el aumento del régimen de incendios el cambio abrupto hacia primaveras inusualmente cálidas, reducidos montos de precipitación invernal, derretimiento temprano de la nieve en primavera y veranos más secos y prolongados.

En Latinoamérica el fuego es uno de los principales responsables de la transformación de los ecosistemas terrestres. Entre las causas biofísicas que influyen en la ocurrencia de los fuegos destacan, las condiciones climáticas, el contenido de humedad de la vegetación y del suelo, la disponibilidad de material combustible, la localización geográfica y la topografía, las que gobiernan el régimen natural de fuegos. (Straschnoy, y otros, 2008)

Para la explicación de grandes incendios, existe la llamada regla o fenómeno del 30/30/30, a la que Magrini y López Varela (2017) indican estuvo presente en el año 2014 en Valparaíso, a su vez, el director de CONAF Germán Ortiz en Domínguez (2016) menciona que provocan una rápida propagación del fuego, los factores de los que hablan son 30 °C o más, 30% o menos de humedad relativa y 30 km/h en la velocidad del viento o superior.

En Chile, el 23,3% del territorio nacional se encuentra cubierto por Bosques, representado con 17,66 millones de hectáreas, el Bosque Nativo posee gran relevancia en esa cifra, ya que alcanza a 14,41 millones de hectáreas, siendo el 19,04% del territorio nacional y el 4,07% ocupado por Plantaciones Forestales, es decir 3,08 millones de hectáreas. (CONAF, Actualizado al 2017)

La gran cantidad de hectáreas de bosque a nivel nacional, la ocurrencia constante de incendios en las temporadas secas de primavera-verano, el efecto cada vez más visible del cambio climático y las potenciales consecuencias que tiene en los factores que inciden en la aparición, duración e intensidad de los incendios forestales hacen que sea necesario estudiar

los diferentes episodios de incendios ocurridos en el país, considerando no sólo el daño, sino también evaluando los factores bioclimáticos, ya que permite generar políticas de respuesta ante la intensificación de ciertos factores que pueden predisponer al territorio a episodios de incendios más intensos y difíciles de combatir.

En Chile la entidad encargada de catastrar la información, procesarla y tenerla disponible al público es la Corporación Nacional Forestal, la cual dispone de datos en diferentes formatos para su procesamiento digital y estadístico. Este último es el que facilita realizar las comparaciones con los diferentes fenómenos climáticos presentes en Chile, los que modifican el comportamiento de los factores del mismo, tales como el fenómeno ENSO.

El Niño Oscilación del sur (ENSO) genera como resultados en la zona central de Chile una alta variabilidad interanual en las precipitaciones invernales y primaverales, con sequías intensas y frecuentes inundaciones durante los años lluviosos. (Rutllant, 1997)

Los incendios forestales dañan la cobertura vegetal que protege los suelos de la erosión, el ciclo de recuperación de los mismos no está completo para el próximo episodio de precipitaciones, lo que dificulta aún más la recuperación del suelo y su consecuente resistencia para la próxima temporada de incendios. A su vez, la temporada de precipitaciones favorece la aparición de nueva flora que servirá de material combustible para el periodo seco.

La combustión de grandes cantidades de biomasa, sumado a la pérdida de bosques como agente regulador ambiental generan grandes efectos sobre el cambio climático, ya que estos provocan la emisión de gases químicamente activos, tales como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, óxido nítrico y partículas más pequeñas (Castillo, Pedernera, & Peña, 2003). Esto genera un ciclo sin fin, ya que el cambio climático intensifica los factores biofísicos que potencian el fuego y, a su vez, la combustión libera más gases de efecto invernadero.

Por lo anterior, y teniendo en consideración que en Chile los incendios son de origen antrópico, es necesario estudiar a cabalidad los factores meteorológicos que influyen en la dinámica de los incendios forestales en el país, comparándolo a su vez con el fenómeno climático ENOS, el cual impacta directamente en los episodios críticos de sequía e inundaciones en la zona centro.

Así mismo, el comportamiento del incendio se verá influido por el tipo y cantidad de material combustible que exista en el lugar para propagarse, considerando esto, también es necesario evaluar el tipo de vegetación nativa existente, pues en zonas no pobladas, será el principal material de combustión para los incendios en épocas secas, donde la vegetación tiene menor porcentaje de agua y es más propensa a quemarse.

También, considerando el origen antrópico de los incendios a nivel nacional, se hace relevante considerar la infraestructura que pueda servir para generar incendios, como el tendido eléctrico debido a las posibles fallas, las carreteras que favorecen el flujo de gente que descuida los ecosistemas, ya sea arrojando basura que sirva como material combustible o directamente iniciando el fuego por descuido, entre otros.

1.3 Área de estudio

El área de estudio contempla la totalidad de la Región Metropolitana, se ubica entre los 32°55' y 34°19' de latitud sur, y entre los 69°47' y 71°43' longitud oeste. Deslinda al Norte y al Oeste con la Región de Valparaíso; al Sur limita con la Región del Maule; y finalmente el Este de la región lo constituye la frontera con la República Argentina, tiene una superficie de 15.403,20 km², equivalentes al 2,0% del territorio nacional. Según el Censo 2017, la población alcanzaba los 7.112.808 habitantes y una densidad de 461,77 habitantes por kilómetro cuadrado (BCN, 2019) con un 96,3% de población urbana y un 3,7% de población rural (INE, 2017). Contempla las provincias de Cordillera, Chacabuco, Maipo, Santiago, Talagante y Melipilla.

Luebert y Pliscoff (2017) mencionan que la Región Metropolitana pertenece al macrobioclima mediterráneo, donde Rivas-Martínez en Luebert y Pliscoff (2017) lo destaca como un clima con una fuerte estacionalidad del ombroclima y el termoclina, con precipitaciones invernales (el trimestre más frío del año es el de menor precipitación) y sequía estival (el trimestre más cálido del año es el de menor precipitación), en que el periodo de aridez es de al menos dos meses consecutivos. De este se derivan dos bioclimas, presentándose con una mayor predominancia el Pluviestacional-Oceánico con una superficie de 1.321.530 ha seguido del Xérico-Oceánico con 130.959 Ha. Los autores también definen los pisos vegetacionales para la región, pudiendo encontrarse bosque espinoso, bosque esclerófilo, bosque caducifolio, matorral espinoso, herbazal mediterráneo y matorral bajo.

Según las cifras oficiales actualizadas a abril del 2018, la Región Metropolitana tiene 363.954,8 ha de Bosque Nativo, entre las que destaca como principal el bosque esclerófilo con 350.436,8 ha, seguido por Roble-Hualo con 10.347,9 ha, Palma chilena con 3.094,0 ha y 76 ha de Ciprés de la Cordillera. (CONAF, 2019b)

Para el año 2017 la región cuenta con 83.789,2 ha de superficie de área urbana consolidada, es decir, 837.89 km² que contempla el 87% total del área planificada por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) de 2007. (CEHU - Minvu, Depto. de Geografía INE, 2018)

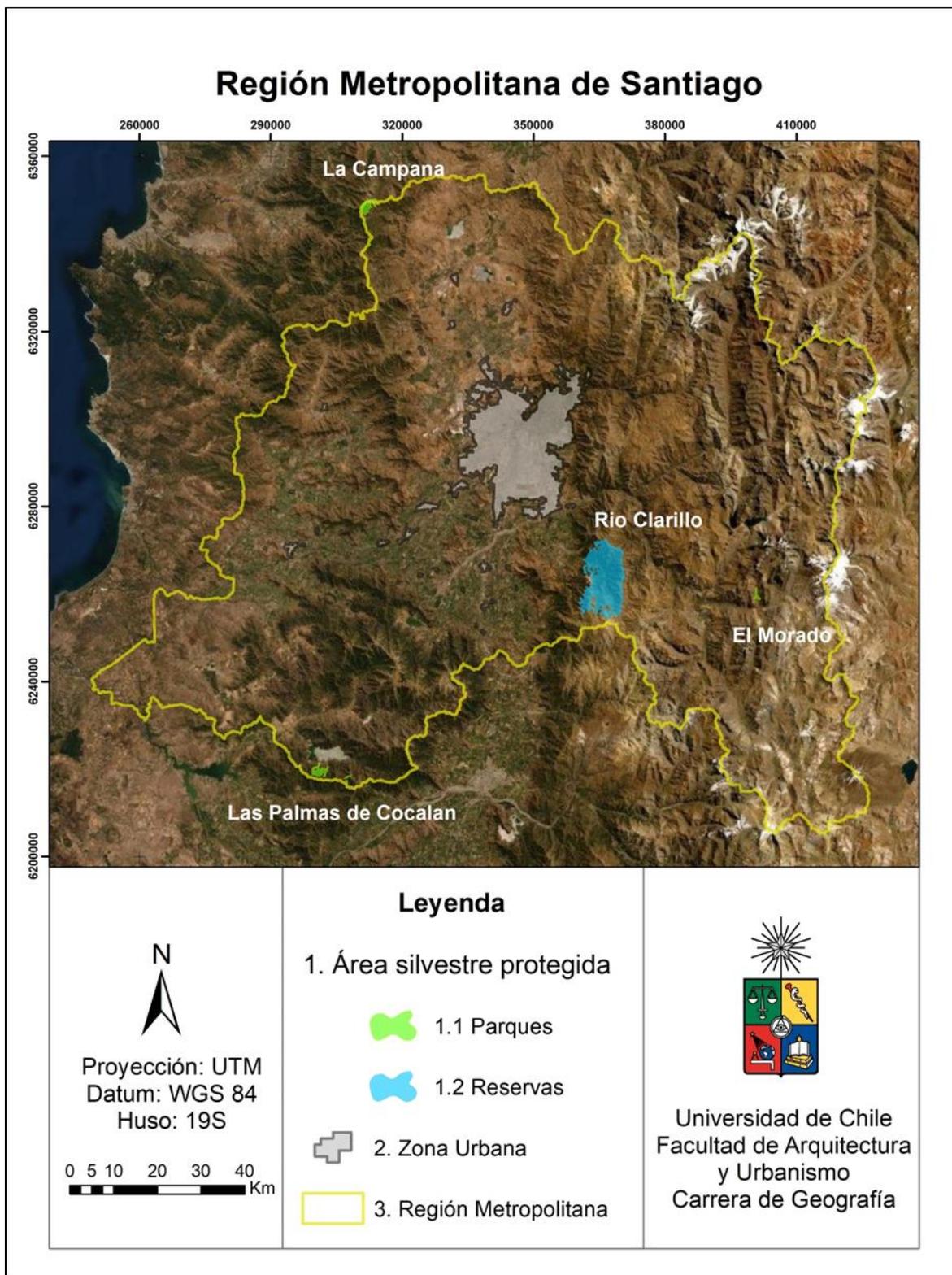


Figura 1. Región Metropolitana de Santiago

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar la relación entre las variables meteorológicas y los incendios forestales en la Región Metropolitana entre las temporadas de incendio 2010-2017.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Establecer la relación entre las variables meteorológicas de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento con los incendios forestales.
2. Determinar la variación en la temporada de incendios 2016-2017 del vigor de la vegetación en las áreas quemadas por los incendios forestales.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Ecología del fuego

El fuego ha sido parte de los ecosistemas naturales desde el origen del clima en la tierra, por ende, es un tema sobre el que la mayoría de las personas puede comentar. Podemos ver incendios en la vegetación natural o sus efectos, tales como vegetación ennegrecida o cortinas de humo. Los incendios como tales pueden generar daño en la economía y efectos sociales, puede afectar grandes plantaciones, quemar casas y predios agrícolas, dañar a personas y animales, mucho se ha escrito sobre el fuego incontrolado.

Para un ecologista, el fuego puede ser tratado como uno de muchos factores en el medioambiente. Lo compara con las sequías, inundaciones, huracanes y otras perturbaciones físicas debido al impacto directo que tiene sobre los organismos. A diferencia de los otros fenómenos físicos, el fuego es una fuerza que está influenciada por la biota, en particular la comunidad de plantas. La alteración de la vegetación por un número de factores puede influenciar la naturaleza del fuego tras estos cambios.

Aunque el conocimiento de los efectos ecológicos del fuego ha contribuido al desarrollo de la teoría ecológica, un entendimiento de este también ha ampliado su significancia. Whelan (1995) menciona que, en primer lugar, mucha de la silvicultura mundial es llevada a cabo en ecosistemas naturales. Los procesos ecológicos, incluyendo al fuego, por lo tanto, afectan a largo plazo la productividad forestal en un ámbito económico. Segundo, una importante cantidad de pastoreo de uso doméstico es llevado a cabo en praderas, cordillera y tierra pastoril. El fuego en esas áreas afecta a la agricultura directamente removiendo biomasa y matando animales, e indirectamente por el cambio en la productividad de las plantas y la composición de las especies. Tercero, el fuego afecta la calidad y cantidad de agua extraída de cuencas hidrográficas. Cuarto, un entendimiento de los procesos ecológicos que permiten a las comunidades de plantas recuperarse luego de un fenómeno natural, como el fuego, contribuye al éxito de los esfuerzos hechos para revegetar tierras después de disturbios provocados por el hombre. Finalmente, un conocimiento de los efectos ecológicos del fuego, tanto los incendios forestales y la quema controlada, son fundamentales para la conservación de la población de plantas, animales y comunidades representativas en muchas áreas.

Para el estudio y comprensión de los incendios es necesario entender las complejidades de los factores que los rodean, por esto, Grubb (1985) en Whelan (1995) enfatiza que el fuego tiene ciertas particularidades y que, si bien los eventos se pueden repetir en el mismo lugar, cada uno es diferente al otro. Un incendio tiene características intrínsecas de intensidad, temporada, tamaño y tipo, con características históricas como el clima previo al fuego, tiempo transcurrido desde el último incendio y las particularidades de los eventos anteriores.

Estas características inmediatas e históricas no son independientes, la historia puede ejercer una fuerte influencia en las propiedades inmediatas del fuego (Whelan, 1995).

Se estima que anualmente se pierden 10 a 15 millones de hectáreas de bosques en regiones boreales y templadas, mientras que 20 a 40 millones se pierden en bosques tropicales (Castillo, Pedernera, & Peña, 2003). Esto se debe principalmente al uso de grandes extensiones de superficie para la misma actividad como, por ejemplo, los cultivos o plantaciones forestales.

Los incendios forestales producen grandes pérdidas económicas y efectos negativos en la salud de la población, debido a las enfermedades respiratorias que se derivan de la emisión de los incendios. Una de las mayores preocupaciones de los incendios forestales es su impacto en el cambio climático, pues se queman enormes cantidades de biomasa que emiten gases, tales como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, óxido nítrico y partículas más pequeñas.

2.2 Incendios forestales en Chile

En Chile, el manejo del fuego, tanto a nivel regional como nacional se encuentra en manos de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), encargada de coordinar a instituciones privadas y públicas, ya sean empresas forestales, bomberos, intendencias, mutuales de seguridad y municipalidades. (CONAF, 2003)

Se constituye por una Central Nacional ubicada en la Región Metropolitana, además posee jefes de manejo de fuego en las regiones, con su respectivo equipo profesional y técnico. (CONAF, 2003 en Álvarez, 2008)

Chile posee cerca de 35 millones de hectáreas de vegetación vulnerable a los incendios, entre praderas y matorrales (20 millones de hectáreas), bosque nativo (13 millones de hectáreas) y plantaciones (2,1 millones de hectáreas). De esta vegetación, una cifra superior a las 50 mil hectáreas se quema anualmente en alrededor de 5.900 incendios forestales, siendo las regiones más afectadas, en términos de superficie y número de eventos, la Valparaíso (28,5%), del Biobío (38,5%) y La Araucanía (18,2%). Las pérdidas directas provocadas por los incendios son cercanas a los 50 millones de dólares, sin considerar los valores ambientales y sociales. (Castillo, Pedernera, & Peña, 2003) Los mismos autores mencionan que en Chile, el 99% de los incendios son causados por el ser humano con una intencionalidad que en algunas comunas de la región del Biobío y la Araucanía alcanza el 90%. Lo anterior se presenta como un hecho gravísimo ya que solo el 16% de los incendios son investigados y en el 95% de los casos no se encuentra al culpable, quedando con sentencia solo el 0,5%.

Esto representa una ineficiencia de los cuerpos legales, del marco normativo y legal que debe ser perfeccionado con el fin de reducir este enorme problema.

Las causas generales de incendios forestales en Chile para el periodo 2003-2017 según el catastro de CONAF (2018) visto en la tabla 1 reflejan que sólo el 1% de los eventos son de origen natural, dejando el 99% restante en manos del ser humano. De las causas antrópicas aquellas que tienen una mayor ocurrencia en la totalidad del periodo son los incendios intencionales y aquellos de causa desconocida. El tránsito de personas, vehículos o aeronaves no se queda atrás aumentando considerablemente la cantidad de incendios producidos desde el 2012 al 2017. Relacionado con la infraestructura urbana, se encuentran los accidentes eléctricos, que presentan un incremento de casos año a año. También es necesario destacar que las actividades recreativas representan un 6% de los incendios para el periodo, presentando variaciones en cuanto aumento y descenso de los casos según cada año. Finalmente, si bien algunas causas generales tienen variaciones en la cantidad de casos, todos tienden al aumento, pasando de menos de 200.000 incendios por periodo, hasta más de un millón.

Tabla 1: Causas generales de incendios forestales en Chile para el periodo 2003-2017

Causa General/Periodo	2003-2005	2006-2008	2009-2011	2012-2014	2015-2017	Total	%
Faenas forestales	2.585	4.850	2.719	5.885	9.495	25.534	2
Faenas agrícolas y pecuarias	10.562	11.592	14.900	8.345	25.870	71.269	5
Confección y/o extracción productos secundarios del bosque	2.640	1.398	2.859	6.287	9.071	22.255	2
Actividades recreativas	37.774	4.534	15.329	3.417	22.852	83.906	6
Operaciones en vías férreas	536	130	269	88	109	1.133	0
Actividades extinción incendios forestales, incendios estructurales u otros	1.673	564	1.474	1.427	3.467	8.606	1
Tránsito de personas, vehículos o aeronaves	28.596	20.117	27.271	70.606	106.717	253.307	18
Quema de desechos	6.801	2.092	1.875	2.630	5.304	18.701	1
Accidentes eléctricos	3.472	8.697	16.227	29.208	102.193	159.797	12
Otras actividades	7.436	2.037	10.498	1.787	32.707	54.467	4
Incendios intencionales	29.840	27.772	46.267	60.794	221.247	385.919	28
Incendios naturales	128	94	586	1.843	8.438	11.090	1
Incendios de causa desconocida	25.932	20.866	29.346	21.064	193.477	290.685	21
Total general	157.975	104.743	169.622	213.381	740.949	1.386.669	100

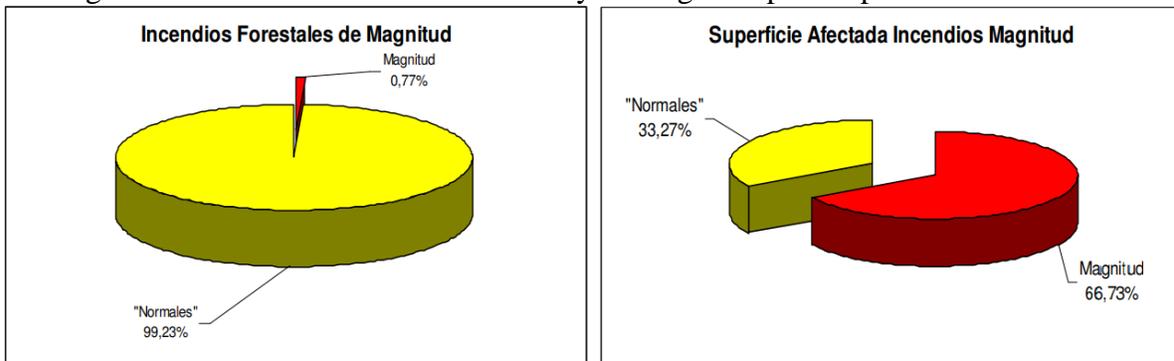
Fuente: CONAF (2018)

2.3 Incendios de magnitud

Tanto para Chile y el mundo, existe en la terminología de los incendios forestales una clasificación por el tamaño del mismo, considerando a aquellos mayores o iguales a 200 Ha. como Incendios de magnitud (CONAF, 2010), clasificación sustentada en la experiencia empírica del impacto sobre el medio ambiente que estos tienen y la carga de trabajo que requieren para su control.

Si bien, la mayor cantidad de incendios forestales en el país son de menor tamaño, la superficie afectada por estos es mayor en los incendios de magnitud. En la Corporación Nacional Forestal (2010) hacen un estudio sobre las temporadas de incendio desde 1985 al 2009 entre los incendios normales y los de magnitud. En la Figura 2 se puede apreciar uno de los resultados de este estudio, donde el 0,77% de los incendios forestales han ocasionado el 66,20% del daño nacional.

Figura 2: Incendios Forestales normales y de magnitud para el periodo 1985-2009



Fuente: Corporación Nacional Forestal (2010)

2.4 Factores que influyen en los incendios forestales

A lo largo del mundo, son diversos los factores que tienen la capacidad de influir en el inicio, comportamiento y extinción de un incendio forestal. A continuación, se presentan los elementos pertinentes a este trabajo.

2.4.1 Meteorología

Dado un cierto paisaje, en la ecología del fuego hay factores que determinan la probabilidad que una fuente de ignición desencadene un incendio, estos pueden ser la velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y precipitaciones. (Rothermel, 1972)

La temperatura del aire, cuando es alta, contribuye a acelerar el ritmo de evaporación de la vegetación y del suelo, permitiendo de ese modo un requerimiento menor de energía para provocar inflamación (Julio & Giroz, 1975), es decir, no es un iniciador del fuego, pero sí un condicionante del mismo.

Los autores se refieren a la humedad relativa del aire, que cuando sus niveles son bajos (inferiores a un 40%) su efecto es similar al de las altas temperaturas, pues contribuye a reducir el contenido de humedad de la vegetación (disminuye la humedad de equilibrio), y por lo tanto influye en la disminución del nivel de energía exterior necesaria para provocar la ignición.

El tercer factor que mencionan corresponde a la velocidad del viento, la cual contribuye a acelerar la desecación de la vegetación, y por otro lado incrementar el abastecimiento de oxígeno para mantener la combustión ya iniciada. El efecto de enfriamiento que provoca el movimiento de masas de aire es ampliamente contrarrestado en el Comportamiento por los dos otros efectos ya descritos.

El cuarto y último factor corresponde a las precipitaciones, donde la temporada de incendios de la Región Metropolitana coincide justamente con el período de sequía. Para los autores Julio y Giroz (1975) la ausencia de precipitaciones es tal vez la variable climática que en mayor grado influye sobre la ocurrencia de incendios forestales.

2.4.2 Vegetación

Si bien el clima y los factores meteorológicos influyen en el comportamiento de los incendios forestales, también es importante el material que servirá de combustible, tanto para su ignición como para su propagación.

En un mismo lugar, unos tipos de vegetación suelen arder más frecuentemente que otros, tales como matorrales o coníferas frente a bosques caducifolios o sistemas agropastolares (Díaz-Delgado, Lloret & Pons, 2004; Verdú, Salas & Vega-García, 2012; Moreno, Conedera, Chuvieco & Pezzatti, 2014; Barros & Pereira, 2014), indiferente que hayan estado sometidos a las mismas condiciones meteorológicas por igual período de tiempo

Julio y Giroz (1975) se refieren al material vegetal disponible para los incendios forestales con el nombre de Combustible Forestal, mencionándolo como el único factor del comportamiento del fuego que puede ser controlado por el hombre.

El reemplazo de la vegetación nativa en el país por plantaciones forestales coincide en estudios realizados para Chile en Díaz-Hormazábal y González (2016) y Carmona et al. (2012) con que la expansión de plantaciones exóticas parece ser un factor relevante para explicar el patrón de aumento de carga y continuidad de material combustible en el paisaje, trayendo como consecuencia un cambio en el comportamiento del fuego. A su vez, los incendios forestales que devastan el bosque nativo facilitan el proceso de surgimiento de especies invasoras post-incendio. (Sarricolea & Úbeda, 2016)

En palabras de Peña (2003) el comportamiento extremo de los incendios debería ser más frecuente en el futuro por la alta carga y continuidad del combustible en grandes extensiones que caracteriza a las plantaciones, sumándose a esto el cambio global y la mayor interacción con la población humana y sus actividades productivas.

2.4.3 Actividad humana

Como ya se ha visto en las causas generales de incendios forestales (CONAF, 2018), la ocurrencia de estos se relaciona estrechamente a la actividad humana. Para Chile central, las causas naturales son poco relevantes a diferencia de otros ecosistemas mediterráneos como la cuenca mediterránea, el sudoeste de Sudáfrica, sudoeste de Australia, y el sur de California, donde los rayos son una fuente frecuente e importante de ignición. (Lloret 2004, Montenegro et al. 2004, Keeley et al. 2012 en Díaz-Hormazábal & González, 2016)

El crecimiento de las ciudades y la expansión de plantaciones crea una zona de transición muy susceptible a la ocurrencia de incendios forestales (Peña-Fernández & Valenzuela-Palma, 2008). En su estudio sobre los incendios forestales de la Región del Maule, Díaz-Hormazábal y González (2016) concluyen que la distribución de los incendios se relaciona estrechamente con las actividades antrópicas, asociados mayormente a caminos y ciudades principales. Y que, si bien la infraestructura vial permite un combate más efectivo de los incendios, esta accesibilidad trae consigo una mayor probabilidad y riesgo de ocurrencia de eventos.

2.5 Detección de incendios forestales

Hay diversos modos de recopilar información sobre los incendios forestales, ya sea en terreno por la unidad forestal responsable en cada país o a través de fotografías satelitales posteriores al inicio de un evento de fuego. La Corporación Nacional Forestal (2019a) menciona 5 formas de detección:

- a) **Detección terrestre móvil:** correspondiente al desplazamiento de vigías por un área determinada. Entrega información completa sobre el incendio a la vista y tiene como desventaja que la observación no es continua.
- b) **Detección terrestre fija:** es la de mayor aplicación en Chile. Existe un observador desde estructuras en altura denominadas torres. Se construyen en cerros de altura predominante para vigilar un área de un radio estimado en 20km o más usando prismáticos. El observador entrega información sobre las características del fuego y terreno a la CENCOR. La observación es permanente, pero tiene puntos ciegos que retardan la detección del fuego.
- c) **Detección aérea:** se basa en la utilización de aviones. Entrega información sobre una precisa y exacta sobre una gran superficie por unidad de tiempo, aunque es de alto costo.
- d) **Detección con sistemas televisivos:** utilización de cámaras de televisión hasta un puesto de mando donde se analiza la situación según la imagen. Pueden estar instaladas sobre torres, barriendo un área de 360° o estar instaladas en aviones. Chile usa un número limitado de cámaras fijas.
- e) **Satélites:** se suelen utilizar satélites de órbita baja, por ejemplo, de los satélites Aqua y Terra. En CONAF es considerada una modalidad lenta que no aporta el detalle del discernimiento humano. Sin embargo, permite monitorear cambios en la condición de la vegetación (contenido de humedad) durante la temporada (NDVI, índice normalizado de diferencias en la vegetación); medir exactamente superficies en incendios de magnitud y monitorear cambios o recuperación vegetacional después del fuego.

2.6 Análisis de cambios en la vegetación post incendio

Existen diferentes formas de estudiar los cambios que tiene la vegetación luego de un incendio, el que más utilidad presta teniendo bajos recursos es el análisis a través de imágenes satelitales. Uno de los sensores que dispone de imágenes disponibles a público con buena tasa de periodicidad recorriendo la órbita de la tierra es el sensor MODIS.

2.6.1 Sensor MODIS

El sensor MODIS (o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) es un instrumento que viaja a bordo del satélite Terra (EOS AM-1) y Aqua (EOS PM-1). La órbita de Terra alrededor de la Tierra está programada para que pase de norte a sur a través del Ecuador por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte por el Ecuador por la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS están observando por completo la superficie de la Tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales, o grupos de longitudes de onda (NASA, 2019). Los productos de datos MODIS, en tres diferentes resoluciones – 250 m, 500 m, y 1 km – ayudan a mejorar nuestro entendimiento de los procesos globales del ambiente y las dinámicas ocurridas en la tierra, en los océanos, y en la atmósfera baja. Los registros de datos MODIS ayudan a ampliar los datos patrimoniales, como el radiómetro avanzado de muy alta resolución de NOAA, lo que garantiza la continuidad crítica de dichas colecciones para respaldar las investigaciones de cambios ambientales globales a corto y largo plazo (NASA - EARTHDATA, 2019).

2.6.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Un índice de Vegetación puede definirse como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert, González-Piqueras, & García-Haro, 1997).

El NDVI se utiliza a menudo en todo el mundo para vigilar sequías, estimar la producción agrícola, ayudar a predecir zonas de incendios y áreas de desertización. Es el índice preferido para el seguimiento global de la vegetación, ya que ayuda a compensar cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie sobre la cual se asientan las plantas, exposiciones y otros factores externos (EOS, 2019).

El índice de Vegetación de Diferencia Normalizada es una transformación que se realiza para caracterizar las cubiertas vegetales, reforzando la contribución espectral (Pinilla, 1995). Según EOS (2019) el NDVI se presenta con valores entre -1 y 1, donde los valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto. Los valores muy pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve. Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales.

El cálculo se realiza entre las bandas del Infrarrojo cercano y el rojo para ver la diferencia en la reflectancia de la clorofila en ambas bandas. La clorofila se asocia a la salud de la vegetación, esta absorbe una gran cantidad de luz visible y la estructura celular de las hojas

refleja intensamente la luz infrarroja cercana (EOS, 2019), lo que permite conocer cuando la planta se deshidrata o enferma.

El índice tiene ciertos problemas de aplicabilidad en áreas de escasa vegetación, Martín y Chuvieco (2001) expresan que el suelo descubierto altera la información que entrega la cubierta vegetal, por lo que sería difícil aplicar el índice en un área desértica, con muy poca vegetación o áreas descubiertas.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Para la elaboración estadística se utiliza la base de datos (BBDD) de CONAF sobre incendios forestales para la Región Metropolitana entre las temporadas de incendios 2010-2017 que contempla desde octubre 2010 hasta junio 2017. Contiene la ubicación geográfica del punto de inicio del incendio, superficie y variables meteorológicas con algunos datos incompletos.

La base de datos complementaria a los datos disponibles de CONAF para el periodo de estudio es extraída de la red de EMAS Agromet (2019) disponible en línea junto a sus coordenadas correspondientes.

El área quemada de la temporada es identificada a través del producto MCD64A1.006 MODIS Burned Area del catálogo libre disponible en Google Earth Engine cuya autoría es de Giglio, Justice, Boschetti y Roy (2015). Posee una resolución temporal mensual y una resolución espacial de 500 m.

Para el uso de suelo se dispuso del Catastro de uso de suelo y vegetación de CONAF (2013) adquirido en formato shape en IDE Chile para la Región Metropolitana a escala 1:30.000.

En relación al análisis de la vegetación se utilizan los datos del sensor Terra a bordo del satélite MODIS, cuyo producto MOD13Q1.006 (2015) tiene una resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 250 m.

3.2 Métodos

En primer lugar, se seleccionan las variables predictoras de la superficie de incendios en función de la literatura existente para incendios forestales del país según Ortiz en Dominguez (2016).

Se toma la BBDD de CONAF con sus respectivas coordenadas y se inserta en Arcmap para obtener la georreferenciación de los puntos de incendios forestales dejando fuera aquellos incendios que no poseen coordenadas. Luego, se exploran las Estaciones meteorológicas automáticas de la red Agromet (2019) disponibles para la Región Metropolitana dejando únicamente aquellas que tienen datos para la totalidad del periodo de estudio. Después se

obtienen las coordenadas via mail con la Coordinadora de Productos y Proyectos de la Sección de Emergencias y Gestión de Riesgos Agrícolas SEGRA del Ministerio de Agricultura. Finalmente se crea un nuevo shape de puntos con las coordenadas entregadas.

A través del método de Polígonos de Thiessen se extrae la estación meteorológica automática que tiene mayor influencia en cada punto de incendio, con la finalidad de completar los datos faltantes de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (Véase área de influencia en Anexo 1). Una vez teniendo la base de datos completa con la información de incendios forestales para la Región Metropolitana, se busca establecer relaciones entre las variables meteorológicas que influyen en el régimen de fuego.

3.2.1 Exploración de datos

Para iniciar el estudio se analiza la información pertinente relacionada a la cantidad de incendios, la superficie afectada en hectáreas y su respectivo porcentaje. Se hace uso de las herramientas de Microsoft office para la elaboración de tablas dinámicas. La primera de ellas contempla el universo completo de incendios, el segundo separa los datos en incendios menores a 200 Ha. y en incendios de magnitud, con el fin de ver cuáles afectan en mayor o menor medida a la Región Metropolitana.

3.2.2 Relaciones estadísticas

Este paso se realiza utilizando únicamente aquellos incendios que logran una superficie de 1 Ha. o más. La primera relación se establece a través de Spearman, que mide la correlación lineal entre dos variables sin importar la escala de medida (Santander Montes & Ruiz Vaquero, 2004), lo que lo hace perfecto para evaluar factores en diferentes unidades como son las distintas variables meteorológicas del estudio. A su vez, resulta inmune a datos extremos y muy alejados de la muestra (Ormeño Campos, 2016) es útil para el análisis de una mayor cantidad de datos (Siegel, 1972) en comparación a la correlación de Pearson.

Se escogen las variables de superficie de los incendios forestales, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento con su p-valor y correspondiente nivel de significancia.

Donde el p-valor, correlación o rho está dado por la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Y su nivel de significancia estadística por la fórmula:

$$t = \frac{\rho}{\sqrt{(1 - \rho^2)(n - 2)}}$$

El p-valor, si es mayor a 0 indicará que hay una relación directa, si es menor indicará una relación inversa y si es igual a 0 dirá que no hay relación entre las variables. El nivel de significancia entrega la información sobre si esta relación es estadísticamente significativa.

Luego, para predecir si las variables meteorológicas describen el área quemada y cuánto lo hacen, se aplica un modelo de regresión lineal múltiple para el periodo completo de estudio:

$$Y = a + b_{1x1} + b_{2x2} + \dots + b_{n \times n}$$

Este modelo facilita el estudio de las variables en su conjunto y, además, entrega el valor que cada variable tiene individualmente para explicar a la dependiente. Se aproxima más a situaciones reales las que, en palabras de Rodríguez-Jaume & Mora-Catalá (2001), deben ser explicados en la medida de lo posible, por la serie de variables que, directa o indirectamente, participan en su concreción.

Con el resultado del modelo, se pretende comparar la estimación del mismo con la verdadera superficie que posee el área quemada según algunos ejemplos reales de la base de datos corregida al inicio del proceso.

Finalmente, se presentan los datos en un gráfico de dispersión considerando las variables y el tamaño de los incendios forestales para poder explorar visualmente la tendencia de la superficie de los incendios en función de las variables meteorológicas.

3.2.3 Área quemada

En función del producto MODIS Burned Area se extraen las áreas quemadas entre el periodo 2016-2017 usando Earth Engine Code Editor, plataforma que permite procesar la imagen y obtener el delta para la serie temporal completa. Son seleccionados sólo aquellas áreas de 200 Ha. o más, exportadas en formato tiff y finalmente transformadas en polígonos para su posterior procesamiento.

3.2.4 Catastro de Uso de Suelo y Vegetación

La vegetación se evalúa superponiendo la información digital del Catastro a través del uso de ArcMap, cortando la información en función de los polígonos resultantes de las 4 principales áreas quemadas más grandes en la temporada de incendios 2016-2017. Se crea una nueva capa de información, se espacializa y calcula nuevamente la superficie afectada en hectáreas para evitar diferencias en los valores del catastro y las áreas quemadas.

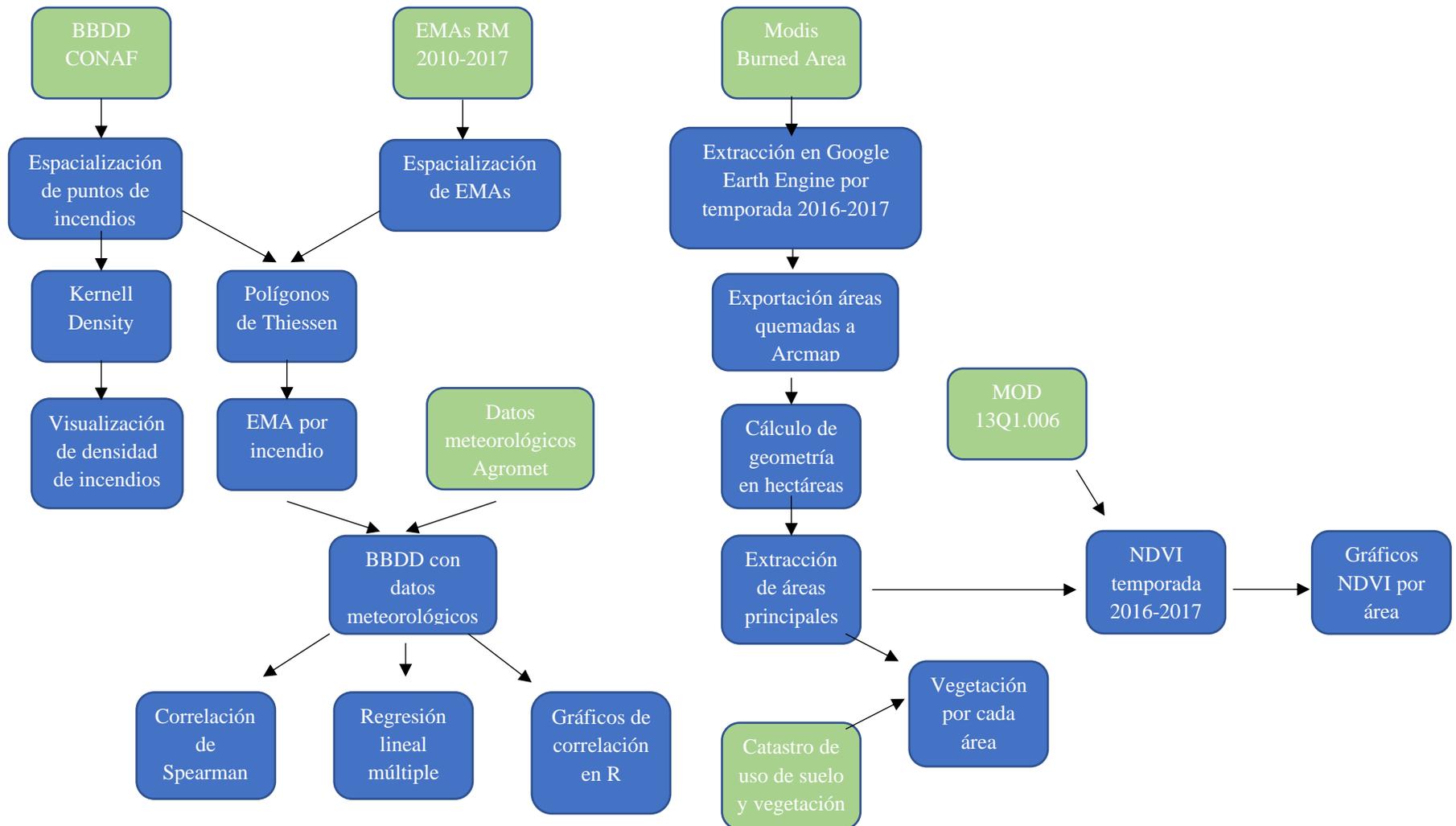
3.2.5 Vigor vegetacional

El valor del NDVI es estimado en función de los polígonos resultantes de las 4 áreas quemadas de mayor tamaño, los cuales son importados nuevamente en formato shape a la plataforma de Earth Engine Code Editor, el valor utilizado corresponde al promedio estimado

para cada zona. Se establece una numeración de las áreas y se extrae la serie temporal para cada uno de los polígonos en base al producto MOD13Q1.006 (Didan, 2015), exportando los datos y uniéndolos finalmente en una sola tabla. Se establecen gráficos de series temporales para mejorar la visualización de la información y observar su comportamiento bajo la presencia de los incendios forestales de la BBDD de CONAF que afectaron cada área quemada.

A continuación se encuentra la figuraFigura 3 con la síntesis metodológica en un esquema con todos los datos entregados anteriormente para facilitar su comprensión.

Figura 3: Síntesis metodológica



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Resultados generales

Para el periodo de estudio, se han registrado distintas cantidades de incendios forestales en la Región Metropolitana. La Tabla 2 contiene la información detallada de cuantos incendios se han registrado y la superficie quemada asociada a la temporada respectiva. Se puede observar que el 59% de las áreas quemadas se presentaron en el periodo 2016-2017, con tan solo 388 incendios forestales y que con una cifra mayor de eventos entre 2014-2015 sólo se quemó el 3% del total de temporadas analizadas. Lo anterior evidencia que no hay una relación directa entre cantidad de incendios y superficie quemada para la región.

Tabla 2: Incendios forestales para la Región Metropolitana en el periodo 2010-2017

Temporada de Incendio	N° de Incendios totales	Superficie quemada total (ha)	Porcentaje quemado
2010 – 2011	590	7.574	8%
2011 – 2012	293	1.293	1%
2012 – 2013	304	1.270	1%
2013 – 2014	339	21.260	24%
2014 – 2015	442	2.717	3%
2015 – 2016	272	2.680	3%
2016 – 2017	388	53.236	59%
Total del periodo	2.628	90.030	100%

Fuente: Elaboración propia

De un total de 2.628 incendios forestales 68 de estos caen en la clasificación de incendios de magnitud, quemando un total de 79.741 hectáreas, es decir, el 88,6% de la superficie afectada fue quemada por incendios de 200 Ha. o más. En la Tabla 3 se puede apreciar que la temporada con una mayor superficie quemada coincide con el mayor número de incendios forestales de magnitud en la Región Metropolitana. Así mismo, a pesar de existir una cantidad mucho mayor de incendios forestales normales (más de 2.000), en tan solo 68 incendios de magnitud la superficie quemada se supera con creces.

Tabla 3: Área quemada de Incendios forestales de magnitud y normales para la Región Metropolitana en el período 2010-2017

Temporada de Incendio	N° de Incendios de magnitud	Superficie quemada en incendios de magnitud (ha)	N° de incendios normales	Superficie quemada en incendios normales (ha)
2010 – 2011	13	5.341	577	2.233
2011 – 2012	1	255	292	1.038
2012 – 2013	0	0	304	1.270
2013 – 2014	11	20.404	328	856
2014 – 2015	4	1.641	438	1.076
2015 – 2016	5	1.425	267	1.255
2016 – 2017	34	50.675	354	2.561
Total del periodo	68	79.741	2.560	10.289

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se aprecian aquellos sectores del área de estudio donde se presentan la mayor cantidad de incendios forestales, en esta representación se ignora la superficie afectada por cada incendio. A grandes rasgos, se observa una mayor concentración de incendios alrededor de los centros poblados, lo que coincide con los datos sobre causas antrópicas de inicio del fuego para la Región Metropolitana. Existe una clara tendencia a concentrarse una gran cantidad de eventos en ciertos lugares, habiendo grandes áreas con una mínima densidad de incendios para el periodo completo de estudio (zonas en verde) y otros con una gran densidad (zonas más rojas).

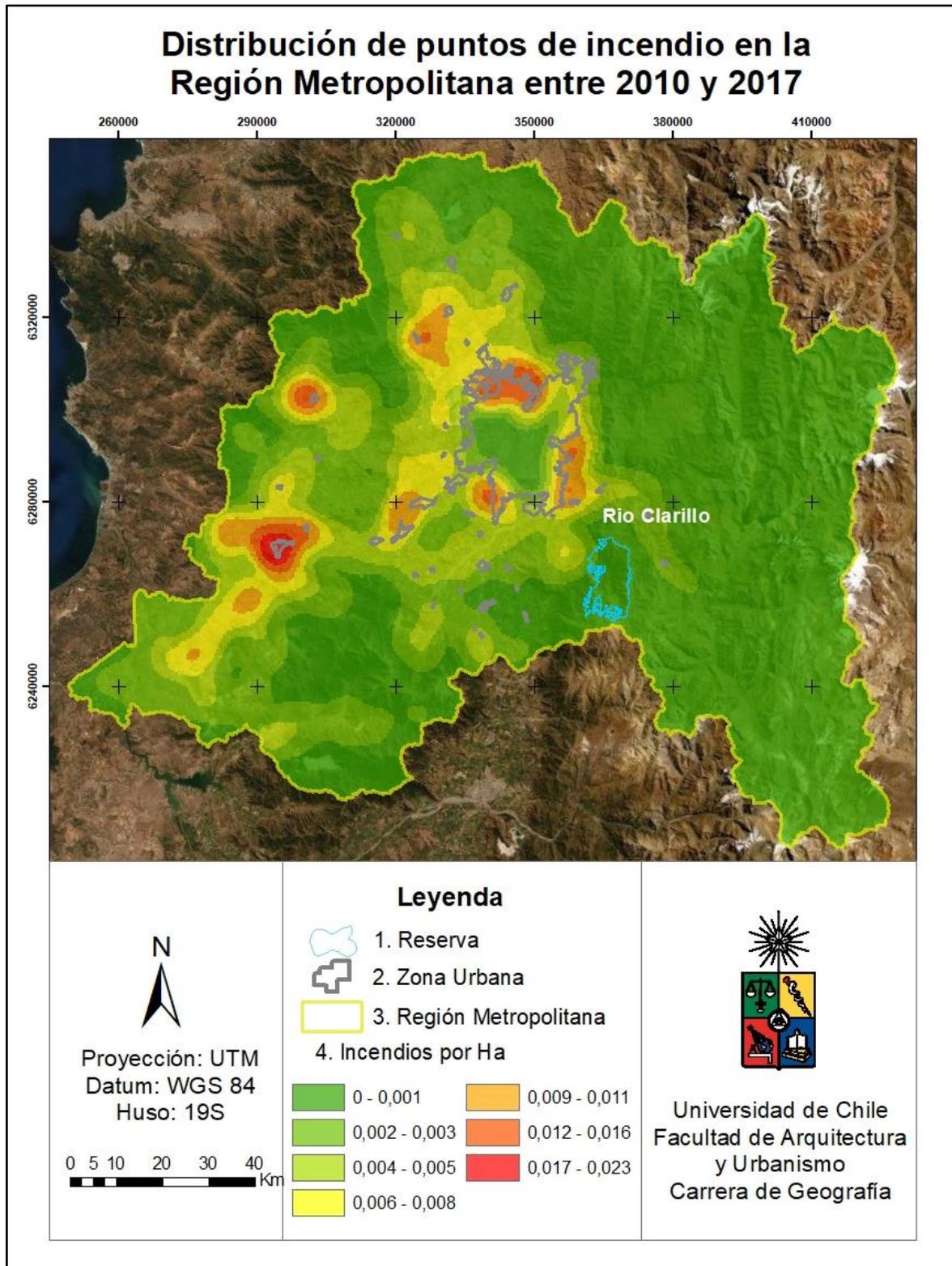


Figura 4: Distribución de incendios forestales en la Región Metropolitana entre 2010 y 2017

4.2 Relaciones entre superficie quemada y variables meteorológicas

En primer lugar, se establece el coeficiente de correlación lineal de Spearman (r) entre los incendios forestales (expresados en superficie quemada) con las variables meteorológicas (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa), en la Región Metropolitana. En la Tabla 4 se ven valores de r mayores a 0, explicando que los datos tienen una relación lineal, presentando valores positivos para la directa y negativos para la inversa. Se aprecian relaciones entre superficie quemada y las variables meteorológicas con valores absolutos de r menor a 0,7. Las relaciones son positivas (presentándose una relación lineal directa) entre superficie quemada, la temperatura y velocidad del viento y negativas (con una relación lineal inversa) entre la temperatura y humedad relativa. Para las variables meteorológicas la mejor relación se encuentra entre temperatura y humedad relativa con un coeficiente de correlación de -0,649, le sigue velocidad del viento con un valor de r de 0,285 y, finalmente, humedad relativa con velocidad del viento con una relación de -0,123.

La significancia corresponde al p-valor asociado a la correlación de Spearman para cada variable, en esta se observa que los valores de r altamente significativos corresponden a la relación de la temperatura, con humedad relativa y velocidad del viento. También se encuentra la velocidad del viento con la humedad relativa. Sin embargo, la única variable con un p-valor significativo en relación con la superficie quemada es la humedad relativa.

Tabla 4: Coeficientes de correlación (r) entre superficie quemada, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

	Superficie quemada	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento
Superficie quemada <i>Sign.</i>	1 > 0,05			
Temperatura <i>Sign.</i>	0,053 < 0,05	1		
Humedad relativa <i>Sign.</i>	-0,103 > 0,05	-0,649 < 0,05	1	
Velocidad del viento <i>Sign.</i>	0,063 > 0,05	0,285 < 0,05	-0,123 < 0,05	1

Fuente: Elaboración propia

Para continuar con el análisis estadístico de las variables meteorológicas sobre los incendios forestales se presenta un modelo de regresión lineal múltiple, tomando la superficie quemada de los incendios de variable dependiente y a las variables meteorológicas como independientes. Los valores que arroja el modelo se pueden observar en la Tabla 5 con un intervalo de confianza del 95%.

A modo general, el modelo tiene un p-valor de 0,019 resultando estadísticamente significativo. Las variables una a una poseen diferentes niveles de significación dentro de la regresión lineal siendo la velocidad del viento la única con un p-valor menor a 0,05. Las variables de temperatura y humedad relativa no explican, dentro de este modelo, la superficie del área quemada durante los incendios forestales para la Región Metropolitana. Lo anterior queda en evidencia al observar un valor de R^2 ajustado muy bajo, que explica solo el 0,53% de las áreas quemadas.

Tabla 5: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales en función de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento

Coeficientes:					
	Estimado	Error estd.	t valor	Pr(> t)	
(Intercepto)	101,946	167,710	0,608	0,543	
Temperatura	0,250	4,766	-0,052	0,958	
Humedad relativa	-2,674	1,728	-1,548	0,122	
Velocidad del viento	6,590	3,309	1,992	0,047	*
Código Sig: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05'.' 0,1 ' ' 1					
Residuos del error estándar: 547,7 en 1307 grados de libertad					
R^2 múltiple: 0,007582			R^2 ajustado: 0,005304		
p-valor: 0,01899					

Fuente: Elaboración propia

Poniendo a prueba el potencial predictivo del modelo de regresión lineal múltiple con las variables escogidas se elabora la ecuación que describe a la superficie quemada en los incendios forestales. Se escoge el punto de incendio de la comuna de Paine con fecha de inicio 15 de diciembre de 2010 de una superficie de 1 Ha.

$$\text{Superficie quemada} = 101,946 + (0,250 \times 24^\circ\text{C}) - (2,674 \times 38\% \text{ HR}) + (6,590 \times 6\text{km/h})$$

Tomando la ecuación anterior, el modelo estima una superficie quemada de 33,872 ha, donde la superficie real de este incendio es de 1 Ha., existiendo -32,872 residuos entre la predicción del modelo y la particularidad de este incendio forestal.

El segundo ejemplo corresponde al incendio iniciado en la comuna de Alhué con fecha 11 de junio de 2013, que cubrió una superficie de 20 Ha.

$$\text{Superficie quemada} = 101,946 + (0,250 \times 22^\circ\text{C}) - (2,674 \times 28\% \text{ HR}) + (6,590 \times 2\text{km/h})$$

El modelo estima una superficie quemada de 89,754 Ha., quedando -69,754 residuos entre la capacidad predictora del modelo y la realidad de superficie quemada en este incendio en particular.

En la Tabla 6 se despliegan los resultados del modelo de regresión lineal múltiple anterior sin la variable de temperatura. A nivel global el modelo sigue siendo estadísticamente significativo. Si bien aumenta el p-valor de la velocidad del viento, esta mantiene su significancia, a su vez, la humedad relativa se vuelve significativa. El R² ajustado muestra que el modelo explica el 0,6% de las áreas quemadas, mejorando levemente con respecto a la tabla anterior.

Tabla 6: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales en función de humedad relativa y velocidad del viento

Coeficientes:					
	Estimado	Error estd.	t valor	Pr(> t)	
(Intercepto)	93,624	54,174	1,728	0,084	.
Humedad relativa	-2,612	1,250	-2,089	0,037	*
Velocidad del viento	6,557	3,246	2,020	0,044	*
Código Sig: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residuos del error estándar: 574,4 en 1308 grados de libertad					
R ² múltiple: 0,00758			R ² ajustado: 0,006062		
p-valor: 0,006901					

Fuente: Elaboración propia

Se tiene entonces la ecuación para el modelo de regresión lineal múltiple que busca explicar la variación del área quemada de los incendios forestales en función de su relación con la humedad relativa y la velocidad del viento. Se toma de ejemplo nuevamente el incendio de Paine.

$$\text{Superficie quemada} = 93,624 - (2,612 \times 38\% \text{ HR}) + (6,577 \times 6\text{km/h})$$

El modelo estima una superficie quemada de 33,722 Ha. Sin embargo, el incendio en la realidad quemó solo 1 Ha., quedando -32,722 residuos del modelo. Si bien la diferencia entre la explicación del modelo y la realidad es menor, aún quedan más de 30 ha para el punto de incendio escogido.

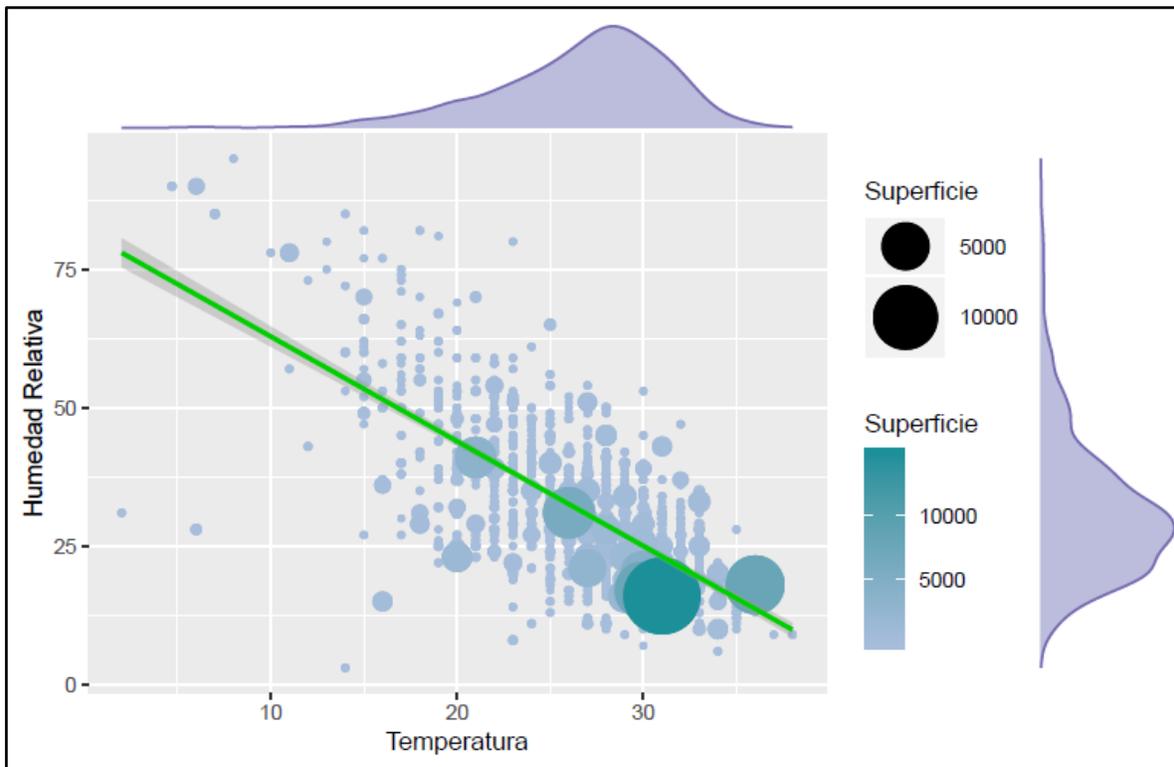
El segundo ejemplo, esta vez de un incendio que cubrió una superficie de 514 Ha. ocurrido el 26 de diciembre de 2015 en la comuna de Lampa.

$$\text{Superficie quemada} = 93,624 - (2,612 \times 25\% \text{ HR}) + (6,577 \times 7\text{km/h})$$

Para el caso anterior, el modelo refleja una predicción de la superficie de 74,363 Ha. resultando el cálculo en 439,637 residuos, una mayor diferencia que la encontrada en el ejemplo anterior de un incendio de menor tamaño.

Según la Figura 5, para la Región Metropolitana se reconocen relaciones entre la humedad relativa, temperatura y velocidad del viento en su incidencia en los incendios forestales. Es posible apreciar que la mayor cantidad de incendios son cercanos a 1 Ha., hay una relación negativa entre la humedad relativa y la temperatura, es decir, a mayor temperatura menor humedad relativa. Se observa un aumento significativo en la cantidad de incendios desde los 20 °C y un aumento de la superficie desde los 25 °C teniendo los mayores eventos sobre los 30 °C. Para el caso de humedad relativa, los incendios forestales van aumentando a medida que esta disminuye, existe un incremento tanto de incendios como de superficie de los mismos desde un 45% de humedad y al alcanzar el 18-19% se presentan los eventos de mayor magnitud para el periodo. A pesar que la mayoría de los incendios ocurren bajo condiciones similares, algunos focos de estos iniciaron bajo factores anormales como alta humedad o bajas temperaturas.

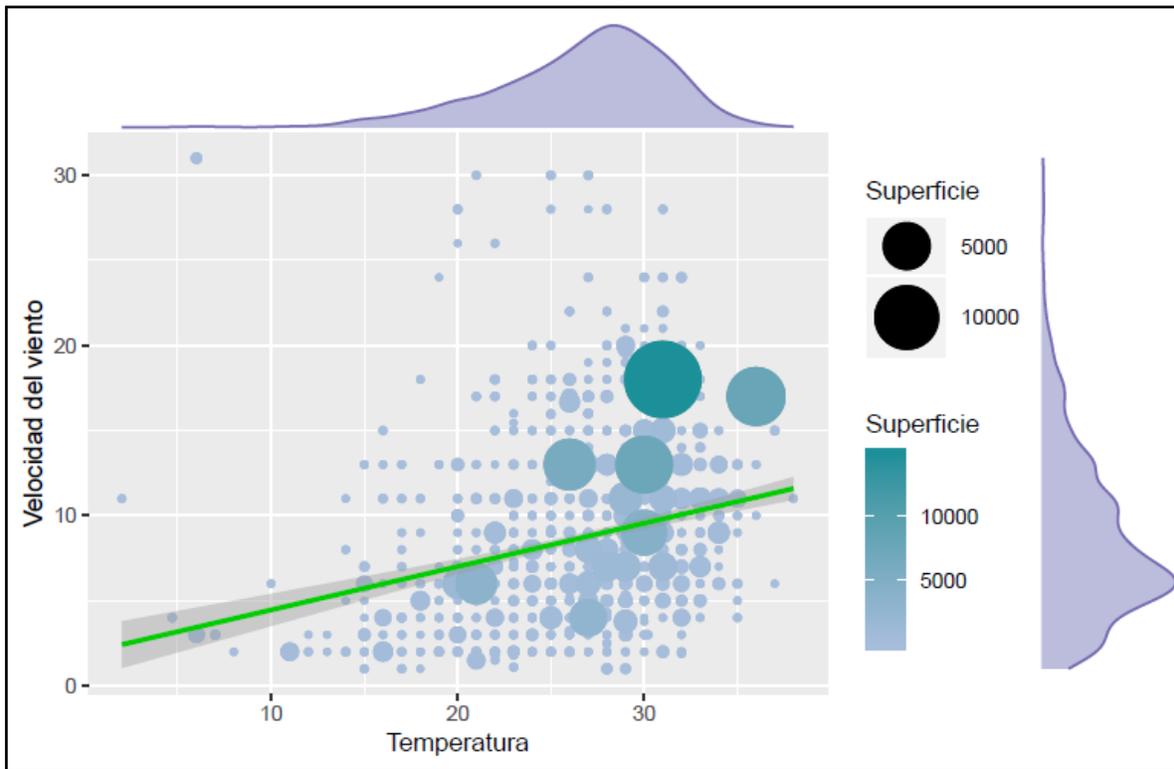
Figura 5: Superficie de incendios forestales en función de temperatura versus humedad relativa



Fuente: Elaboración propia

Para la Figura 6, correspondiente al diagrama de dispersión para las variables, se ve la relación entre temperatura y velocidad el viento, mostrándose un coeficiente de determinación de 6% (r de 0.244), mucho menor que en el gráfico anterior. Los incendios se concentra con una velocidad de 5 km/hr reduciendo gradualmente al aumentar la velocidad y disminuyendo su concentración al decrecer la variable. A pesar de disminuir la cantidad de incendios, por sobre los 10 km/hr es donde se presentan los eventos que abarcan una mayor superficie. Finalmente, la agrupación de los puntos de incendios se encuentra bastante lejos de la línea de tendencia, no se observa una relación tan fuerte como con la humedad relativa. Sin embargo, los otros p -value son menores, reflejándose en la dispersión de una gran cantidad de incendios alejados de la línea de tendencia que representa el modelo de regresión lineal.

Figura 6: Superficie de incendios forestales en función de temperatura versus velocidad del viento



Fuente: Elaboración propia

4.3 Relaciones entre superficie quemada de los incendios de magnitud y variables meteorológicas

A partir de la Tabla 7 se presentan los análisis correspondientes a los incendios forestales de magnitud para el periodo de estudio, es decir, que abarcan un área de al menos 200 Ha. Según el coeficiente de correlación r el factor que tiene mayor influencia o fuerza de correlación con la superficie de los incendios corresponde a la humedad relativa con un valor de $-0,334$ siendo la única variable estadísticamente significativa en relación a la superficie quemada. Le siguen sin significancia estadística, la temperatura con un valor de $0,220$ y finalmente la velocidad del viento con $0,184$. Todas las relaciones entre las variables meteorológicas son estadísticamente significantes, presentándose una mayor fuerza de correlación entre la temperatura y humedad relativa con $-0,595$ disminuyendo en comparación al coeficiente para la muestra de todos los incendios.

Si se comparan los resultados estadísticos de todos los incendios forestales versus los incendios forestales de magnitud para el periodo 2010-2017 mejoran las correlaciones

notablemente en todos los casos, a pesar que entre temperatura y humedad relativa es casi idéntico el valor de r.

Tabla 7: Coeficientes de Correlación para incendios forestales de magnitud entre superficie, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento

	Superficie	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento
Superficie <i>Sign</i>	1			
Temperatura <i>Sign</i>	0,220 > 0,05	1		
Humedad relativa <i>Sign</i>	-0,334 > 0,05	-0,595 < 0,05	1	
Velocidad del viento <i>Sign</i>	0,184 > 0,05	0,532 < 0,05	-0,376 < 0,05	1

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo la línea del análisis anterior se presenta el modelo de regresión lineal múltiple para los incendios forestales de magnitud en la Región Metropolitana, usando nuevamente la superficie de estos como variable dependiente y las variables meteorológicas como independientes. En la Tabla 8 se aprecian los valores que arroja el modelo con un intervalo de confianza del 95%

Es apreciable una significancia estadística del modelo con un p-valor de 0,02239 para una distribución normal con 64 grados de libertad. El valor de R^2 aumenta considerablemente respecto al universo de todos los incendios, explicando el 9,7% de las áreas quemadas. En términos parciales el valor de la distribución t con mayor peso es temperatura, seguido de humedad relativa con un p-valor de 0,279, y finalmente, el que menos representa al modelo por su bajo p-valor es la velocidad del viento que será removida en la próxima prueba buscando una posible mejora del modelo.

Tabla 8: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales de magnitud en función de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento

Coeficientes:					
	Estimado	Error estd.	t valor	Pr(> t)	
(Intercepto)	1678,680	2317,08	0,724	0,471	
Temperatura	-50,360	69,820	-0,721	0,473	
Humedad relativa	-27,840	25,500	-1,092	0,279	
Velocidad del viento	188,590	74,270	2,539	0,014	*
Código Sig: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residuos del error estándar: 2162 en 64 grados de libertad					
R ² múltiple: 0,1382			R ² ajustado: 0,09778		
p-valor: 0,02239					

Fuente: Elaboración propia

Cuando se pone a prueba el potencial predictivo de este modelo que considera únicamente los incendios de magnitud, se elabora también la ecuación que describe a la superficie quemada. Se utiliza como ejemplo un incendio de 856 Ha. ocurrido el 8 de noviembre de 2016 ocurrido en la comuna de Colina.

$$\text{Superficie quemada} = 1678,68 - (50,360 \times 27^{\circ}\text{C}) - (27,84 \times 35\% \text{ HR}) + (188,59 \times 6\text{km/h})$$

Al aplicar el modelo a este incendio en particular, predice que tiene una superficie de 476 Ha. bajo las condiciones meteorológicas que ocurrió, resultando en 380 residuos para este ejemplo.

Un segundo ejemplo para el modelo de regresión lineal múltiple exclusivo para incendios forestales de magnitud corresponde al incendio ocurrido el 3 de enero de 2014 en la comuna de Melipilla con una superficie afectada de 14.805 Ha.

$$\text{Superficie quemada} = 1678,68 - (50,360 \times 31^{\circ}\text{C}) - (27,84 \times 16\% \text{ HR}) + (188,59 \times 18\text{km/h})$$

Aquí, el modelo predice una superficie de 3.066 Ha. resultando en 11.739 residuos para el incendio desarrollado en condiciones de 31 °C, 16% de humedad relativa y con una velocidad del viento de 18 km/h.

Al remover la variable meteorológica de temperatura de la Tabla 9 el valor de R² ajustado indica que el modelo representa el 10,4% de la varianza de superficie de los incendios, valor mayor que en modelo anterior. El p-valor para humedad relativa aumenta en casi 0,2 y el mismo estadístico para velocidad del viento lo hace en 0,01 aproximadamente. El modelo completo mejora su significación estadística con un p-valor de 0,01036. Sin embargo, la humedad relativa no presenta suficiente significancia dentro del modelo como en los ejemplos anteriores

Tabla 9: Regresión lineal múltiple para la superficie de incendios de magnitud en función de humedad relativa y velocidad del viento

Coeficientes:	Estimado	Error estd.	t valor	Pr(> t)	
(Intercepto)	180,520	1021,350	0,176	0,861	
Humedad relativa	-16,380	19,880	-0,824	0,413	
Velocidad del viento	166,380	67,330	2,471	0,020	*
Código Sig: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
Residuos del error estándar: 2154 en 65 grados de libertad					
R ² múltiple: 0,1312			R ² ajustado: 0,1044		
p-valor: 0,01036					

Fuente: Elaboración propia

Esta vez, se ocupan exactamente los mismos ejemplos que en modelo anterior, buscando evaluar si la predicción mejora. En primer lugar, se encuentra el incendio de Colina con una superficie de 856 Ha.

$$\text{Superficie quemada} = 180,520 - (16,380 \times 35\% \text{ HR}) + (166,380 \times 6\text{km/h})$$

El modelo aplicado al ejemplo anterior predice una superficie quemada de 605,5 Ha. bajo las condiciones meteorológicas en que ocurrió, resultando en 250,5 residuos para este ejemplo.

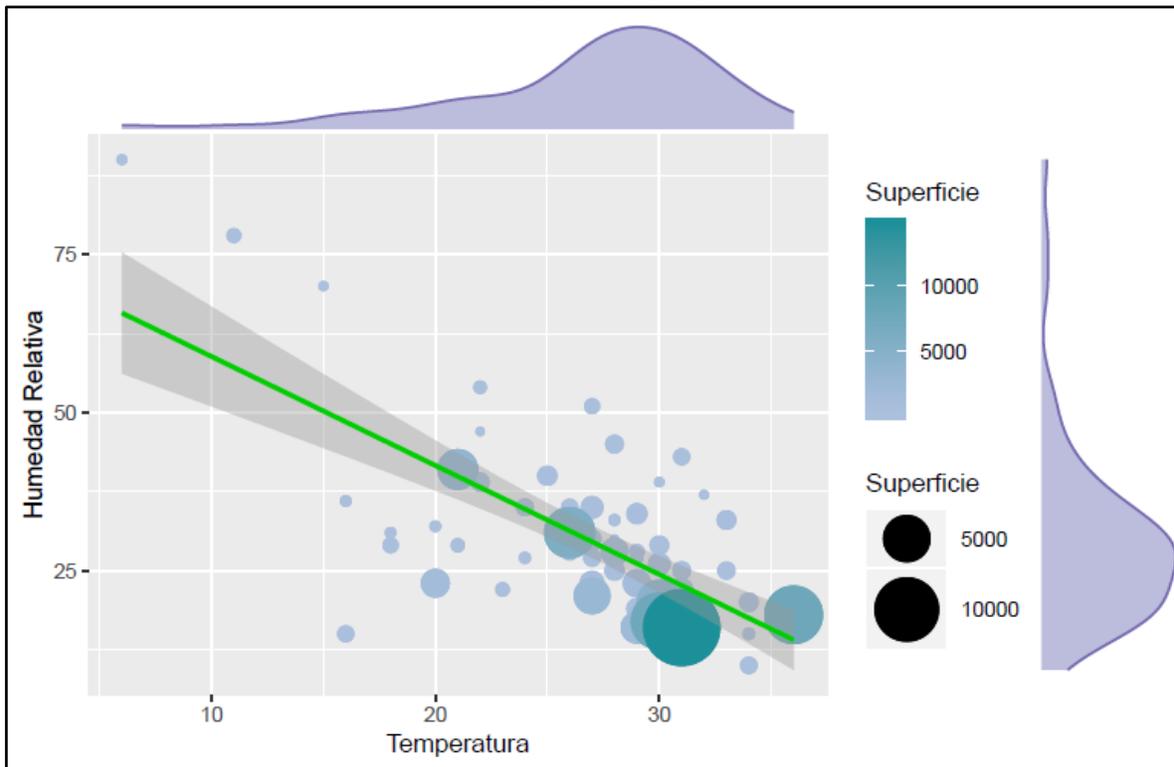
El segundo ejemplo corresponde al incendio ocurrido en la comuna de Melipilla que afecta a una superficie de 14.805 Ha.

$$\text{Superficie quemada} = 180,520 - (16,380 \times 16\% \text{ HR}) + (166,380 \times 18\text{km/h})$$

El modelo aplicado anteriormente predice una superficie quemada de 2.913 Ha, resultando en 11.891 residuos. En ambos ejemplos se obtienen resultados diferentes, ya que en el primero se obtienen menos residuos y en el segundo más.

En la Figura 7 se observa una mayor concentración de incendios forestales hacia la línea de tendencia del modelo, ubicándose aquellos eventos que cubrieron una mayor superficie desde los 25 °C. Para el caso de la humedad relativa, los primeros eventos de mayor área inician bajo el 47-48%, mostrando otro aumento significativo entre el 30-31% y, teniendo los mayores incendios en el umbral del 19-20% de humedad. En cuanto a la cantidad de incendios forestales de magnitud para el periodo de estudio, se puede ver que coincide el aumento de estos con una temperatura sobre los 25°C y con una humedad relativa menor al 47-48%. Sin embargo, siguen desarrollándose eventos con variables anormales, aunque en menor cantidad que considerando a la totalidad de los incendios forestales registrados durante el periodo de estudio.

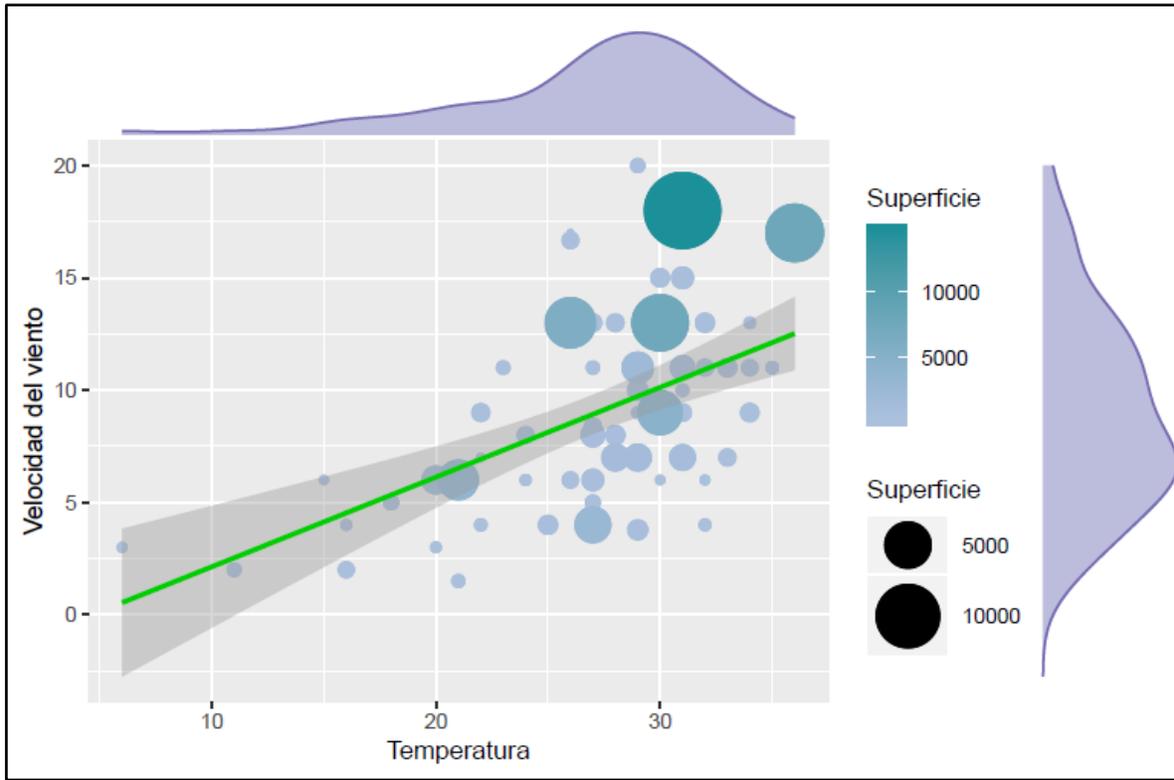
Figura 7: Superficie de incendios forestales de magnitud en función de temperatura versus humedad Relativa



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta la Figura 8 donde, a simple vista es posible evidenciar que hay una mayor dispersión de los eventos en relación a la línea de tendencia que con la humedad relativa. Si bien no hay una disposición tan clara, los incendios forestales de magnitud aumentan a mayor velocidad del viento. Cercano a los 10km/hr se comienzan a ver los primeros focos de mayor área, aumentando nuevamente desde 13km/hr y teniendo la mayor superficie con 18km/hr. El *peak* de cantidad de incendios registrados sucede entre los 6 y 7km/hr. Finalmente, a raíz de lo anterior se hace destacable que en la Región Metropolitana existen incendios forestales de magnitud con velocidades inferiores a los 30km/hr, cifra en la cual no se registran eventos de esta categoría.

Figura 8: Superficie de incendios forestales de magnitud en función de temperatura versus velocidad del viento



Fuente: Elaboración propia

4.4 Detección de áreas quemadas

Considerando el producto MODIS para áreas quemadas y aplicando el delta entre el periodo para cada temporada, se extraen los polígonos de aquellas zonas que fueron afectadas por algún incendio forestal.

En la Figura 9 se aprecian todas las áreas afectadas por incendios forestales según el análisis satelital entre los meses de agosto de un año y otro. En total se quemaron 45 zonas dentro de la Región Metropolitana con un total de 29.418 Ha. y un promedio por incendio de 654 Ha. Las principales áreas quemadas son cuatro: La Tetilla, Talami Sur, Alto Jahuel y Cerro Gacel.

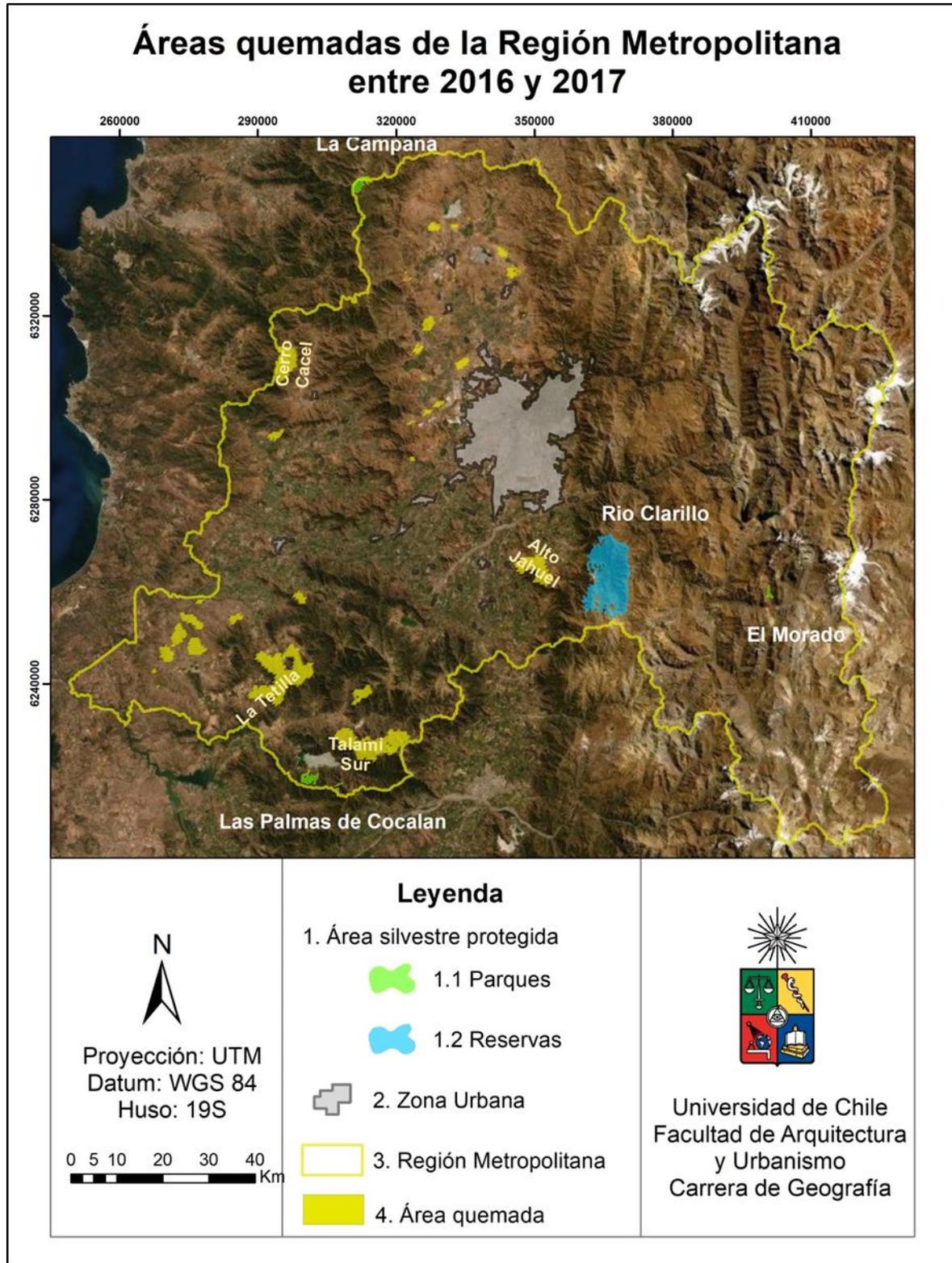
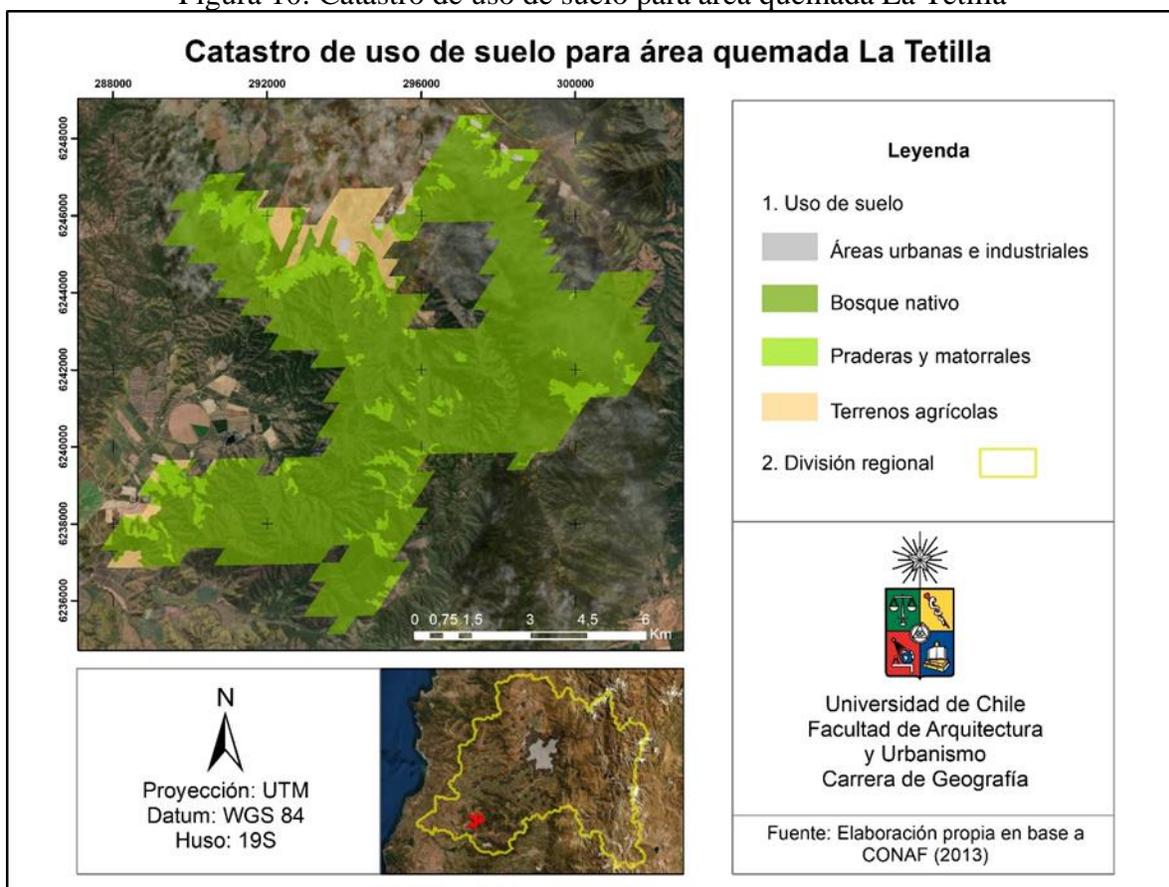


Figura 9: Áreas quemadas de la Región Metropolitana entre 2016 y 2017

4.5 Uso de suelo afectado por los incendios

El área quemada La Tetilla se encuentra en el área sur poniente de la Región Metropolitana, posee una superficie total de 7.964 Ha. Según la figura 9 y el catastro de usos de suelo (CONAF, 2013), en su interior se encuentran cuatro tipos de usos de suelo: áreas urbanas e industriales, bosques nativos, praderas y matorrales y terrenos agrícolas.

Figura 10: Catastro de uso de suelo para área quemada La Tetilla

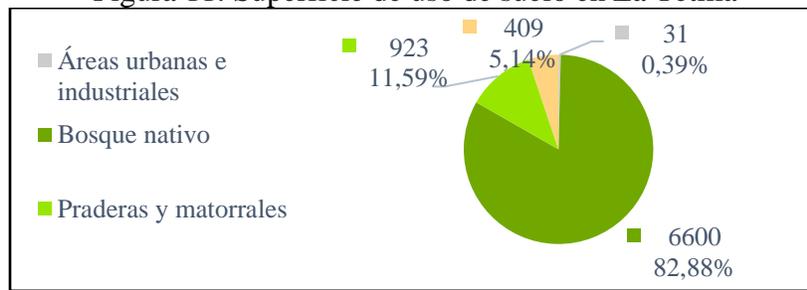


Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2013)

Es posible ver tanto en la figura 9 como en la figura 10 que la mayor cantidad de superficie quemada en esta área según el catastro de usos de suelo y vegetación (2013) corresponde a bosque nativo, abarcando el 83% de la misma, le sigue en menor medida praderas y matorrales con el 12% y terrenos agrícolas con el 5%.

La zona quemada, posee un relieve que puede dificultar el acceso para el ataque del fuego y así facilitar su propagación, además, se encuentra cercano a sectores de uso humano, como las áreas urbanas e industriales y los terrenos agrícolas.

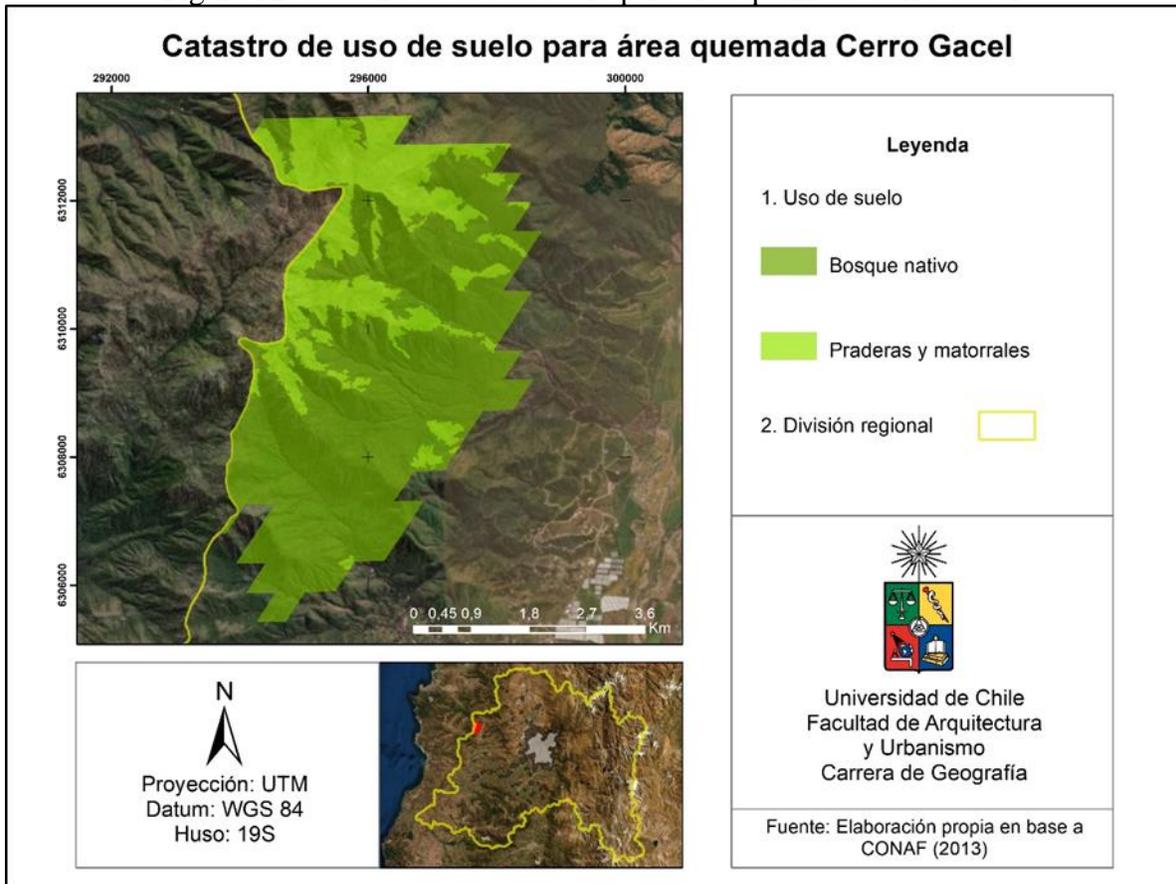
Figura 11: Superficie de uso de suelo en La Tetilla



Fuente: CONAF (2013)

El área quemada Cerro Gacel se ubica en el sector nor poniente de la Región Metropolitana colindando con la Región de Valparaíso, tiene una superficie de 2.368 Ha y es parte de una zona afectada por los incendios de la región vecina. Según la figura 11 posee 2 tipos de usos de suelo en su interior: bosque nativo y praderas y matorrales.

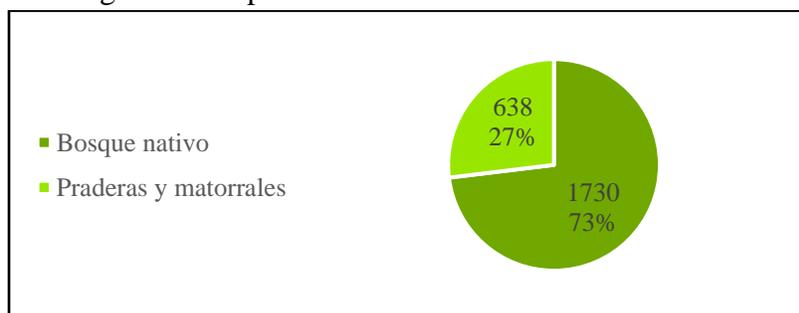
Figura 12: Catastro de uso de suelo para área quemada Cerro Gacel



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2013)

Es posible ver tanto en la figura 11 como en la 12, que la mayor cantidad de superficie del área corresponde a bosque nativo abarcando el 73% seguido de praderas y matorrales con el 27%.

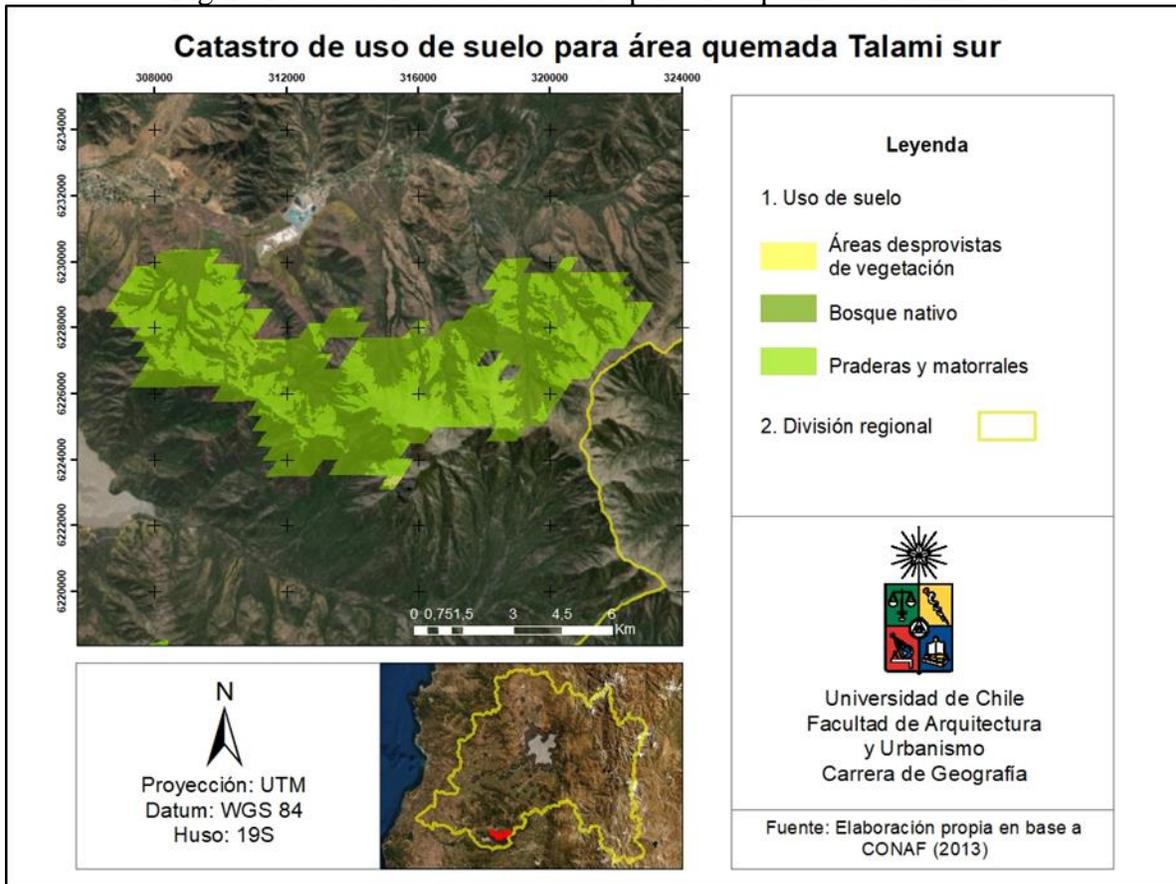
Figura 13: Superficie de uso de suelo en Cerro Gacel



Fuente: CONAF (2013)

El área quemada Talami sur se encuentra en la zona sur de la Región Metropolitana, tiene una superficie de 5.987 Ha. Según la figura 13 y el catastro de usos de suelo (CONAF, 2013), en su interior se encuentran tres tipos de uso de suelo: áreas desprovistas de vegetación, bosque nativo y praderas y matorrales.

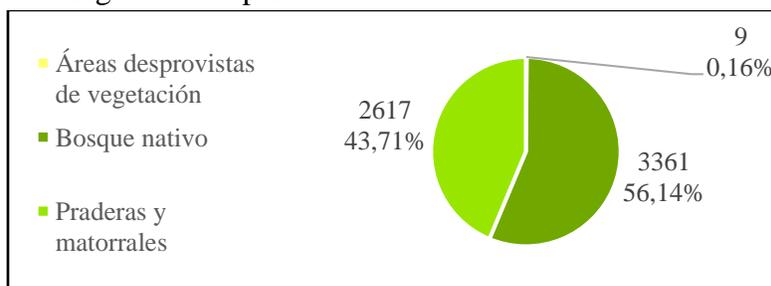
Figura 14: Catastro de uso de suelo para área quemada Talami sur



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2013)

En la figura 14 es posible apreciar que la superficie de bosque nativo, con un área de 3.361 Ha cubre el 56% de Talami sur, seguido de praderas y matorrales con un 44%, finalmente se encuentran las áreas desprovistas de vegetación con tan solo 9 Ha. o un 0,16%.

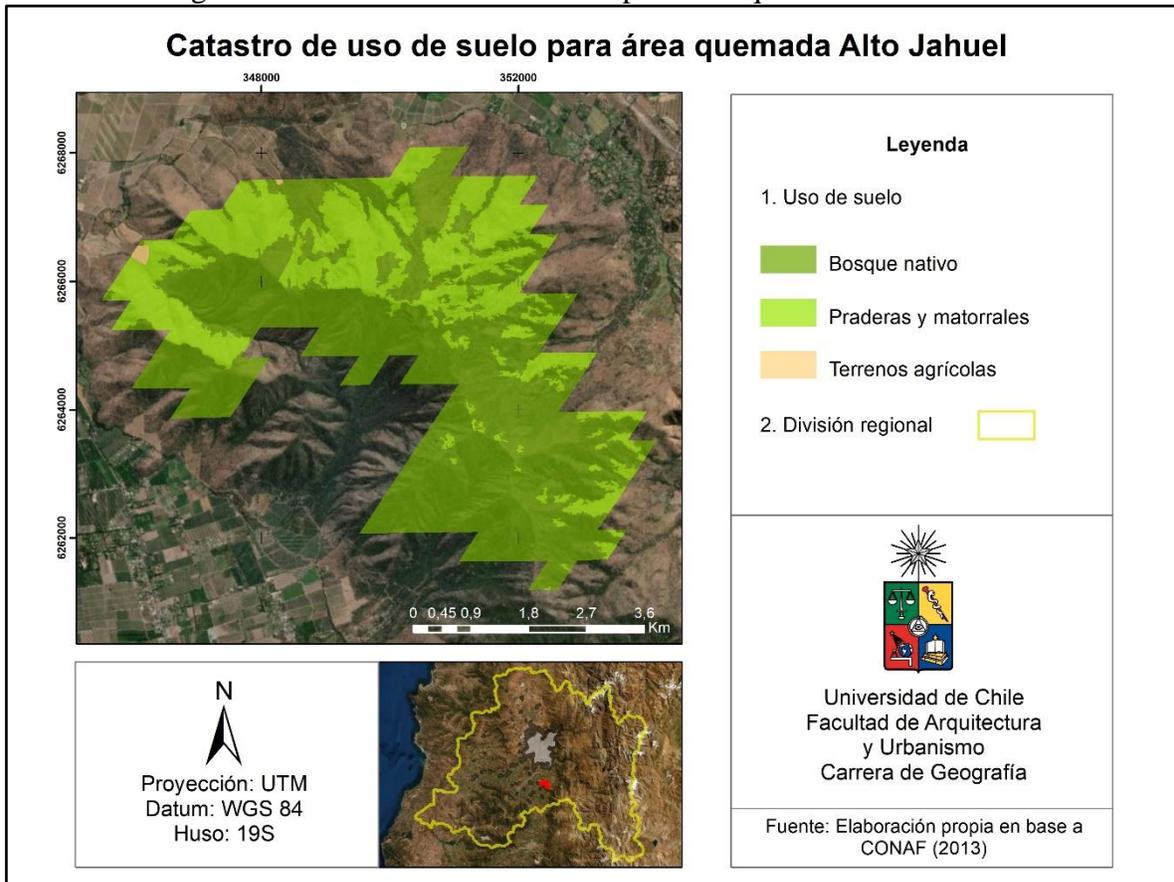
Figura 15: Superficie de uso de suelo en Talami sur



Fuente: CONAF (2013)

El área quemada Alto Jahuel se encuentra ubicada al sur del casco urbano de Santiago con una superficie de 2.831 Ha. Según la figura 15 y el catastro de usos de suelo (CONAF, 2013), en su interior se encuentran tres tipos de usos de suelo: bosque nativo, praderas y matorrales y terrenos agrícolas.

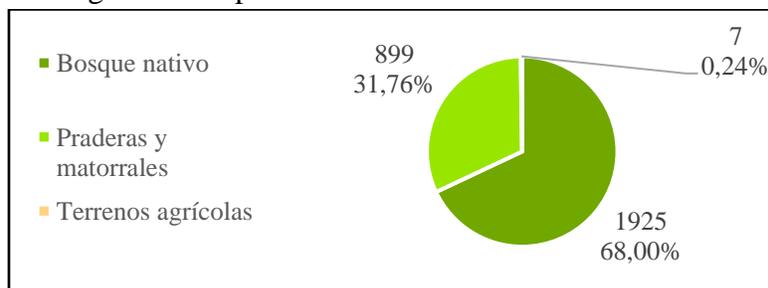
Figura 16: Catastro de uso de suelo para área quemada Alto Jahuel



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2013)

En la figura 16 es posible apreciar que la superficie de bosque nativo, con un área de 1.925 Ha. cubre el 68% de Alto Jahuel, seguido de praderas y matorrales con un 32%, finalmente se encuentran los terrenos agrícolas representando menos del 1% del área con tan solo 7 Ha.

Figura 17: Superficie de uso de suelo en Alto Jahuel



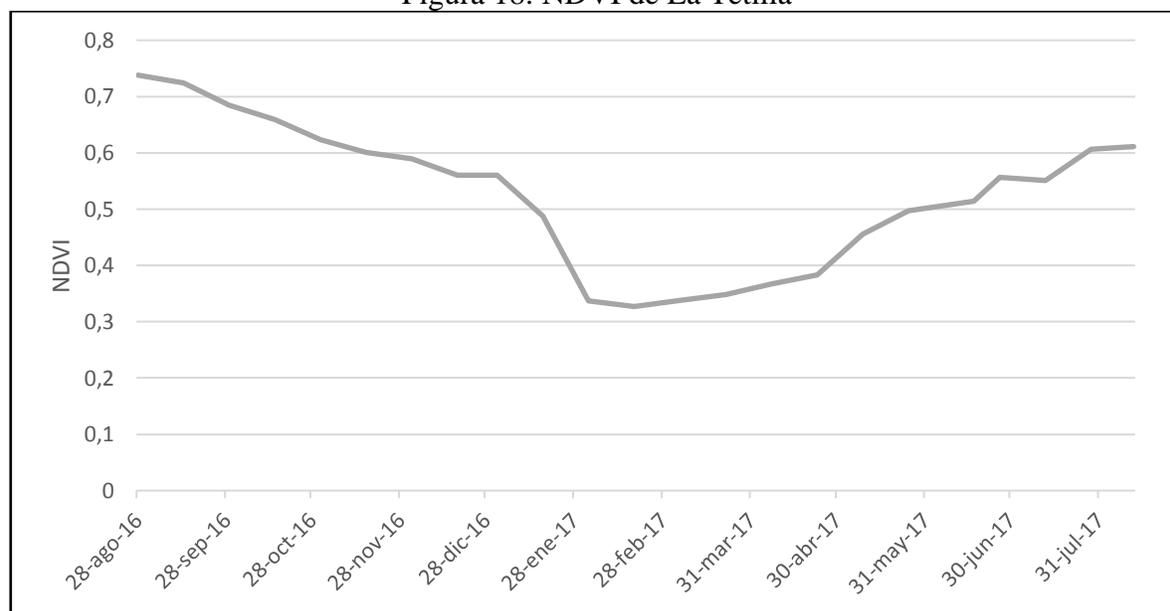
Fuente: CONAF (2013)

4.6 Vigor vegetacional en áreas quemadas

4.6.1 La Tetilla

La Tetilla corresponde a la zona de mayor superficie quemada de la Región Metropolitana para el periodo de incendios 2016-2017. Durante la temporada húmeda, o de recuperación, en agosto de 2016 presenta valores de NDVI cercanos a 0,8 que disminuyen constantemente hasta llegar a enero de 2017, fecha que coincide con el mayor incendio forestal ocurrido en el sector, el cual quemó un área de 7.981 Ha. el 17 de enero exactamente. Luego del episodio anterior, no se suceden más incendios forestales en el lugar que afecten la zona, y a pesar de eso, no se logra una total recuperación de la vegetación, llegando únicamente a un NDVI de 0,6 para fines de julio de 2017.

Figura 18: NDVI de La Tetilla



Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Cerro Gacel

El área quemada Cerro Gacel cuenta con una superficie de 2.459 Ha. y colinda con la Región de Valparaíso. Según la figura 18, en agosto de 2016 la zona presenta su mayor vigor vegetacional con un NDVI de 0,7 el cual desciende lentamente hasta el episodio de incendio forestal ocurrido en enero de 2017 provocando que la vegetación del sector se vea afectada hasta alcanzar un índice cercano a 0,2. El incendio anterior cubre una superficie de 5.905 Ha. afectando no sólo a la Región Metropolitana, sino también a la Región de Valparaíso evitando que la vegetación recupere su vigor inicial terminando con un NDVI de 0,5 al final del periodo.

Figura 19: NDVI de Cerro Gacel

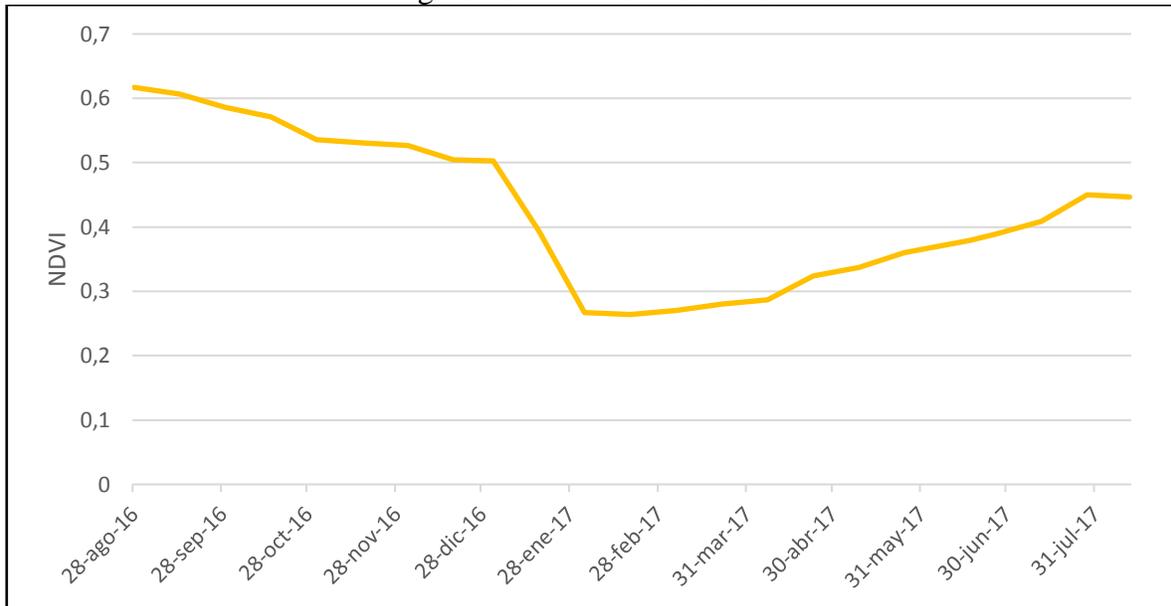


Fuente: Elaboración propia

4.6.3 Talami sur

El área quemada Talami sur cuenta con una superficie de 5.987 Ha. y se encuentra ubicada al sur de la Región Metropolitana. Según la figura 19, en agosto de 2016 la zona posee el mayor vigor vegetacional con un NDVI de 0,6 el cual disminuye naturalmente hasta el episodio de incendio forestal ocurrido en enero de 2017, gracias a este evento la vegetación del sector bordea un NDVI de 0,3. El incendio anterior cubre una superficie de 7.607 Ha. el cual afecta también a la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y afecta de tal forma la vegetación de esta área que su vigor vegetacional no logra alcanzar la del inicio del año, logrando una recuperación hasta un NDVI de casi 0,5 para julio de 2017.

Figura 20: NDVI de Talami sur

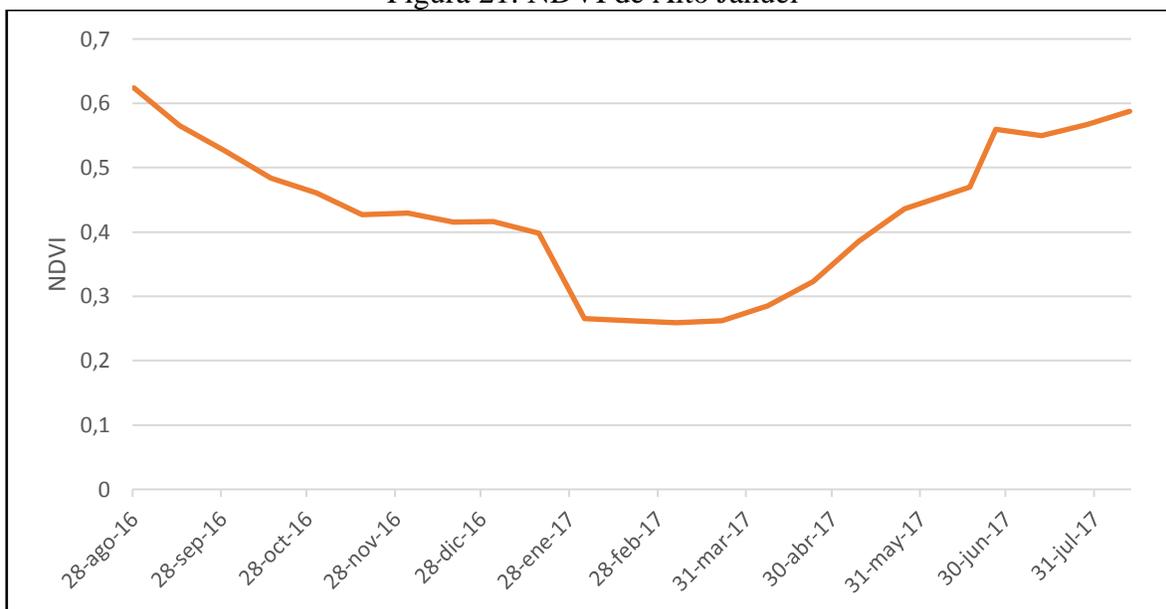


Fuente: Elaboración propia

4.6.4 Alto Jahuel

El área quemada Alto Jahuel cuenta con una superficie de 2.831 Ha. y se encuentra al sur del área urbana de la Región Metropolitana. Según la figura 20, en agosto de 2016 la zona presenta un alto vigor vegetacional con un NDVI de 0,6 el cual desciende lentamente hasta el incendio forestal ocurrido en enero de 2017 provocando que la vegetación del sector se vea afectada hasta alcanzar un índice cercano a 0,3. El incendio anterior cubre una superficie de 4.419 Ha. un tamaño superior al del área quemada. Sin embargo, de todas las áreas quemadas usadas de ejemplo, esta es la única que logra alcanzar la recuperación del vigor vegetacional del inicio del periodo, volviendo a un NDVI de 0,6 para julio de 2017.

Figura 21: NDVI de Alto Jahuel



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Es conocido desde el lenguaje cotidiano de los últimos años que el cambio climático está presente en nuestra realidad y que puede traer grandes consecuencias para todos los que habitamos el planeta, con pérdida de la biodiversidad, disminución de las precipitaciones, un aumento de la temperatura global, escasez de agua dulce, entre otros. Todos estos, factores que contribuyen a la intensidad de los incendios forestales dentro de todo el planeta, sin embargo, pueden modificar la conducta, más no, provocar su inicio dentro de Chile.

Relaciones estadísticas para el periodo 2010-2017

Los incendios forestales de la Región Metropolitana están en constante aumento a pesar de las políticas existentes por parte de CONAF para prevenir y controlar los episodios de fuego dentro de todo el territorio nacional. Si bien existe una gran cantidad de incendios iniciados, los más importantes, debido a la superficie que afectan, son los incendios de magnitud.

La mayor concentración de incendios forestales de la Región Metropolitana se asocia a centros poblados, carreteras y lugares de tránsito de personas, lo que coincide directamente con las estadísticas sobre causalidad de estos, donde el 99% son de origen antrópico (CONAF, 2018).

Humedad relativa, temperatura y velocidad del viento son las variables meteorológicas que se asocian al comportamiento de los incendios, se omite la precipitación por el hecho de no existir durante la temporada estudiada para la Región Metropolitana. Es posible observar que todas las variables tienen una fuerte correlación entre sí, pero la única con una relación estadísticamente significativa en función de la superficie de los incendios resultó ser la humedad relativa, esta, en ausencia de precipitaciones influye directamente en la humedad que pueda tener el material combustible y podría por ende, influir en la propagación de los incendios forestales. A pesar que la literatura menciona las demás variables meteorológicas como importantes, en el caso particular de la Región Metropolitana para el periodo estudiado parece no resultar tal.

Ahondando aún más, se complejizó el análisis estadístico, donde el modelo de regresión lineal múltiple para la superficie de incendios forestales en función de las variables temperatura, humedad relativa y velocidad del viento arrojó diferencias con la correlación de Spearman, donde esta vez la velocidad del viento fue estadísticamente significativa explicando menos del 1% de la superficie quemada por incendios forestales con una predicción real del modelo demasiado baja. Al dejar de lado la variable menos significativa el modelo mejora haciendo que humedad relativa y velocidad del viento sean estadísticamente significativas, pero sigue sin explicar más del 1% de la superficie quemada.

En términos generales la mayoría de los incendios forestales ocurridos entre 2010 y 2017 son cercanos a 1 Ha., existiendo un aumento de estos cuando se supera el umbral de los 20 °C y

aumentando la superficie afectada sobre los 25 °C con un *peak* pasando los 30 °C, esto último coincide con la teoría del 30/30/30. A su vez, a menor humedad relativa se tuvieron más incendios, logrando eventos de mayor magnitud entre el 18% y 19%. Sin embargo, debido al factor antrópico se siguen desarrollando incendios bajo condiciones anormales de alta humedad o bajas temperaturas.

Al realizar la correlación de Spearman únicamente con los incendios de magnitud de la Región Metropolitana se obtuvo que la relación entre temperatura con humedad relativa y velocidad del viento se mantuvo estadísticamente significativa con un aumento en la fuerza de la relación entre temperatura y velocidad del viento. A su vez, la variable estadísticamente significativa con relación a la superficie afectada por incendios pasó de ser temperatura, para el caso anterior, a ser humedad relativa con una relación inversa.

Realizando el modelo de regresión lineal múltiple de incendios de magnitud con un intervalo del 95% de confianza se obtuvo una explicación del 9,7% de las áreas quemadas en función de las variables meteorológicas escogidas teniendo solo velocidad del viento como una estadísticamente significativa. Se prueba nuevamente el modelo removiendo la temperatura logrando que el modelo describa el 10,4% de la superficie quemada de los incendios forestales de magnitud para la Región Metropolitana entre el periodo 2010-2017.

Superando el umbral de los 25 °C se encuentran los incendios forestales con mayor superficie quemada. En cuanto a humedad relativa los primeros incendios ocurren bajo el 47-48% y vuelven a aumentar bajo el 19-20%. Finalmente, los incendios de mayor superficie se encuentran sobre los 25 °C con una humedad relativa menor al 50%. Se puede ver una relación entre las variables meteorológicas con los incendios de magnitud mucho más evidente que con incendios de menor tamaño.

Temporada de incendios forestales 2016-2017, usos de suelo y NDVI

Dentro de esta temporada se quemaron 45 zonas según el análisis del sensor MODIS y se escogieron las 4 de mayor tamaño para conocer con exactitud su uso de suelo y recuperación post incendio, las áreas se denominaron según topónimos cercanos como: La Tetilla, Cerro Gacel, Talami sur y Alto Jahuel.

La Tetilla cuenta con un 83% de bosque nativo, 12% de matorrales y un 5% de terrenos agrícolas, en una zona de un relieve que podría dificultar el combate del incendio. Se enfrenta a un gran incendio en enero de 2017 afectando el vigor vegetacional hasta tener un índice mínimo de 0,3 sin lograr recuperar el NDVI que el área quemada tenía previo al incendio durante la temporada húmeda pasando de 0,7 en 2016 a 0,6 al año siguiente.

Cerro Gacel cuenta con un 73% de bosque nativo y un 27% de praderas y matorrales (CONAF, 2013), colinda con la Región de Valparaíso y fue afectada por un gran incendio forestal en enero de 2017 disminuyendo el vigor vegetacional hasta alcanzar un índice de 0,2,

en cuanto a la recuperación el área comenzaba con un NDVI de 0,7 en 2016 para finalizar con 0,5 al siguiente año.

Talami sur cuenta con un 56,14% de bosque nativo., 43,71% de praderas y matorrales y un 0,16% de áreas desprovistas de vegetación (CONAF, 2013). El área se ve afectada por un incendio forestal en enero de 2017 logrando disminuir el vigor vegetacional hasta alcanzar un índice de 0,3, esta zona tampoco alcanza a lograr la recuperación de la vegetación luego del incendio, pasando de tener un NDVI de 0,6 en 2016 a bordear 0,4 en el año siguiente.

Alto Jahuel cuenta con un 68% de bosque nativo, 31,76% de praderas y matorrales y un 0,24% de terrenos agrícolas (CONAF, 2013). Se ve afectada por un incendio forestal en enero de 2017 el cual afecta la vegetación hasta alcanzar un índice cercano a 0,3. Esta área es la única que logra recuperar al final del año 2017 el vigor vegetacional del año anterior, volviendo a un NDVI de 0,6.

A pesar que las áreas quemadas tienen una composición similar en cuanto a vegetación y fueron afectadas por incendios de magnitud en la misma época, la última de ellas, Alto Jahuel es la única que logra una recuperación del vigor vegetacional existente previo al episodio de incendio. La tendencia del NDVI de las áreas quemadas que se explicaron durante este trabajo se podría explicar gracias a que en su mayoría las zonas estaban compuestas por bosque nativo, material que es mucho más difícil de quemar que las especies introducidas en el país para el negocio de las empresas forestales, esto también podría explicar que la mayoría de las áreas quemadas no sean de gran tamaño.

Según las proyecciones que se tienen sobre el cambio climático y la interacción humana con la naturaleza que menciona Peña (2003), se espera que los incendios sean cada vez más extremos y frecuentes, facilitando la continuidad del material combustible.

BIBLIOGRAFÍA

- Agromet. (12 de Marzo de 2019). *Reportes históricos*. Obtenido de <https://www.agromet.cl/reportes-historicos>
- Alvarez, G. (2008). BASES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE PATRULLAJE TERRESTRE EN UN SECTOR DE LA PRECORDILLERA DE LA REGIÓN METROPOLITANA. *Memoria para optar al Título de Profesional de Ingeniero Forestal*. Santiago, Chile.
- Barros, A., & Pereira, J. (2014). Wildfire Selectivity for Land Cover Type: Does Size Matter? *PLoS ONE*, 9(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084760>
- BCN. (18 de Marzo de 2019). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region13/>
- Carmona, A., González, M., Nahuelhual, L., & Silva, J. (2012). Spatio-temporal effects of human drivers on fire danger in Mediterranean Chile. *Bosque*, 33(3), 321-328.
- Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(3), 44-53.
- CEHU - Minvu, Depto. de Geografía INE. (2018). *Metodología para medir el Crecimiento Urbano de las Ciudades de Chile*. Santiago.
- CONAF. (2003). *Informe Temporada 2002 - 2003. Volumen 1, Regiones III, IV, V RM. Documento de Trabajo N° 379*. Santiago, Chile: Departamento de Manejo del Fuego.
- CONAF. (Enero de 2010). Los Grandes Incendios Forestales en Chile 1985 - 2009. *Documento de Trabajo 539*.
- CONAF. (2013). *Catastros de uso de suelo y vegetación*. Obtenido de <http://www.ide.cl/descarga/capas/item/catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion.html>
- CONAF. (2018). *Estadísticas - Causas según Ocurrencia de Incendios Forestales 1987 - 2018*. Obtenido de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>
- CONAF. (2019a). *CONAF*. Obtenido de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/deteccion-de-incendios-forestales/>
- CONAF. (2019b). *Sistema de Información Territorial*. Obtenido de https://sit.conaf.cl/tmp/obj_10365/1929_Superficies%20Catastros%20Usos%20de%20Suelos%20y%20recursos%20vegetacionales%20Abril2018.pdf

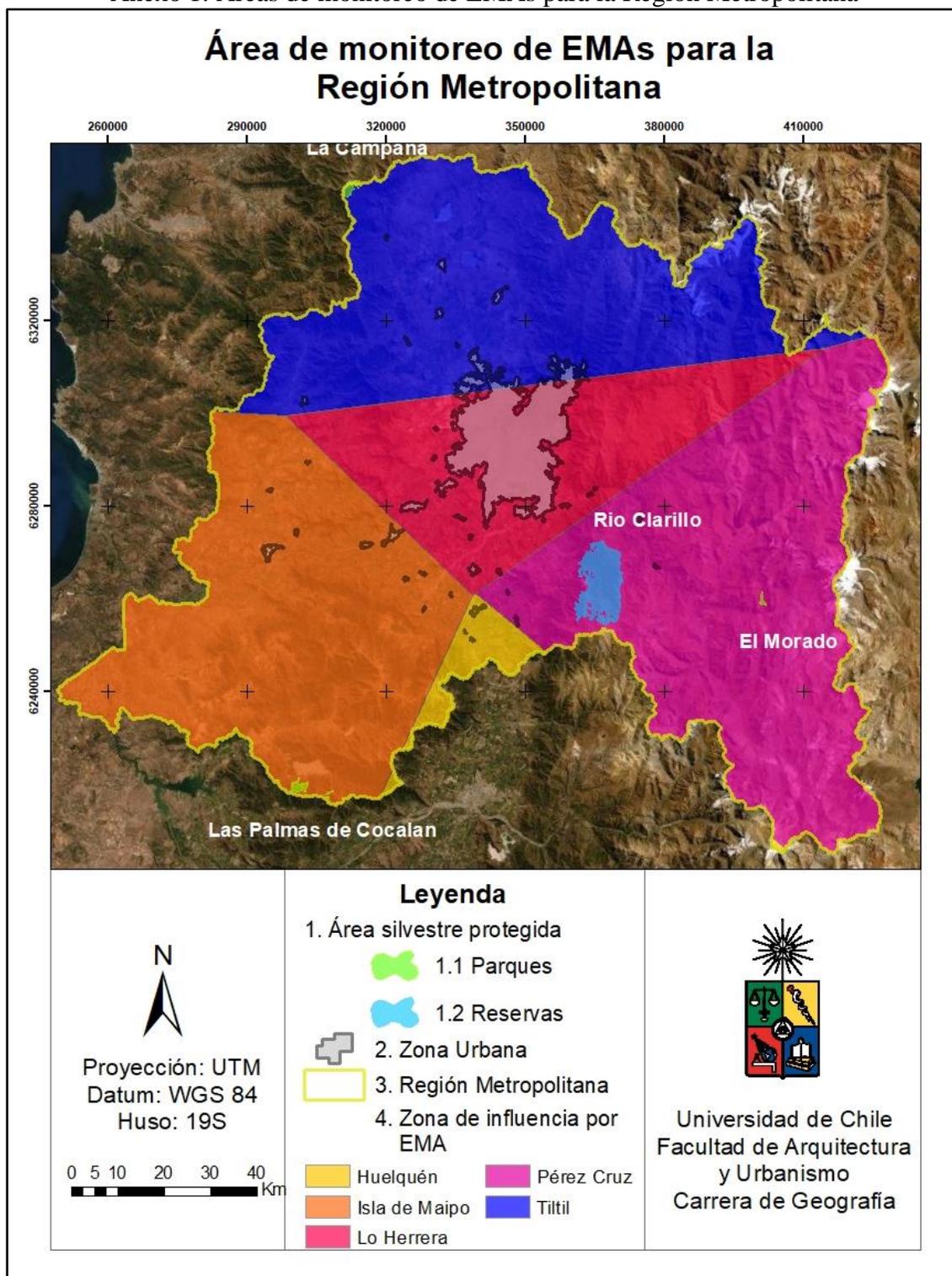
- CONAF. (Actualizado al 2017). *Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, Monitoreo de Cambios y Actualizaciones*.
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F., & Pons, X. (2004). Spatial patterns of fire occurrence in Catalonia. *Landscape Ecology*, 19(7), 721-745.
- Díaz-Hormazábal, I., & González, M. (2016). Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 147-158.
- Didan, K. (2015). *MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/MODIS/MOD13Q1.006
- Domínguez, F. (22 de Noviembre de 2016). 30-30-30, la "extrema" combinación de números detrás del aumento de incendios forestales. *Emol.com - El sitio de noticias online de Chile*. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2016/11/22/832203/303030-Una-de-las-razones-del-aumento-de-incendios-forestales-en-la-zona-central-del-pais.html>
- EOS. (21 de Agosto de 2019). *¿Qué es el NDVI?* Obtenido de <https://eos.com/ndvi/es/>
- Giglio, L., Justice, C., Boschetti, L., & Roy, D. (2015). *MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/MODIS/MCD64A1.006
- Gilabert, M., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los Indices de Vegetación. *Revista de Teledetección*(8).
- INE. (2017). *Resultado definitivo Censo*.
- Julio, G. (1999). *Fundamentos del Manejo del Fuego*. Santiago.
- Julio, G., & Giroz, G. (1975). NOTAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO Y SU APLICACION EN EL CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES. *Bosque (Valdivia)*, 1(1), 18-27.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile* (Segunda edición ed.). Santiago: Editorial Universitaria.
- Magrini, C., & López Varela, S. (2017). VALPARAISO H30 Humedad y restauración ecológica: estrategias para un ordenamiento territorial desde sus factores de riesgo. *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad]*(19), 18-23.
- Mann, M., & Kump, L. (2009). *Dire Predictions: Understanding Global Warming. The illustrated guide of the findings of the intergovernment panel on climate change*. Nueva York: DK publishing.

- Martín, M. P., & Chuvieco, E. (2001). Propuesta de un nuevo índice para cartografía de áreas quemadas: Aplicación a imágenes NOAAVHRR y Landsat-TM. *Revista de Teledetección*(16), 57-64.
- Moreno, M., Conedera, M., Chuvieco, E., & Pezzatti, G. (2014). Fire regime changes and major driving forces in Spain from 1968 to 2010. *Environmental Science & Policy*, 37, 11-22.
- NASA - EARTHDATA. (22 de Agosto de 2019). *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) - LAADS DAAC*. Obtenido de <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/>
- NASA. (24 de Agosto de 2019). *MODIS Web*. Obtenido de MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- Ormeño Campos, H. (2016). *Elementos Cuantitativos de Investigación en las Ciencias Sociales*.
- Peña, E. (2003). Incendios forestales catastróficos: ¿un fenómeno ocasional o un futuro amenazante? *Boletín Forestal*, 1(2), 3-5.
- Peña-Fernández, E., & Valenzuela-Palma, L. (2008). Incremento de los incendios forestales en bosques naturales y plantaciones forestales en Chile. *Memorias del segundo simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales: Una visión global*, 595-612.
- Pinilla, C. (1995). *Elementos de Teledetección*. Madrid: RAMA.
- Rodríguez-Jaume, M., & Mora-Catalá, R. (2001). *Análisis de regresión múltiple*. Técnicas de Investigación Social II.
- Rothermel, R. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station*, 115, 40.
- Rutllant, J. (1997). Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. *El Niño-La Niña, 2000*, 61-76.
- Santander Montes, A. J., & Ruiz Vaquero, R. (2004). Relación entre variables cuantitativas. *Informática Médica II*, 1-30.
- Sarricolea, P., & Úbeda, X. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146, 152-161.
- Siegel, S. (1972). *Diseño Experimental No Paramétrico. Las medidas de correlación y sus pruebas de significación. El coeficiente de correlación de rangos de Spearman*.

- Straschnoy, J. V., Mari, N. A., Di Bella, C. M., Rebella, C., Melchiori, A. E., Veron, S. R., . . . Fischer, M. D. (2008). Incendios forestales en América Latina. Por el equipo de investigación del Instituto de clima y agua del INTA. *CEIBE*(5), 14-17.
- Verdú, F., Salas, J., & Vega-García, C. (2012). A multivariate analysis of biophysical factors and forest fires in Spain, 1991-2005. *International Journal of Wildland Fire*, 21(5), 498-509.
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *science*, 313(5879), 940-943.
- Whelan, R. J. (1995). *The ecology of fire*. Cambridge university press.

ANEXOS

Anexo 1: Áreas de monitoreo de EMAs para la Región Metropolitana



Fuente: Elaboración propia