



Universidad de Chile  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Escuela de Postgrado  
Magíster en Geografía

**Análisis de las variables predictoras de incendios forestales en  
el área metropolitana de Valparaíso**

Proyecto de Tesis para optar al Grado de Magíster en Geografía  
Allan Francisco Puebla Villa

Profesor guía

Pablo Andrés Sarricolea Espinoza

SANTIAGO - CHILE

2023

## Resumen

El cambio climático es un proceso que se ha visto intensificado por las actividades humanas y sus consecuencias, entre las que podemos encontrar el aumento de eventos meteorológicos extremos que favorecen la ocurrencia de diversos riesgos socionaturales, que nos afectan cada vez más. Los incendios forestales, en especial aquellos de gran tamaño, se han vuelto cada vez más recurrentes, ante lo cual resulta imperante la identificación de zonas o áreas que se encuentren más propensas ante la ocurrencia de estos fenómenos, logrando enfocar los esfuerzos de combate de estos eventos. El objetivo de esta investigación es establecer relaciones entre variables predictoras e impulsoras de incendios forestales en el área metropolitana de Valparaíso.

Se utilizó el registro de incendios CONAF del periodo 2002-2017 para el área de estudio, y un conjunto de variables que favorecen la ocurrencia de incendios forestales, identificadas mediante una revisión bibliográfica, para incorporarlas a un modelo de bosque aleatorio (*random forest*), obteniendo como resultado que en el caso de todos los incendios forestales la variable más importante es la distancia a caminos (19,8%), mientras que en el caso de los incendios forestales de gran tamaño (>100 hectáreas) es la distancia a ciudades (15,3%).

Palabras clave: Incendios forestales; *Random forest*; Probabilidad de ignición de incendios forestales.

## Índice

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b>	<b>Cambio climático</b>	<b>1</b>
1.1.1.	Desconocimiento	2
1.1.2.	Consecuencias en Chile	3
<b>1.2.</b>	<b>Incendios forestales</b>	<b>4</b>
1.2.1.	Clasificación	5
1.2.2.	Impactos	7
1.2.3.	Organización del combate de incendios forestales en Chile	9
1.2.4.	Efectos en Chile	10
<b>1.3.</b>	<b>Análisis de los incendios forestales</b>	<b>11</b>
<b>1.4.</b>	<b>Área de estudio</b>	<b>15</b>
1.4.1	Comunas del área de estudio	15
1.4.2	Incendios forestales en el territorio	22
1.4.3.	Caracterización	23
1.4.3.1.	Clima	23
1.4.3.2.	Demografía	26
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>28</b>
<b>2.1.</b>	<b>Visiones del riesgo</b>	<b>28</b>
<b>2.2.</b>	<b>Riesgo y sus diversos conceptos asociados</b>	<b>31</b>
2.2.1.	Componentes del riesgo	31
<b>2.3.</b>	<b>Riesgo: Concepto socialmente construido</b>	<b>33</b>
2.3.1.	Gestión del riesgo	35
<b>2.4.</b>	<b>Incendios forestales</b>	<b>38</b>
<b>2.5.</b>	<b>Formas de analizar los incendios forestales</b>	<b>40</b>

2.5.1. Simuladores, modelos y métodos	40
2.5.2. <i>Machine learning</i>	41
2.5.3. <i>Random forest</i>	42
<b>2.6. Probabilidad de ignición de incendios forestales</b>	<b>44</b>
<b>3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS</b>	<b>45</b>
<b>3.1. Objetivo general</b>	<b>45</b>
<b>3.2. Objetivos específicos</b>	<b>45</b>
<b>4. PREGUNTA E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>46</b>
<b>4.1. Pregunta de investigación</b>	<b>46</b>
<b>4.2. Hipótesis</b>	<b>46</b>
<b>5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>48</b>
<b>5.1. Mapa metodológico general</b>	<b>48</b>
<b>5.2. Puntos de ignición</b>	<b>50</b>
<b>5.3. Revisión bibliográfica</b>	<b>51</b>
<b>5.4. Identificación de las variables predictoras</b>	<b>53</b>
5.4.1. Variables bioclimáticas	54
5.4.2. Variables topográficas	54
5.4.3. Variables de factor humano	55
<b>5.5. Procesamiento de Variables</b>	<b>58</b>
5.5.1. Espacializar puntos de incendios forestales	58
5.5.2. Igualar variables de incendios forestales	59
<b>5.6. Análisis exploratorio</b>	<b>63</b>

5.6.1. Puntos de incendios forestales	63
5.6.2. Correlación de variables	63
5.6.3. Selección de variables	66
<b>5.7. Análisis</b>	<b>66</b>
5.7.1. Modelo <i>Random Forest</i>	66
5.7.2. Analisis multicriterio	71
5.7.2.1. Reclasificaciones	72
5.7.2.2. Suma ponderada	73
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>74</b>
<b>6.1. Análisis exploratorio</b>	<b>74</b>
6.1.1. Limpieza de los puntos de incendios forestales	74
6.1.2. Correlación entre variables	77
6.1.2.1. Todos los incendios forestales	78
6.1.2.2. Incendios forestales de gran tamaño	80
6.1.3. Selección de variables	84
6.1.3.1. Todos los incendios forestales	84
6.1.3.2. Incendios forestales de gran tamaño	90
6.1.4. Espacialización de variables que se utilizan en el análisis	97
6.1.4.1. Temperatura media anual (Bio 1)	97
6.1.4.2. Temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5)	99
6.1.4.3. Temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8)	101
6.1.4.4. Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10)	103
6.1.4.5. Precipitación anual (Bio 12)	104
6.1.4.6. Precipitación del mes más lluvioso (Bio 13)	105
6.1.4.7. Pendiente	106
6.1.4.8. Distancia a caminos	107
6.1.4.9. Distancia a ciudades	108
6.1.4.10. Elevación	109
6.1.4.11. Densidad de población	110
6.1.4.12. Orientación	111

<b>6.2. Análisis</b>	<b>112</b>
6.2.1. <i>Random Forest</i>	112
6.2.1.1. Todos los incendios forestales	112
6.2.1.2. Incendios forestales de gran tamaño	116
6.2.2. Análisis multicriterio	121
6.2.2.1. Reclasificación de los resultados <i>Random forest</i>	121
6.2.2.2. Reclasificación de la cobertura de suelo	121
6.2.3. Suma ponderada	125
6.2.3.1. Todos los incendios forestales	125
6.2.3.2. Incendios forestales de gran tamaño	128
7.    CONCLUSIONES	131
8.    BIBLIOGRAFÍA	136
9.    ANEXOS	148

## Índice de figuras

Figura 1: Área de estudio y las comunas que lo componen. ....	17
Figura 2: Zonificación del Plan Regulado Metropolitano de Valparaíso.....	20
Figura 3: Clasificación climática de Köppen-Geiger para el área de estudio. ...	24
Figura 4: Mapa metodológico parte A. ....	48
Figura 5: Mapa metodológico parte B. ....	50
Figura 6: Puntos de incendios forestales en el área de estudio durante el periodo 2002-2017.....	75
Figura 7: Puntos de incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio durante el periodo 2002-2017.....	76
Figura 8: Matriz de correlación de variables predictoras de incendios forestales. ....	80
Figura 9: Matriz de correlación de variables predictoras de incendios forestales de gran tamaño.....	83
Figura 10: Dendrograma con corte de las variables para todos los incendios forestales en el periodo de 2002-2017.....	86
Figura 11: Dendrograma con corte de las variables para los incendios forestales de gran tamaño en el periodo de 2002-2017. ....	92
Figura 12: Temperatura media anual.....	98
Figura 13: Temperatura máxima del mes más cálido. ....	100
Figura 14: Temperatura media del trimestre más húmedo. ....	102
Figura 15: Temperatura media del trimestre más cálido.....	103
Figura 16: Precipitación anual (mm). ....	104
Figura 17: Precipitación del mes más lluvioso (mm).....	105
Figura 18: Pendiente.....	106
Figura 19: Distancia a caminos.....	107
Figura 20: Distancia a ciudades.....	108
Figura 21: Elevación. ....	109
Figura 22: Densidad de población (h/km2). ....	110

Figura 23: Orientación del terreno. ....	111
Figura 24: Probabilidad de ignición de incendios forestales. ....	113
Figura 25: Probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño. ....	117
Figura 26: Reclasificación de la cobertura de suelo según la probabilidad de ignición de incendios forestales. ....	124
Figura 27: Probabilidad de ignición de incendios forestales. ....	127
Figura 28: Probabilidad de ignición ante incendios forestales de gran tamaño. ....	129



## Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de los incendios forestales durante el periodo 2022-2023..	10
Tabla 2: Población comunal, superficie comunal y superficie zonificada.....	19
Tabla 3: Datos demográficos de las comunas que componen el área de estudio. .....	26
Tabla 4: Textos y autores revisados para la selección de variables que tienen injerencia en la ocurrencia de los incendios forestales.....	52
Tabla 5: Resumen de las variables utilizadas y sus características.....	60
Tabla 6: Resumen de las variables que se utilizan en el análisis de todos los incendios forestales. ....	88
Tabla 7: Resumen de las variables que se utilizan en el análisis de los incendios forestales de gran tamaño. ....	94
Tabla 8: Variables y su nivel de importancia.....	115
Tabla 9: Variables y su nivel de importancia.....	119
Tabla 10: Rangos originales y valores reclasificados. ....	121

## 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Cambio climático

El cambio climático implica una variación del clima del planeta, el cual está vinculado directa o indirectamente con las actividades humanas, generando un aumento de las temperaturas promedio del planeta, aumento de las olas de calor, erosión de las costas y aumento en el número de casos de eventos climáticos extremos, la principal causa de este proceso es el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (MMA, 2021).

Una gran variedad de autores (Downing *et al.*, 1999; Dow *et al.*, 2013; Kunreuther *et al.*, 2013) han señalado que el cambio climático es un proceso que ha aumentado el riesgo, vulnerabilidad y amenaza ante diversos eventos socionaturales en muchas zonas del planeta, el daño producido por estos eventos cuantificado en dinero viene aumentando significativamente desde el año 1960. Las políticas climáticas que se tomen por parte de los diversos tomadores de decisiones en las distintas zonas del planeta y a diferentes escalas son intrínsecamente una forma de gestión del riesgo, debido a la relación entre cambio climático y riesgo (Downing *et al.*, 1999).

El cambio climático es un proceso de escala global (Aguirre *et al.*, 2022), las variaciones del clima que se mencionan para concientizar a la población son el

aumento de la temperatura a nivel global, el aumento del nivel del mar o la disminución de las precipitaciones. Por sus dimensiones espaciales y temporales, este problema requiere la construcción de una perspectiva global amplia para ser legible, sin embargo, la escala local es un espacio desde el cual se pueden realizar acciones para aportar a disminuir sus consecuencias (Aguirre *et al.*, 2022).

Es importante prestar atención a la manera en que el cambio climático se relaciona con la ocurrencia de eventos como los incendios forestales, que se vuelven cada vez más recurrentes en Chile. Por otra parte, como señala Aguirre *et al.* (2022), es relevante analizar cómo la relación entre cambio climático y eventos que conllevan riesgo se plasman en la realidad a una escala local y regional. En este caso se analiza esta relación a una escala regional en el área metropolitana de Valparaíso, y como las variables que se desprenden del cambio climático, pueden modificar la susceptibilidad ante incendios forestales.

### **1.1.1. Desconocimiento**

El cambio climático es un concepto que es muy nombrado por la población general al tener consecuencias a nivel global, pero sus implicancias, características y causas son, en su mayoría, desconocidas o ignoradas por el público en general, especialmente las implicancias a escalas locales. Las encuestas revelan que el público general no tiene conocimiento de las causas o implicancias del cambio climático global, solo el 10% de los encuestados en Chile, el 15% en los EE. UU. y el 21% en Gran Bretaña logran identificar la

relación del uso de combustibles fósiles con el efecto invernadero, existe una gran cantidad de investigaciones sobre el cambio climático, pero esto no se refleja en el conocimiento fuera de la academia, esto se puede deber al escaso nivel de información que se reproduce en los medios de comunicación, el sesgo político y la madurez de este tema en Chile y otros países del sur global (Dotson et al., 2012).

### **1.1.2. Consecuencias en Chile**

El cambio climático ha generado consecuencias plausibles y palpables en nuestro país, como por ejemplo, el aumento de las olas de calor, que se producen cuando al menos por tres días seguidos se registran temperaturas máximas por sobre un rango considerado ya alto para la época, en el periodo de 2010 a 2019 se registraron un total de 64 eventos de olas de calor en Chile, mientras que, en 2019, Santiago rompió el récord de 13 eventos de estas características. En Chile la tendencia al aumento de la temperatura media ha sido del orden de 0.13 °C por década, en el período 1961 al 2019 (Oficina de Cambio Climático, 2020). Sumado a lo anterior, todas las previsiones climáticas indican que de seguir la condición actual del uso de energías y de suelo, estas estadísticas seguirán empeorando, favoreciendo la ocurrencia de incendios a gran escala.

La zona central de Chile podría verse afectada drásticamente con un aumento de la temperatura de 1,5 °C, la vegetación mediterránea podría convertirse en vegetación de desierto, lo que se replicaría en la vegetación del bosque

esclerófilo interior de Chile central y la vegetación subandina en los Andes (Arroyo *et al.*, 2019).

## **1.2. Incendios forestales**

Los incendios forestales son definidos como un fuego que se propaga sin control en terrenos rurales, sea cual sea su origen, el cual se propaga a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta, que puede presentar o no peligro o daño para las personas, sus propiedades o el ambiente que los rodea (CONAF, 2021).

En la actualidad, la mayoría de los incendios forestales son provocados o causados por el ser humano (Úbeda y Sarricolea, 2016). Lo cual implica que los incendios forestales son un fenómeno socionatural, ya que las variables ambientales que propician su ocurrencia son modificadas constantemente por el ser humano y sus actividades.

La existencia de ciertas condiciones ambientales puede favorecer la ocurrencia de eventos como los incendios forestales. Al poder modificar el entorno y el medio ambiente que nos rodea, los seres humanos son capaces de aumentar o disminuir probabilidad de ignición de incendios forestales.

Es innegable que el cambio climático y sus consecuencias, como la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura, favorecen la ocurrencia de eventos extremos, como los grandes incendios forestales. Bajo este contexto, el número de incendios forestales ha comenzado a aumentar drásticamente en todo el mundo, durante el año 2020, el número de alertas de incendios forestales aumento un 13% con respecto al año 2019, el cual ya había sido un año récord, estas alertas se concentran principalmente en la región del Amazonas, debido a la necesidad de nuevas zonas que se dediquen a la agricultura, aunque es importante señalar, que este aumento en la cantidad de incendios no deja de ser un fenómeno que afecta a prácticamente todo el mundo (WWF y BCG, 2020).

### **1.2.1. Clasificación**

Los incendios forestales tienen características mediante las cuales se pueden clasificar, como el combustible que se quema, su forma de origen o el tamaño del área afectada.

Se considera como combustible de un incendio forestal todo aquel material vegetal inflamable, ya sea arbustivo, herbáceo o arbóreo, como también toda la biomasa muerta que se encuentre sobre el suelo, dependiendo de que clase y especie sea la vegetación, esta puede ser más o menos propensa a quemarse.

Los factores de mayor importancia con relación a la clase de combustible para un incendio forestal son la humedad y la relación superficie/volumen de los combustibles, si bien la humedad interna de los combustibles depende de

factores climáticos, también lo hace según la capacidad para almacenar la humedad de cada especie, existen casos de diferencias de humedad interna entre especies que pueden llegar al 37% entre especies ubicadas en un mismo sector geográfico, en cuanto a la relación superficie/volumen de los combustibles, implica que los combustibles con un diámetro menor, tendrán una mayor superficie de intercambio de energía y humedad con el exterior, lo que se traduce en que el tiempo que se demoran en perder su humedad es menor, favoreciendo así su ignición ante un evento como un incendio forestal (Villers, 2009).

En cuanto al origen de los incendios forestales, se pueden clasificar en 2 grupos, los incendios naturales, son aquellos que se producen de forma espontánea, son generalmente de baja intensidad y sirven para eliminar combustible que se encuentra en el lugar de forma constante, estos incendios se dan en la estación seca y la flora y fauna de sus hábitats se encuentran adaptadas a estos procesos (Nasi *et al.*, 2001). Por otra parte, los incendios generados por el ser humano, que a su vez se pueden clasificar en accidentales o intencionales, son la gran mayoría de los incendios forestales en Chile, el 99.7% corresponde a esta categoría, los cuales se generan por errores en el manejo de fuentes de calor, descuidos o intencionalidad (CONAF, 2021), por lo que es importante recalcar que la mayoría de los incendios no se producirían si no fuera por el ser humano.

Los incendios forestales también se pueden clasificar en incendios históricos (Comunes) o mega incendios (eventos extremos), los primeros son la gran mayoría de los incendios, se caracterizan por afectar áreas de tamaño promedio y mantener características que se encontraría en el promedio de los incendios registrados, por otra parte, los mega incendios, también llamados eventos extremos, son eventos que resaltan por sus características, como la gran área o superficie que afectan, la velocidad a la que se propagan, la envergadura y

dinámicas que presentan (CR2, 2020). Esta última clasificación ha comenzado a ser de especial preocupación y cuidado, debido a la dificultad técnica que se presenta para lograr su control, la gran cantidad de recursos económicos que requiere enfrentarlos, la peligrosidad de su combate, la infraestructura que es dañada y el riesgo para la salud de las personas, ya sea por el deterioro de la calidad del aire o por efectos directos de las llamas en la vida de las personas (CR2, 2020). Estos mega incendios han comenzado a ser cada vez más recurrentes en el mundo y en Chile en particular, producto del cambio climático, al ser eventos de gran magnitud y de mayor recurrencia, generan una gran cantidad de CO<sub>2</sub> que va a parar a la atmósfera, favoreciendo el cambio climático y generando un círculo de retroalimentación positiva (CR2, 2020).

### **1.2.2. Impactos**

Los incendios forestales tienen una gran cantidad de impactos o consecuencias, que pueden ser cuantificables o no, las medidas más usadas para determinar los impactos causados por un evento como este, son la superficie quemada, la pérdida de vidas o los daños económicos causados, también existen consecuencias que generalmente pasan desapercibidas para el público general, como la pérdida de especies endémicas, de servicios ecosistémicos o la degradación de la calidad de vida para las comunidades circundantes.

Los impactos y consecuencias de los incendios forestales han comenzado a aumentar drásticamente durante las últimas décadas, tanto en sitios públicos como privados, no existe un conjunto uniforme de variables para medir estos



impactos en los sistemas sociales más allá de estadísticas, como la pérdida de viviendas, daños a la propiedad, costos de supresión y número de personal que trabajaba en un incendio, asimismo, la literatura sobre los incendios forestales ha reconocido la necesidad de medidas integrales para analizar los impactos de los eventos de incendios forestales que deben ir más allá de las estadísticas que solo miden variables que se basan en la economía tradicional (Paveglio, 2015).

Los incendios forestales tienen impactos globales, como el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera, entre los efectos regionales se pueden considerar la degradación de suelos y la pérdida de biodiversidad (Chuvienco, 2009), en efectos más específicos podemos encontrar los impactos económicos relacionados con la pérdida de infraestructura, de producciones agrícolas y forestales (Omi, 2005).

Existen casos donde los incendios forestales son agentes claves para la evolución de numerosas especies y del paisaje, siendo parte de los ciclos naturales al estar las especies adaptadas a este tipo de eventos (Roces y Santin, 2021) por lo que, los incendios forestales pueden tener impactos positivos, por ejemplo, generan una mayor diversidad de especies del sotobosque cuando los incendios son de baja intensidad (Rodríguez, 2007), limpian la materia muerta o en descomposición, permitiendo que crezcan nuevas especies, mantienen el equilibrio del ecosistema al eliminar insectos nocivos y plantas enfermas (Irastorza, 2019).

### **1.2.3. Organización del combate de incendios forestales en Chile**

En Chile, La Corporación Nacional Forestal (CONAF) es una entidad de derecho privado dependiente del Ministerio de Agricultura, cuya principal tarea es administrar la política forestal de Chile y fomentar el desarrollo del sector. Al encargarse de la administración de la política forestal, esta organización también es la principal responsable en Chile de la protección contra incendios forestales. En su calidad de servicio forestal nacional y entre sus variadas acciones, gestiona un Programa de Manejo del Fuego para la protección contra incendios forestales en el país, tanto para resguardar al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), como para resguardar los terrenos rurales de medianos y pequeños propietarios.

En caso de incendios forestales de magnitud o que amenazan a la población, el sistema de protección civil gestionado por la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI), dentro del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, coordina y dispone de la participación de diversos agentes estatales bajo la autoridad de las Intendencias Regionales, con el objetivo de combatir estos eventos extremos, el rol de la CONAF en estos casos, es capacitar, equipar y disponer de brigadistas especializados en el combate de incendios forestales.

### 1.2.4. Efectos en Chile

La CONAF, también es el encargado de llevar los registros históricos de incendios forestales en Chile, como se observa en la tabla 1, las estadísticas muestran que en cuanto al promedio nacional, se observan cifras alentadoras, ya que la cantidad de incendios disminuyeron en un 22%, mientras que la superficie afectada también disminuyó un 71% si se compara el periodo 2022-2023 con el periodo 2021-2022, la tendencia a la baja en estas variables también se repiten si se compara el periodo actual con el promedio del último quinquenio.

Tabla 1: Resumen de los incendios forestales durante el periodo 2022-2023.

Región	NÚMERO DE INCENDIOS			SUPERFICIE AFECTADA (ha)		
	Periodo actual 2022-2023	Periodo 2021-2022	Promedio quinquenio	Periodo actual 2022-2023	Periodo 2021-2022	Promedio quinquenio
Arica y Parinacota	2	(0%) 2	(-23%) 2.6	39.3	(+663%) 5.15	(+573%) 5.84
Tarapacá	0	0	1.2	0	0	1.22
Antofagasta	2	0	(+100%) 1	1.5	0	(+2949%) 0.05
Atacama	3	(-25%) 4	(+7%) 2.8	6	(+6%) 5.66	(-24%) 7.89
Coquimbo	3	(-75%) 12	(-77%) 13	8.8	(-99%) 1237.14	(-97%) 270.1
Valparaíso	24	(-57%) 56	(-50%) 48	150.88	(-78%) 679.38	(-73%) 555.59
Metropolitana	32	(-29%) 45	(-17%) 38.6	35.68	(-90%) 347.65	(-76%) 149.11
O'Higgins	12	(-8%) 13	(-21%) 15.2	9.75	(-37%) 15.47	(-67%) 29.75
Maule	20	(-38%) 32	(-31%) 28.8	484.39	(+262%) 133.7	(+403%) 96.3
Ñuble	24	(+41%) 17	(+300%) 6	395.18	(+1464%) 25.28	(+5544%) 7
Biobío	63	(+26%) 50	(+17%) 54	59.73	(+25%) 47.87	(-24%) 78.29
Araucanía	37	(-31%) 54	(-9%) 40.8	22.1	(-84%) 140.06	(-69%) 72.35
Los Ríos	2	(-33%) 3	(-41%) 3.4	2.64	(+105%) 1.29	(-55%) 5.89
Los Lagos	14	(-18%) 17	(+141%) 5.8	8.37	(+22%) 6.88	(+67%) 5.02
Aysén	3	(-73%) 11	(-42%) 5.2	2.7	(-100%) 1680.94	(-99%) 407.05
Magallanes	8	(+300%) 2	(+264%) 2.2	11.48	(+3090%) 0.36	(+206%) 3.76
<b>Total</b>	<b>249</b>	<b>(-22%) 318</b>	<b>(-7%) 268.6</b>	<b>1238.5</b>	<b>(-71%) 4326.82</b>	<b>(-27%) 1695.21</b>

Fuente: CONAF, 2022.

La zona central de Chile es el área donde el riesgo ante incendios forestales es mayor, debido a sus características climáticas y la concentración de las 3 mayores áreas metropolitanas de Chile, donde habita la mayoría de la población del país, el área metropolitana de Santiago, de Valparaíso y de Concepción. Durante los veranos se produce la estación seca en esta zona, con una disminución considerable de las precipitaciones (Sarricolea *et al.*, 2019).

### **1.3. Análisis de los incendios forestales**

Ante la necesidad de analizar y estudiar los incendios forestales, resulta útil modelar la probabilidad de ignición o susceptibilidad ante incendios forestales, para así comprender las consecuencias adversas que podrían provocar estos fenómenos (Bustillo *et al.*, 2021). Los incendios forestales tienen como elemento primordial para su análisis la zonificación de áreas de riesgo, amenaza y vulnerabilidad ante este tipo de eventos, lo que permite establecer una especie de alerta temprana sobre ciertos territorios más susceptibles, favoreciendo la protección, cuidado y enfoque de las estrategias de monitoreo y predicción de incendios forestales en las zonas que presenten un nivel de riesgo más alto, basados en ciertas características ambientales (Yang *et al.*, 2021).

La demanda de herramientas cuantitativas basadas en la identificación de la probabilidad de ignición de incendios forestales ha aumentado, ya que los incendios forestales han afectado cada vez más a los seres humanos y los recursos ecológicos. A nivel mundial, la creciente incidencia y los daños

causados por incendios forestales ha dado lugar a muchos nuevos esfuerzos para construir modelos o sistemas de análisis de la probabilidad de ignición de incendios forestales (Loboda y Csiszar, 2007; Andreu y Hermansen-Báez, 2008; Tolhurst *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2009; Atkinson *et al.*, 2010; Chuvieco *et al.*, 2010). En este sentido, la probabilidad de ignición de incendios forestales hace referencia a la probabilidad estadística de inicio de un incendio, forestal basado en ciertas variables que los propician, independientemente de si estas variables pertenecen a la amenaza o a la vulnerabilidad ante estos eventos.

En este sentido, desde la geografía se puede aportar bastante, debido a su visión holística de los temas que estudia, puede abordar los conceptos de riesgo, amenaza, vulnerabilidad y probabilidad de ignición de incendios, teniendo en cuenta sus variables físicas, como también sus componentes sociales. Por otra parte, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son ideales para modelar y mapear las variables que tienen injerencia en la ocurrencia de incendios forestales, los programas estadísticos, como SPSS o R, permiten modelar y calcular la probabilidad de ocurrencia de cualquier tipo de fenómenos al conocer sus variables predictoras, como también, se puede hacer la operación de forma inversa, es decir, establecer las variables predictoras de un fenómeno al tener en cuenta las características de ocurrencia de dichos eventos en el pasado.

Existen una gran cantidad de metodologías que se basan en modelar la posible ocurrencia de incendios forestales, entre los que se encuentran los modelos de análisis multicriterio, que tienen como primicia el uso de variables dependientes seleccionadas por el autor del análisis, a cada una de estas variables se le debe otorgar un peso específico, la desventaja de este tipo de métodos es que los resultados dependen completamente del criterio del autor y del peso que considere prudente otorgar a cada variable.

Las metodologías que se basan en herramientas de aprendizaje automático, se dividen en una gran cantidad de modelos, como *Random Forest*, Maxent o Máquinas de Vectores de Soporte, utilizan variables predictoras que dependen de la selección del autor del análisis, el peso de cada variable es decretado por métodos estadísticos, basándose en eventos anteriores y como estas variables intervinieron en el evento. De los modelos señalados anteriormente, *Random Forest* es el que presenta mejores resultados estadísticos al evaluar la probabilidad de ignición ante incendios forestales en Irán y Portugal, según los estudios realizados a través de diversos modelos y sus resultados (Bustillo *et al.*, 2021).

Los modelos de aprendizaje automático han comenzado a ser utilizados en una gran cantidad de trabajos y artículos relacionados con la susceptibilidad ante incendios forestales, en este sentido, la mayoría de estos trabajos analizan variables ambientales, por esto, es llamativo el trabajo enfocado en la provincia de Hunan en China, donde se utilizó el modelo Maxent, para identificar las zonas de riesgo ante incendios forestales e identificar las relaciones entre cada variable y el riesgo de incendios, pero además de tener en cuenta variables ambientales, como climáticas, topográficas y de vegetación, se incorporan en el análisis variables relacionadas con las actividades humanas, como el uso de suelo, densidad poblacional, distancia residencial o densidad de caminos (Yang *et al.*, 2021).

En Chile también se han llevado a cabo trabajos basados en la metodología de aprendizaje automático, enfocándose en la problemática de los incendios forestales, específicamente en el área Metropolitana de Concepción, una zona

que al ser un territorio destinado a la planificación a largo plazo, al igual que el área de estudio de este trabajo, permite que los resultados tengan consecuencias reales y útiles para el territorio. En el área Metropolitana de Concepción se utilizaron factores humanos y ambientales, para determinar la probabilidad de ignición de incendios forestales, determinando que existe una gran interdependencia entre las variables, como el uso de suelo y la precipitación (Jaque *et al.*, 2021). Es conveniente tener en cuenta que no solo se debe determinar el nivel de importancia de cada variable, sino que también entender como estas variables se relacionan entre sí, para comprender de mejor manera el fenómeno de los incendios forestales.

En el área de estudio de este trabajo, es decir, Valparaíso, existen una gran cantidad de estudios que buscan establecer las zonas más propensas ante el riesgo de incendios forestales con base en diferentes variables físicas y sociales, entre los que se encuentran, “Estudio y evaluación del riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal de las comunas que componen el Área Metropolitana de Valparaíso. Periodo 2000-2017”, desarrollado por Alegría (2020), quien establece que la amenaza ante incendios forestales se basa en variables definidas luego de una revisión bibliográfica y desarrollando un análisis multicriterio. El trabajo titulado “Riesgo integrado de asentamientos humanos conurbación Valparaíso - Viña del mar” cuyos autores Amigo *et al.* (2021), aplican una metodología en la cual realizan una revisión bibliográfica obteniendo variables predictoras, mientras que el peso de cada variable es definido según el criterio de los autores.

Esta investigación utiliza los trabajos ya mencionados y otros que se presentaran más adelante en este documento, considerando sus metodologías y las variables que los autores determinaron como fundamentales en la ocurrencia de incendios

forestales, para determinar la probabilidad de ignición ante incendios forestales en el área metropolitana de Valparaíso. El aporte principal de esta investigación y que la diferencia de los trabajos anteriores, es que este análisis diferencia en categorías los incendios forestales, según el área afectada por estos eventos, creando una categoría denominada “incendios forestales de gran tamaño”, que tiene como principal característica que los eventos superan o igualan las 100 ha quemadas, al identificar las variables que tienen injerencia en cada categoría, es posible comparar ambas clasificaciones, ayudando a tomar medidas para prevenir ambos tipos de incendios forestales.

## **1.4. Área de estudio**

### **1.4.1 Comunas del área de estudio**

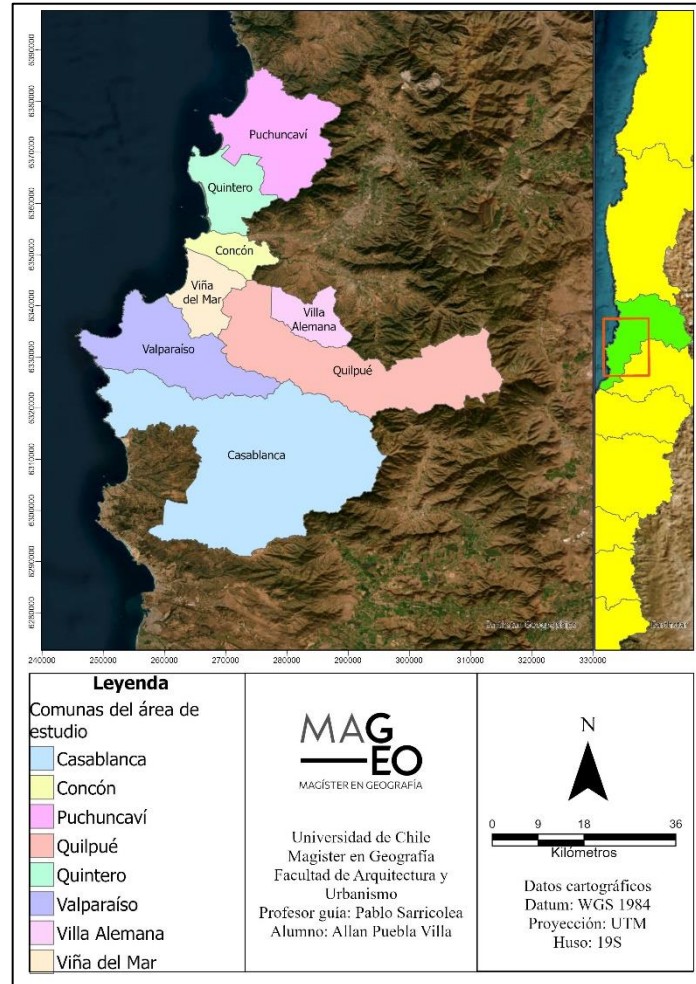
La selección del área de estudio se basa en la posibilidad de generar información que sea útil, relevante y práctica para los tomadores de decisiones encargados del Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso (PREMVAL), dando respuestas a la probabilidad de ignición de incendios forestales, mediante la coordinación entre las comunas que son parte de esta escala metropolitana y logren ejecutar medidas preventorias para este tipo de eventos. La planificación a una escala de esta magnitud tiene como eje la idea de que las distintas comunas que componen este instrumento poseen características, dinámicas y procesos históricos que comparten entre todas, lo que facilita que los diversos proyectos, políticas públicas y medidas sean aplicables a todo el territorio que abarca el instrumento



de planificación. A continuación, se presenta información relevante sobre el área de estudio.

El área de estudio se compone de las comunas que componen el PREMVAL, las cuales son: Viña del mar, Puchuncaví, Quintero, Concón, Quilpué, Villa Alemana y Casablanca, las cuales se observan en la figura 1. El objetivo que se busca cumplir agrupando estos territorios en una sola entidad de planificación, es establecer un orden de estos territorios que presentan una continuidad paisajística y natural. Al ser uno de los grandes centros poblados del país, la planificación es de suma importancia en el territorio para dar un uso adecuado del suelo según sus diversas características.

Figura 1: Área de estudio y las comunas que lo componen.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El PREMVAL fue aprobado por el consejo regional de Valparaíso el 26 de junio del 2013, mientras que la contraloría general de la república tomó razón con alcances el 12 de marzo de 2014. El horizonte de planificación de este instrumento es de 30 años, la planificación formulada en este instrumento se basa en un escenario de crecimiento realista para el territorio, considerando una tasa del 3% al 5% según la realidad regional y nacional (MINVU, 2013). Se tomaron las previsiones necesarias en cada una de las zonificaciones contempladas para

que puedan acoger el crecimiento urbano y productivo durante este horizonte de tiempo (MINVU, 2013).

La superficie total que el PREMVAL estipula regular en su memoria explicativa es de 247.310 ha, mientras que la superficie total de las comunas involucradas es de 263.370 ha, esto se debe a que la totalidad de las comunas de Viña del mar, Quintero, Concón, Quilpué, Villa Alemana y Casablanca, se encuentran planificadas, mientras que en la parte sur de Puchuncavi se abarca un territorio de 14.050 ha, pero es importante señalar que en cuanto a la zonificación generada por el instrumento abarca un total de 62.000 ha, correspondiendo a un 23.5% de las comunas involucradas.

La población total que se encuentra dentro del territorio planificado es de 1.028.647 habitantes, correspondientes al 56,6% de la población de la Región de Valparaíso (INE, 2017).

Tabla 2: Población comunal, superficie comunal y superficie zonificada.

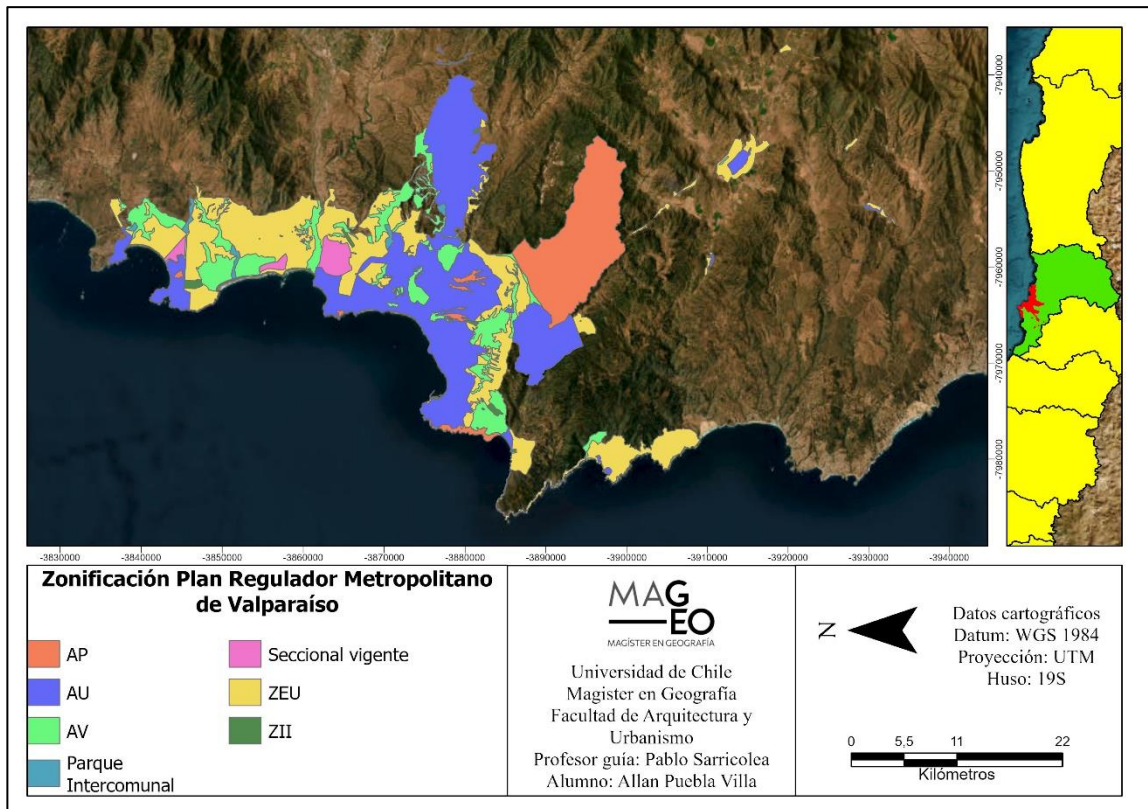
Comunas	Población total	Superficie zonificada PREMVAL (ha)	Superficie comunal (ha)
Viña del mar	334.428	11.158	12.160
Valparaíso	296.655	21.608	40.160
Villa Alemana	126.548	3.231	9.700
Quilpué	151.708	4.071	53.700
Concón	42.152	4.957	7.600
Quintero	31.923	10.795	14.800
Puchuncaví	18.546	2.143	30.000
Casablanca	26.867	4.037	95.250
<b>Total</b>	<b>1.028.647</b>	<b>62.000</b>	<b>263.370</b>

Fuente: Elaboración propia en base a INE, IDE Y BCN, 2023.

Como se observa en la figura 2, la Zona de Extensión Urbana (ZEU) abarca una superficie de 19.518 ha, es decir un 31.5%, que se caracteriza por tener entre sus usos de suelo permitidos el Residencial, Área Verde, Espacio Público, Infraestructura (transporte y sanitaria) y Equipamiento (excepto cárceles, bases militares y cementerios), las zonas de extensión urbana se dividen en varios subtipos, cuya única diferencia se traducen en la extensión mínima de la división de los terrenos y las condiciones de edificación (altura máxima, coeficiente de ocupación del suelo), por otra parte, el Área Urbana (AU) es la zonificación que abarca mayor extensión de superficie en el PREMVAL, específicamente 22.030 ha, esta tipología se caracteriza por ser los territorios que los diversos planes reguladores comunales que componen el PREMVAL definen como área urbana. También existen grandes Áreas de Protección (AP), abarcando un total de 9.817 ha, entre las que se encuentra la Nacional Lago Peñuelas, El Santuario de la Naturaleza Bosque de las Petras de Quintero y algunas zonas de menor tamaño. Las Áreas Verdes intercomunales (AV) abarcan un total de 8.616 ha, las cuales resultan un modo de conectar comunas y establecer áreas verdes para el uso de los habitantes. El Parque Intercomunal es un área verde destinada a ser un punto

de encuentro para los habitantes de todas las comunas que componen el instrumento de planificación. Finalmente, la categoría ZII, corresponde a la agrupación de diferentes infraestructuras con un impacto intercomunal, como la infraestructura sanitaria, energética, portuaria o aeroportuaria. Destaca lo desagregado espacialmente de este instrumento al no existir una continuidad geográfica de este, ya que se planifica en las zonas donde predomina la concentración de la población y los lugares de especial interés para el funcionamiento del plan.

Figura 2: Zonificación del Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de IDE Chile, 2022.

La normativa legal que modifico la Ley 19.175, sobre administración regional, señala que, en cada región podrá constituirse una o más áreas metropolitanas que serán administradas por el gobierno regional respectivo con el objetivo de coordinar las políticas públicas en un territorio urbano. (Artículo 104 bis, Ley 21.074, Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2018). En este contexto, el Gobierno Regional (GORE) de la Región de Valparaíso ha iniciado una serie de acciones cuyo objetivo es plantear una forma de abordar la gobernanza del PREMVAL, este planteamiento se basa en un Consejo Regional de Desarrollo urbano, que está compuesto por una diversidad de actores públicos y privados que tienen injerencia e importancia en el territorio (Santibañez-Frey, 2019).

En el PREMVAL predomina una mirada urbanística del territorio, dejando de lado miradas distintas que podrían enriquecer este instrumento, como el análisis de los problemas socioambientales, que se han desarrollado en la zona por la especulación inmobiliaria y por la incapacidad de los instrumentos de planificación del territorio de adecuarse a las necesidades de la población y como estas han cambiado a lo largo del tiempo (Santibañez-Frey, 2019). Esto promueve la proliferación de los conflictos socioambientales, surgiendo una gran cantidad de movimientos de resistencia, apelando a prácticas de conservación ambiental y a un tipo de desarrollo distinto (Alegría, 2020).

### **1.4.2 Incendios forestales en el territorio**

La región de Valparaíso presenta para el quinquenio de 2016 a 2020 un promedio de 10.602 ha afectadas por incendios forestales, siendo la sexta región en orden descendente, mientras que para el decenio de 2011 a 2020, el promedio es de 9.420 ha, por último, para el periodo de 2020 a 2021 se vieron afectadas un total de 6.943 ha, (CONAF, 2021).

Específicamente, las comunas que presentan mayor cantidad de hectáreas afectadas por incendios forestales en la región de Valparaíso para el periodo de 2020 a 2021 son: Valparaíso, Isla de Pascua y Casablanca con 3.831,88 ha, 1.494,78 ha y 102,53 ha quemadas, respectivamente. La provincia de Valparaíso, sin contar con las comunas de Juan Fernández e Isla de Pascua, para el periodo de tiempo ya señalado, presenta un total de 3.945,3 ha quemadas, siendo la provincia con mayor superficie quemada de toda la región de Valparaíso (CONAF, 2021).

La mayoría de las investigaciones y estudios realizados sobre esta temática se centran en la ciudad de Valparaíso y su zona metropolitana (Castillo et al., 2011; Alcántara, 2014; Piñones, 2018; Kulma 2019; Alegría, 2020). La razón es que existe una gran cantidad de incendios forestales y se concentra una gran cantidad de población, dando como resultado un territorio en el cual un evento de estas características puede generar una gran cantidad de pérdidas económicas y de vidas humanas.

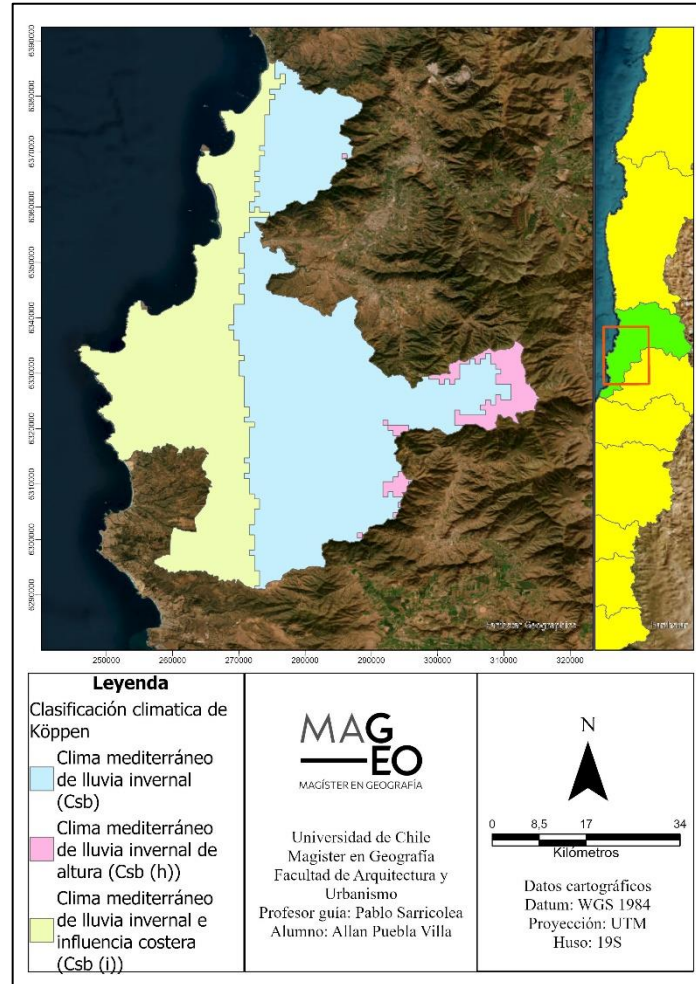
### **1.4.3. Caracterización**

#### **1.4.3.1. Clima**

La figura 3 refleja la clasificación climática de Köppen-Geiger para el área de estudio, según Saricolea *et al.* (2017). Los climas que se presentan son: Clima mediterráneo de lluvia invernal (Csb), Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura (Csb (h)) y Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera (Csb (i)). Esta clasificación climática se basa en las variables de precipitación y temperatura, dando como resultado la identificación de 5 tipos de climas principales, subdivididos en treinta clases con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan a cada clima.



Figura 3: Clasificación climática de Köppen-Geiger para el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia en base a IDE Chile, 2022.

A continuación se describen las características de cada uno de los climas que se presentan en el área de estudio, estas características son descritas por Peel *et al.* (2007).

Climas mediterráneos de lluvia invernal (Csb), (Csb (h)) y (Csb (i)), los climas templados, mediterráneos o mesotérmicos se caracterizan por la temperatura

media del mes más frío es menor a 18 °C y superior a -3 °C y la del mes más cálido es superior a 10 °C, las precipitaciones superan a la evapotranspiración, son climas moderados, de inviernos y veranos variables, pero nunca extremos, específicamente en estos climas, el verano es seco por lo que el mínimo de precipitaciones es bastante marcado y coincide con el periodo de temperatura más alta, mientras que como lo indica su nombre, estos climas se caracterizan por concentrar las precipitaciones en la época invernal. La temperatura es suave, ya que no alcanza los 22 °C de media en el mes más cálido y las temperaturas medias no superan los 10 °C, al menos en cuatro meses al año. Los 3 climas que se engloban en esta definición se pueden diferenciar por situaciones que modifican de alguna forma sus características, porque, si bien todos son climas mediterráneos de lluvia invernal, uno tiene influencia de altura producto de la cordillera de la costa, mientras que otro presenta mayor influencia costera y del mar.

El Clima mediterráneo de lluvia invernal (Csb) es el que abarca mayor superficie, alcanzando un área de 143.891 ha, lo que representa un 56,7% del área total, concentrándose principalmente en la zona central, teniendo un perfil de norte a sur, abarcando localidades como Quillota, Quilpué, Limache y Casablanca, el Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura (Csb (h)) abarca una superficie de 10.649 ha, que representa un 4,2% del total del área de estudio, se concentra en las zonas de mayor altura de la cordillera de la costa, como el parque nacional La Campana, en estos espacios la altura produce una disminución de la temperatura con respecto a las zonas circundantes y finalmente el Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera (Csb (i)), se concentra en la zona costera que se adentra hasta en promedio unos 25 km al interior del continente, la influencia del océano y del mar moderan las temperaturas con respecto a las zonas más alejadas del mar, por lo que las temperaturas en estas

zonas son menos extremas, la superficie que abarca este clima es de 98.881 ha, que representa un 39% del área de estudio. Los climas mediterráneos concentran importantes cantidades de población y se asocian con los incendios forestales, ya que las características climáticas favorecen el crecimiento de una gran variedad de arbustos, hierbas y pastos, los cuales, al llegar la estación seca, son reservas de combustible ideales para la existencia y propagación de los incendios forestales (Montenegro et al., 2004).

#### 1.4.3.2. Demografía

El censo llevado a cabo en Chile durante el año 2017 permite obtener datos demográficos de las comunas que conforman el área de estudio, basándose en esta información se elaboró la tabla 3, que refleja la población de hombres y mujeres, el porcentaje de población urbana y la densidad de cada comuna.

*Tabla 3: Datos demográficos de las comunas que componen el área de estudio.*

Comunas	Hombres - Mujeres	Población urbana (%)	Densidad (h/km <sup>2</sup> )
<b>Viña del mar</b>	158.669 - 175.579	100	2772,16
<b>Valparaíso</b>	144.945 - 151.710	99,8	935,33
<b>Villa Alemana</b>	59.756 - 66.792	99	1317,97
<b>Quilpué</b>	71.746 - 79.962	98,6	283,02
<b>Concón</b>	20.321 - 21.831	93,5	549,94
<b>Quintero</b>	15.834 - 16.089	84,2	218,35
<b>Puchuncaví</b>	9.358 - 9.188	85,5	61,71
<b>Casablanca</b>	13.346 - 13.521	67	28,14

Fuente: Elaboración propia en base a INE, 2017.

La densidad y el porcentaje de población urbana es un factor importante al analizar la probabilidad de ignición de incendios forestales, ya que, los factores humanos tienen una gran incidencia en la ocurrencia de este tipo de eventos.

Como se observa en la tabla 3, el porcentaje de población urbana tiene niveles muy altos en el área de estudio, la comuna de Viña del Mar llega al 100%, es decir, toda su población habita en una ciudad, lo que implica que los sectores colindantes a esta ciudad son mucho más propensos a la ocurrencia de un incendio forestal, lo que sería muy diferente si existiera un porcentaje de población rural que habitara en zonas rurales con cercanía de elementos combustibles, en este caso, la probabilidad de ignición de un incendio forestal se distribuiría de manera proporcional en el área de estudio. La única comuna que no refleja esta tendencia a la concentración de la población en ciudades es Casablanca, que presenta los menores niveles de población urbana y de densidad de población, específicamente 67% y 28,14 h/km<sup>2</sup> respectivamente, en cambio, las demás comunas superan el 80% de población urbana y 6 de las 8 comunas tienen una densidad superior a los 200 h/km<sup>2</sup>.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Visiones del riesgo**

El autor Coy, (2010), explica las visiones desde las cuales se aborda el concepto de riesgo en 3 grandes corrientes de las ciencias, que son las siguientes:

Visión desde las ciencias naturales e ingenieriles: desde esta visión se pone el acento en los procesos naturales (y también en los tecnológicos). Se ocupa de los factores desencadenantes y probabilidad de ocurrencia de un evento determinado. Es de especial importancia el estudio de los modelos de movimiento y de su predictibilidad, lo que permite la mejora de los sistemas de aviso temprano. Se ocupa de las posibilidades de modelación de las estructuras causa-consecuencia y del desarrollo de medidas adecuadas de protección. Al mismo tiempo, desde esta perspectiva es indispensable la incorporación de la dimensión social, ya que los procesos naturales (o tecnológicos) se transforman en fuente de peligro y se consideran riesgo solo cuando el hombre, o los valores materiales construidos por él, se ven directamente afectadas. En primer lugar, sin embargo, se coloca siempre el peligro "real" -o por lo menos el riesgo de su ocurrencia-, que pueda ser localizable espacialmente. Con esto se puede caracterizar la perspectiva de las ciencias naturales e ingenieriles básicamente como una visión "objetivista", para la cual la cuantificación, cálculos de probabilidad y complejas modelaciones representan instrumentos metodológicos básicos.

Visión desde las ciencias económicas: En este caso se trata básicamente de calcular, cuantificar y monetizar los efectos económicos relevantes de los eventos. Debido a que en las últimas décadas se volvió cada vez más importante la contratación de seguros, donde las empresas aseguradoras son de vital interés para el refinamiento de las posibilidades metodológicas para el cálculo de riesgos, por lo cual la relación entre la probabilidad de ocurrencia, o bien la magnitud del evento, y el daño potencial se consideran los factores básicos para la estimación del riesgo. Esta perspectiva también está caracterizada por una visión "objetivista".

Visión desde las ciencias sociales: en contraposición a las dos perspectivas precedentes, las ciencias sociales no se basan generalmente en las fuentes de peligro o en aspectos de la cuantificación o modelación de la magnitud de los daños, sino más bien en la "inclusión" social de los peligros y en el manejo de los riesgos. A pesar de la diversidad en los detalles, todas estas posiciones tienen en común un fuerte abordaje cualitativo. Se caracterizan por un carácter "constructivista", por el cual los riesgos y la forma de manejarlos se interpretan, por ejemplo, como forma de expresión de la cambiante relación hombre-naturaleza, su valoración se ve influenciada por diferentes discursos y distintas formas de acción social, y finalmente distintos intereses y relaciones de poder y dependencia tienen un papel fundamental en la predisposición y exposición a los riesgos.

La geografía, al ser una disciplina que se define y caracteriza por tener un carácter holístico, estableciéndose como una forma de lograr el diálogo entre las ciencias sociales y naturales, es indispensable que logre aunar estas diversas

visiones al momento de realizar un análisis desde esta disciplina. Es evidente que las visiones del riesgo presentadas anteriormente poseen de alguna u otra manera el factor humano, ya sea evidente, como desde las ciencias sociales o de forma más tangencial, como desde la perspectiva de las ciencias económicas, donde si bien, el foco de su análisis este puesto en las pérdidas económicas que se podrían generar al ocurrir algún tipo de desastre, estas pérdidas se asocian a la ubicación y existencia de los bienes de los diversos actores de la sociedad. Por lo tanto, en cualquiera de estas visiones del riesgo, se puede encontrar la relación entre factores sociales y naturales.

La influencia de las ciencias sociales en las definiciones del riesgo se ve al tratar el concepto de “eventos extremos”, término tan utilizado en las ciencias de la tierra para hacer evidentes eventos que presentan una energía liberada superior al promedio de dichos eventos (huracanes, terremotos, etc). Por lo que, en la medida en que el riesgo se construye socialmente, un evento de menor magnitud en términos de energía desplegada podría causar más daño que uno de mayor magnitud, en la medida en que la exposición de los elementos sociales y sus grados de vulnerabilidad sean más altos (Narvaez *et al.*, 2009). La noción de la construcción social del riesgo permite argumentar que el nivel de los daños y las pérdidas no está en función directa y unilateral con la magnitud e intensidad de los eventos físicos per se (Hewitt, 1983).

## **2.2. Riesgo y sus diversos conceptos asociados**

El concepto de riesgo se define de maneras diferentes según las disciplinas o ciencias que lo abordan (Cardona, 2001). La comunidad científica que estudia los riesgos de desastres ha aplicado concepto de riesgo de diferentes formas a lo largo del tiempo, esta disparidad en la terminología ha provocado esfuerzos para estandarizar y operacionalizar las definiciones (Bachmann y Allgower, 2001). Los autores Miller y Ager, (2013), definen 2 características del concepto riesgo, (1) el riesgo es el potencial de concreción de consecuencias adversas no deseadas para la vida humana, la salud, la propiedad o el medio ambiente y (2) la estimación del riesgo se basa en el valor esperado de la probabilidad condicional de que un evento ocurra multiplicado por la consecuencia del evento que ha ocurrido.

### **2.2.1. Componentes del riesgo**

Es imperante analizar cuál es la concepción del riesgo y de sus conceptos asociados, como la amenaza y la vulnerabilidad, debido a las confusiones e imprecisiones existentes en relación con estas definiciones, así como de la multiplicidad de factores de diversa índole, capaces de intervenir en su comprensión (Reyes *et al.*, 2017).



La amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento, tanto de origen natural, por ejemplo, lluvias, tormentas, erupciones volcánicas o sismos, como de origen antrópico (diversos tipos de escapes y contaminación) (Herzer *et al.*, 2002). Las condiciones de vulnerabilidad están representadas por la pobreza, la desorganización social, las ideologías fatalistas, la ausencia de sistemas institucionalizados de seguridad ciudadana, la falta de controles y normativas sobre el uso del suelo urbano, el nivel de cobertura de los servicios públicos y mantenimiento de la infraestructura urbana, entre otros aspectos (Herzer *et al.*, 2002).

La definición más clásica del riesgo es aquella que se entiende según la siguiente fórmula:  $Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad$  (Ramírez, 2015), en esta concepción, el riesgo se compone de 2 conceptos asociados, aunque cabe destacar que existen concepciones más modernas, que agregan más variables o conceptos a esta acepción ya mencionada. La exposición es uno de estos conceptos, la exposición a los desastres evalúa qué activos y en que medida, las áreas y diversas zonas se encuentran propensas a estos desastres. Resulta del análisis de la ocurrencia, probabilidad o peligro ante los diversos desastres en relación con recursos y activos de gran valor, utilizando datos históricos o acoplando simulaciones probabilísticas con la distribución espacial de personas y bienes (Oliveira, 2021). La fórmula del riesgo al considerar esta variable sería la siguiente,  $Riesgo = Amenaza * Exposición * Vulnerabilidad$ .

Otro concepto asociado al riesgo es la resiliencia, en la actual producción conceptual dentro del denominado “campo de estudios de desastres” se encuentra una rápida y extendida difusión de la noción y el término de resiliencia. Generalmente, se introduce con una justificación positiva, es decir, como un conjunto de atributos identificados que son deseables para las sociedades en sus

propósitos de enfrentar mejor los eventos desastrosos de todo tipo (Macias & Jesus, 2015). Al considerar todos los conceptos asociados al riesgo se llega a la siguiente fórmula,  $Riesgo = \frac{Amenaza * Exposición * Vulnerabilidad}{Resiliencia}$ .

Es interesante señalar como la evolución del concepto “riesgo” evidencia la importancia y relevancia de este para las investigaciones asociadas a los diversos desastres, la necesidad de identificar todos los elementos que se ven involucrados en la ocurrencia, causas, consecuencias y disuasión de los desastres socionaturales provocando que el concepto del riesgo sea central y presente un gran desarrollo dentro de los círculos científicos.

### **2.3. Riesgo: Concepto socialmente construido**

La visión del riesgo desde las ciencias naturales e ingenieriles tiene una clara deficiencia si se analiza desde un punto de vista holístico, el cual es dejar de lado las variables y factores sociales que intervienen en el riesgo ante los diferentes eventos que pueden ocurrir.

Como se advirtió anteriormente, las visiones del riesgo abordan este término desde diferentes perspectivas, siguiendo esta lógica, con el paso del tiempo las ciencias sociales comenzaron a abordar el riesgo de desastre, centrándose en el estudio de la vulnerabilidad como factor determinante en la causa de los desastres o la conformación del riesgo. El gran aporte de este enfoque fue la

incorporación de la sociedad como elemento activo y por ello, responsable en la formación de riesgos, a través de procesos económicos, sociales, políticos y ambientales propios de la sociedad en general o de determinados grupos sociales y su entorno (Gellert, 2012).

Los riesgos socionaturales son aquellos eventos que tienen origen en la intersección entre la sociedad y los procesos de la naturaleza, de forma que esta interacción dificulte a un grado tal en que los procesos naturales no son capaces de ajustarse y autorregularse, desencadenando en un evento desastroso para las comunidades y sociedades que tengan relación con estos eventos (Reyes *et al.* 2017), es decir, que los riesgos socionaturales son aquellos que se producen debido a la existencia de una relación sociedad naturaleza, esta interacción entre estos 2 elementos puede producir fricciones que se desencadenan en forma de diversos desastres socionaturales.

Ante la evidencia de que el riesgo no solo se producía por las amenazas naturales, los estudiosos se encargaron de introducir el factor humano en la fórmula clásica del riesgo, agregando el concepto de vulnerabilidad, el cual tiene un factor claramente humano o social, conjugando de esta manera los factores humanos y naturales en la construcción del riesgo. Como una formulación en respuesta a la idea planteada anteriormente, surge la idea de que, en realidad, la amenaza no es natural, ya que, un fenómeno natural potencialmente peligroso se convierte en amenaza para un grupo humano solamente cuando este es vulnerable, un sismo fuerte en una zona despoblada no es ninguna amenaza (Gellert, 2012). Con base en esto, se puede señalar que la amenaza se convierte en una categoría que solo se puede analizar al tener en cuenta su relación con los diversos grupos sociales y sus contextos, como también que la amenaza y vulnerabilidad son componentes interrelacionados y que no puede existir uno sin

el otro, algo que, como se verá, sucede con la mayoría de los términos o conceptos que componen el riesgo.

La idea anterior se refuerza con lo señalado por Reyes *et al.* (2017), el riesgo y sus diversos conceptos asociados son factores socialmente construidos, es decir, que los eventos naturales extremos pueden transformarse en amenaza solamente cuando se establece una interacción humana con dicho evento, lo mismo ocurre con la vulnerabilidad, el aumento o disminución de estos factores depende de las conductas individuales y colectivas de los humanos.

La gestión del riesgo de desastre en las últimas décadas ha comenzado a girar su interés hacia una percepción que entiende la relación entre variables sociales y biofísicas, dentro de múltiples escalas temporales y espaciales (Calderón y Frey, 2017).

### **2.3.1. Gestión del riesgo**

Partiendo de la premisa que el riesgo es contraproducente para el desarrollo de las distintas comunidades, ya que los diversos eventos socionaturales conllevan consecuencias económicas, como la pérdida de infraestructura, de empleos o la disminución del dinamismo económico. La ocurrencia de cualquier evento socionatural, se traduce en la disminución del desarrollo alcanzado por la comunidad afectada.

El concepto gestión del riesgo surge para explicitar la relación entre riesgo y desarrollo, la cual también puede ser inversa, es decir, que el desarrollo limitado de una sociedad o comunidad frente a otra, se traduce en que la comunidad que posee un menor nivel de desarrollo se encuentra más vulnerable o puede verse afectada en mayor grado ante un evento catastrófico, lo que puede llevar a un círculo vicioso, en el que los desastres perturben el desarrollo de una comunidad y al verse menos desarrollada, esta sea más susceptible a la ocurrencia de desastres.

Un aspecto notable de la gestión de riesgo es la relación entre riesgo cotidiano y riesgo de desastre. Al tener que enfrentar diariamente el riesgo cotidiano asociado con la pobreza, múltiples poblaciones perciben el riesgo de desastres o construyen imaginarios en torno a este, de tal manera que parecen estar minimizando la importancia de lo que objetivamente es de una dimensión significativa (Narvaez *et al.*, 2009). En otras palabras, se posterga la toma de decisiones y la inversión de esfuerzos en la reducción del riesgo de desastres, para poder lidiar y enfrentar el riesgo cotidiano. Esto influye enormemente en la capacidad de acción e intervención y sobre los mecanismos de toma de decisión.

Lo más interesante de la gestión del riesgo de desastres es lo que señalan los autores Herzer *et al.* (2002), establecen que la gestión del riesgo de desastres no los reduce a productos o a las formas de enfrentarlos una vez ocurridos, sino que enfatiza su carácter de procesos a través de los cuales la vulnerabilidad se conforma históricamente, un desastre, en este enfoque, no es algo externo y extraordinario que irrumpe en el funcionamiento de una sociedad estabilizada, sino que es un producto y un proceso social, paulatinamente construido en el contexto de "normalidad" de una población determinada. No obstante, el desastre, producto de la acumulación de vulnerabilidades socialmente

construidas, tiende a ser visualizado como un momento de ruptura o crisis de las estructuras de lo cotidiano, como algo extraordinario. La situación de crisis, por el contrario, se gesta progresivamente en el seno de la "normalidad" y constituye un momento particular en el devenir histórico de la sociedad afectada por el desastre (Herzer *et al.*, 2002).

La gestión del riesgo de desastre no solo tiene en cuenta los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y todos aquellos que conforman el riesgo, también relaciona este concepto con el desarrollo y aborda las diferentes etapas temporales que van generando el desastre, como la etapa de prevención y la de mitigación.

La prevención se refiere al conjunto de actividades que buscan reducir o eliminar la incidencia de elementos físicos potencialmente dañinos. El término mitigación refiere a aquellas actividades que intentan reducir la vulnerabilidad de una sociedad frente a los eventos físicos. Por actividades de mitigación debe entenderse las modificaciones en la estructura de la sociedad y en sus elementos constitutivos vinculados o relacionados con los tipos genéricos de vulnerabilidad (Wilches–Chaux, 1993).

## 2.4. Incendios forestales

Un incendio es por definición el fuego que se extiende sin control y afecta la vegetación que no está destinada a arder, por lo cual, para que exista un incendio es esencial la falta de control de este (CEIS, 2015). Los diversos ecosistemas necesitan el fuego para la regeneración de bosques y montes, ya que permiten los rebrotes y germinación de la vegetación tras su paso por el territorio, el problema, es que en la actualidad han perdido este carácter y se convierten en un lastre para la biodiversidad y la seguridad de la población (CEIS, 2015).

La variable humana en la ocurrencia de incendios forestales es un factor clave, sin esta, la mayoría de los incendios forestales no se producirían, entre los factores que explican este fenómeno, se puede encontrar la despoblación rural, con el abandono paulatino de prácticas sostenibles de uso del monte y la despreocupación social acerca de los valores del monte mediterráneo (Iglesias *et al.*, 2007).

Al analizar y revisar que factores o variables son las que intervienen en la dinámica y desarrollo de los incendios forestales, existen elementos que la mayoría de los autores repiten o consideran de suma importancia, estos elementos se pueden clasificar en variables biofísicas y variables de carácter social. Entre las variables biofísicas podemos encontrar la pendiente y la orientación que son claves debido a la cantidad de radiación solar que recibe un terreno, la humedad presente en el ambiente y el hecho de que, al haber un incendio forestal, las especies que están pendiente arriba de la línea del fuego

son precalentadas, perdiendo humedad, favoreciendo la propagación del fuego pendiente arriba (Ortiz, 2009). Por otra parte, las variables de carácter social hacen referencia a todas aquellas en que tiene intervención directa el ser humano, como la densidad de población, distribución de líneas de alta tensión o existencia de extensiones de cultivos (Ortiz, 2009).

Por otra parte, las condiciones climáticas son una gran fuente de variables que determinan la probabilidad de ignición de incendios forestales, los procesos atmosféricos se pueden clasificar en 2 categorías diferentes pero complementarias entre sí, que actúan a diferentes escalas temporales y determinan la ocurrencia de incendios forestales. La primera clasificación de estos procesos es la variabilidad diaria, ligada a circulaciones sinópticas específicas, que disparan la actividad de los fuegos, generalmente se desarrollan en una escala local, la segunda clasificación es la variabilidad estacional, en forma de anomalías climáticas vinculadas a las oscilaciones de la circulación atmosférica a escala hemisférica, que generan unas condiciones ambientales a largo plazo favorables a los incendios (Carracedo *et al.*, 2009).



## **2.5. Formas de analizar los incendios forestales**

### **2.5.1. Simuladores, modelos y métodos**

Ante la situación de que los incendios forestales sean cada vez más recurrentes y de mayor intensidad, es importante establecer un método que analice la probabilidad de ignición de incendios forestales, para ello, se pueden ejecutar diferentes modelos que intenten identificar las zonas más propensas. Es importante señalar que para la concreción de estas aproximaciones, los autores que aplican el análisis son los encargados de investigar mediante rigurosas revisiones de bibliografía y decidir las variables o factores que consideren más apropiados para el área de estudio que se esté analizando.

El simulador “wildfire hazard potential” (WHP), es desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos, que utiliza variables físicas como la vegetación, el material inflamable o la topografía para establecer las zonas más propensas de ignición dentro de su territorio nacional (USDA, 2021), esto tiene la clara desventaja de no contar con variables humanas, que son los principales causantes de incendios forestales.

Otra metodología para realizar un modelo de probabilidad de ignición de incendios forestales es llevar a cabo un análisis multicriterio, en el que se procede con una selección de variables con base en una revisión bibliográfica, con la cual el autor define las variables, el nivel de importancia y la ponderación que se le otorgara a cada una en su análisis (Alegría, 2020).

### **2.5.2. *Machine learning***

El *Machine Learning* es una disciplina del campo de la inteligencia artificial que, a través de algoritmos dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones (análisis predictivo). Este aprendizaje permite a los computadores ejecutar tareas específicas de forma autónoma, es decir, sin necesidad de ser programados. El término se utilizó por primera vez en 1959, sin embargo, ha ganado relevancia en los últimos años debido al aumento de la capacidad de computación y al boom de los datos.

Los algoritmos de *Machine Learning* se dividen en tres categorías.

Aprendizaje supervisado: estos algoritmos cuentan con un aprendizaje previo basado en un sistema de etiquetas asociadas a unos datos que les permiten tomar decisiones o hacer predicciones. Un ejemplo es un detector de spam que etiqueta un e-mail como spam o no dependiendo de los patrones que ha aprendido del histórico de correos (remitente, relación texto/imágenes, palabras clave en el asunto, etc).

Aprendizaje no supervisado: estos algoritmos no cuentan con un conocimiento previo. Se enfrentan al caos de datos con el objetivo de encontrar patrones que permitan organizarlos de alguna manera. Por ejemplo, en el campo del marketing se utilizan para extraer patrones de datos masivos provenientes de las redes sociales y crear campañas de publicidad altamente segmentadas.

Aprendizaje por refuerzo: su objetivo es que un algoritmo aprenda a partir de la propia experiencia. Esto es, que sea capaz de tomar la mejor decisión ante diferentes situaciones de acuerdo con un proceso de prueba y error en el que se recompensan las decisiones correctas. En la actualidad se está utilizando para posibilitar el reconocimiento facial, hacer diagnósticos médicos o clasificar secuencias de ADN.

### **2.5.3. *Random forest***

Los Bosques aleatorios son uno de los algoritmos más utilizados dentro de la disciplina del *Machine learning*, aunque su capacidad predictiva es superada por otros algoritmos muy específicos, los árboles de decisión son de uso frecuente por su sencilla implementación y fácil interpretación. Este algoritmo es de la subclasificación de aprendizaje supervisado, ya que el investigador es quien le entrega una base de conocimiento al sistema, que está formada por ejemplos de etiquetados anteriores, como las variables que determinan un incendio forestal.

Un árbol de decisión puede usarse para crear modelos predictivos automatizados, conocido como "el aprendizaje basado en árboles de decisión", este método toma en consideración las observaciones sobre un elemento para predecir su valor. En estos árboles de decisión, los nodos representan datos, cada ramificación contiene un conjunto de atributos o reglas de clasificación asociadas a una etiqueta de clase específica, que se halla al final de la ramificación. Cada dato adicional ayuda a que el modelo prediga de forma más precisa a qué conjunto finito de valores pertenece el elemento, esta información

se puede usar posteriormente como una entrada en un modelo más grande de toma de decisiones.

El algoritmo *Random forest* o Bosque de decisiones aleatorio, se le llama “bosque” porque se forma a partir de muchos árboles de decisión. Los datos de estos árboles luego se fusionan para garantizar que las predicciones sean lo más precisas posibles. Mientras que un árbol de decisión en solitario tiene un resultado y un rango reducido de grupos, el bosque asegura un resultado más preciso con una mayor cantidad de grupos y decisiones, además tiene el beneficio adicional de agregar aleatoriedad al modelo al encontrar la mejor característica entre un subconjunto aleatorio de características.

Un bosque aleatorio es un grupo de árboles de decisión, sin embargo, hay algunas diferencias entre los dos, un árbol de decisión tiende a crear reglas que utiliza para tomar decisiones, mientras que un bosque aleatorio elegirá características al azar y hará observaciones, construirá un bosque de árboles de decisión y luego promediará los resultados, la teoría es que una gran cantidad de árboles no correlacionados crearán predicciones más precisas que un árbol de decisión individual, lo cual se debe a que el volumen de árboles trabaja en conjunto para protegerse entre sí de errores individuales y sobreajuste del modelo.

## **2.6. Probabilidad de ignición de incendios forestales**

Este documento busca obtener como resultado la probabilidad de ignición de incendios forestales, es importante destacar que no se utilizan los conceptos de riesgo o sus términos asociados, como la amenaza, para referirse a los resultados, ya que, en el caso de la amenaza, si bien se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento, algo muy similar al resultado esperado, se diferencian en que la amenaza tiene en cuenta variables físicas, mientras que este análisis incorpora variables sociales con algún factor humano, en este sentido, se podría asociar al concepto de riesgo, pero como se ha mencionado anteriormente, el término riesgo se construye con base en sus conceptos asociados, como la vulnerabilidad o la resiliencia, en este sentido, este documento no abarca la resiliencia, por lo que no es posible señalar que los resultados obtenidos sean los niveles de riesgo ante incendios forestales. Debido a lo anterior, es que se utiliza el concepto de probabilidad de ignición de incendios forestales para referirse a los resultados obtenidos, ya que estos se construyen teniendo en cuenta las variables físicas y sociales, como la densidad de población, la distancia a caminos o la cobertura de suelo.

### **3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Establecer relaciones entre variables predictoras e impulsoras de incendios forestales en el área metropolitana de Valparaíso, como herramienta para definir áreas prioritarias de gestión prospectiva y reducir la probabilidad de ignición de incendios forestales.

#### **3.2. Objetivos específicos**

-Identificar las variables predictoras de los incendios forestales en el área de estudio y establecer sus relaciones con la variable dependiente.

-Establecer las diferencias de las variables predictoras entre incendios forestales e incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio.

-Definir áreas prioritarias de gestión de desastres ante los incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio.

## 4. PREGUNTA E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. Pregunta de investigación

Ante los antecedentes presentados, surge la interrogante o pregunta de investigación que guiara este trabajo ¿Cuáles son las variables más importantes que explican la probabilidad de ignición de incendios forestales en el área de estudio y qué nivel de importancia tiene cada una de estas?

### 4.2. Hipótesis

Con base en los trabajos analizados y mencionados en el apartado de marco teórico, se identifican una gran cantidad de variables que son señaladas como factores que determinan la probabilidad de ignición de incendios forestales, es importante señalar que cada zona es diferente y puede que algunas variables tengan más o incluso ningún peso en la probabilidad de ignición de incendios forestales si se comparan 2 territorios distintos, por eso el análisis con base en métodos de aprendizaje automático, como el método *Random Forest*, son ideales para determinar las variables predictoras de manera estadística.

Si se toman en cuenta los trabajos realizados específicamente en el área de estudio del área metropolitana de Valparaíso, las variables predictoras más probables de encontrar serían: Pendiente, Exposición, Red vial, Área quemada, Eventos históricos de incendios, Densidad de habitantes, Distancia a área poblada y Cambio de uso de suelo.

Entre todas estas variables, las más probables serían la densidad de habitantes y la distancia a áreas pobladas, ya que, la probabilidad de ignición de incendios forestales tiene relación con el actuar del ser humano, ya sea de manera individual como colectiva, por lo que las variables que tengan relación con la sociedad tienen una mayor preponderancia y explicarían en un porcentaje mayor la probabilidad de ignición de incendios forestales en el área de estudio.



## 5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

### 5.1. Mapa metodológico general

A continuación, se presenta la figura 4 que simplifica los procesos metodológicos que se realizan para lograr los resultados esperados.

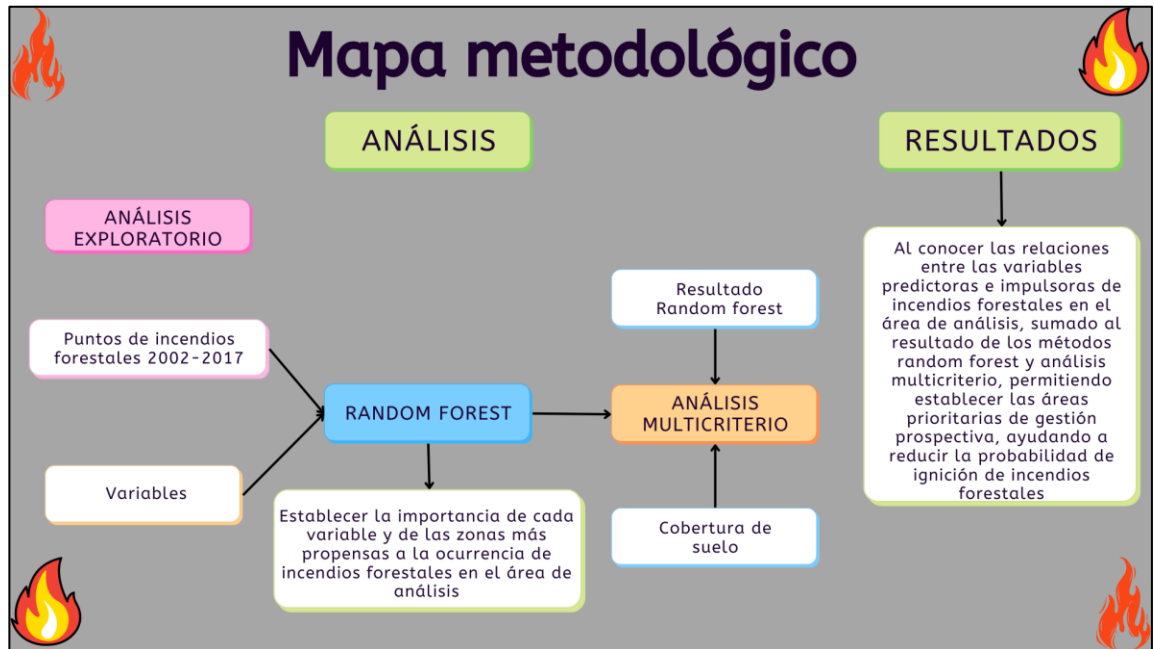
Figura 4: Mapa metodológico parte A.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El proceso metodológico se puede dividir en 5 grandes etapas o pasos que engloban diversas actividades, estas etapas son la revisión bibliográfica que genera parte de los insumos para el análisis, el procesamiento de las variables permite lograr que las variables sean útiles en los diversos programas que se utilizarán, como lo son ArcGis Pro 3.0.2. y Rstudio 2022.07.2 Build 576, el análisis exploratorio permite la búsqueda de relaciones entre los datos, estableciendo las variables idóneas para utilizar en el análisis y la limpieza de los puntos de incendios forestales para que se puedan relacionar con las variables de estudio, finalmente se encuentra la parte del análisis en sí mismo, el cual implica el análisis de los datos, que son las variables predictoras y los puntos de incendios forestales a través del programa Rstudio, buscando sus relaciones y dinámicas que permitan llegar a los resultados que se esperan, es decir, conocer las relaciones entre las variables predictoras e impulsoras de incendios forestales en el área de estudio, sumado al resultado de los métodos *random forest* y análisis multicriterio, permitiendo establecer las áreas prioritarias de gestión prospectiva y reducir la probabilidad de ignición de incendios forestales.

Figura 5: Mapa metodológico parte B.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

## 5.2. Puntos de ignición

Para el comienzo del análisis, lo primero que se debe identificar, son los puntos de ignición de incendios forestales, los cuales representan los lugares puntuales identificados por la CONAF donde se han iniciado incendios forestales en el área de estudio, estos puntos abarcan un período de tiempo que va desde el año 2002, que es cuando se comenzaron a registrar los incendios forestales por parte de la CONAF, hasta el año 2017. Estos puntos no se midieron con la misma exactitud a lo largo del tiempo, producto de variables tecnológicas y de presupuesto, por

este motivo es que la mayor cantidad de puntos de ignición identificados se encuentran desde el año 2010 en adelante, se podrían presentar problemas de falta de identificación de incendios forestales en los años anteriores al 2010, traduciéndose en una falta de datos para el análisis de esos años. Los puntos de ignición identificados por la CONAF se encuentran señalizados geográficamente por coordenadas UTM.

Un dato importante para tener en cuenta, es que algunos puntos identificados por la CONAF durante el periodo de tiempo 2002-2005 se encuentra señalados geográficamente en zonas en las que es imposible que se generaran incendios forestales, como el mar o zonas que se encontraban urbanizadas, este es uno de los tantos problemas que se deben solucionar en las fases posteriores del análisis.

### **5.3. Revisión bibliográfica**

La revisión bibliográfica realizada en este trabajo consiste en leer textos, artículos o investigaciones en las que se busque determinar las zonas más propensas a incendios forestales en diversas zonas del mundo y que en su metodología abarcaran *machine learning* de diversos tipos, ya sea *random forest*, *maxent* o análisis multicriterio, donde los autores justificaron el peso y la decisión de considerar cada variable. De todos los textos revisados, los que se muestran en la tabla 4 son los principales y a los cuales se recurrió para establecer las variables que se utilizaron en esta investigación.

Tabla 4: Textos y autores revisados para la selección de variables que tienen injerencia en la ocurrencia de los incendios forestales.

Nombre del texto (Año de publicación)	Autor (es)
Estudio y evaluación del riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal de las comunas que componen el Área Metropolitana de Valparaíso. Periodo 2000-2017. (2020)	Rafael alegría
Evidence-based mapping of the wildland-urban interface to better identify human communities threatened by wildfires. (2020)	Alejandro Miranda, Jaime Carrasco, Mauro Gonzáles, Cristobal Pais, Antonio Lara, Adison Altamirano, Andrés Weintraub y Alexandra Syphard.
Location, timing and extent of wildfire vary by cause of ignition. (2015)	Alexandra Syphard y Jon Keeley
Modeling Naturally Occurring Wildfires Across the US Using Niche Modeling. (2017)	Brandon Polk
Using fire to enhance rewilding when agricultural policies fail. (2021)	João Campos, Julia Bernhardt, Núria Aquilué, Lluís Brotons, Jesús Domínguez, Ângela Lomba, Bruno Marcos, Fernando Martínez-Freiría, Francisco Moreira, Silvana Pais, João Honrado y Adrián Regos
Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. (2021)	Xuhong Yang, Xiaobin Jin y Yinkang Zhou
Exploring the multidimensional effects of human activity and land cover on fire occurrence for territorial planning. (2021)	Jaime Carrasco, Mauricio Acuna, Alejandro Miranda, Gabriela Alfaro, Cristobal Pais y Andrés Weintraub
Data-based wildfire risk model for Mediterranean ecosystems – case study of the Concepción metropolitan area in central Chile. (2021)	Edilia Castillo, Alfonso Fernández, Rodrigo Fuentes Robles y Carolina Ojeda
Spatial Assessment of Wildfires Susceptibility in Santa Cruz (Bolivia) Using Random Forest. (2021)	Marcela Sánchez, Marj Tonini, Anna Mapelli y Paolo Fiorucci
Modeling burn probability: a maxent approach to estimating california's wildfire potential. (2015)	Andrew Thomason

Deep Learning Models for Predicting Wildfires from Historical Remote-Sensing Data. (2020)	Fantine Huot, Lily Hu, Matthias Ihme, Qing Wang, John Burge, Tianjian Lu, Jason Hickey, Yi-Fan Chen y John Anderson
Model-specification uncertainty in future area burned by wildfires in Canada. (2018)	Yan Boulanger, Marc-André Parisien y Xianli Wang
Exploratory Analysis of Driving Force of Wildfires in Australia: An Application of Machine Learning within Google Earth Engine. (2020)	Andrea Sulova y Jamal Arsanjani
Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo del Territorio del Área Metropolitana de Valparaíso (AMV) al cambio climático. (2019)	Ariel Muñoz, Corporación Andina de Fomento (CAF), Ministerio de Medio Ambiente (MMA), Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 5.4. Identificación de las variables predictoras

La selección de variables predictoras se define con base en la revisión bibliográfica mencionada anteriormente, estas variables seleccionadas se integrarán en el modelo *Random Forest*, para establecer estadísticamente las correlaciones entre ellas y seleccionar cuáles se incorporarán al análisis.

Las variables seleccionadas como predictoras de incendios forestales se pueden clasificar en 3 grandes grupos.

#### **5.4.1. Variables bioclimáticas**

Las variables bioclimáticas se derivan de la temperatura mensual y los valores de lluvia para generar variables biológicamente significativas, estas variables a menudo se usan en el modelado de distribución de especies y las técnicas de modelado ecológico relacionadas. Las variables bioclimáticas representan tendencias anuales (temperatura media, precipitación anual) de estacionalidad (rango anual en temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos o limitantes (temperatura de los meses más fríos y cálidos, precipitación de los meses más húmedos y secos y los trimestres más secos, húmedos, fríos y cálidos), un trimestre es un período de tres meses (1/4 del año).

En este caso, las variables seleccionadas fueron todas aquellas que se encuentran en el paquete de Bioclim, disponible en WorldClim en formato *raster*, estas variables son las que se presentan en la tabla 5.

#### **5.4.2. Variables topográficas**

Las variables topográficas son aquellas que permiten describir el relieve mediante un conjunto de medidas que definen características geométricas del terreno a diferentes escalas. Este proceso se conoce como parametrización del relieve, mediante la generación de un conjunto de medidas que describen las formas topográficas, permitiendo distinguir diferentes tipos de relieve o, en resumen, la descripción de formas topográficas.

Existen varias propuestas sobre las variables que deben incluirse en la parametrización del relieve. Entre ellas, la menos discutida es la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura (Weibel y Heller, 1991). Franklin y Peddle (1987) mencionan cinco parámetros básicos en este contexto: elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve.

En este caso, las variables seleccionadas son las que se presentan en la tabla 5. Estas 3 variables se obtienen mediante el procesamiento de un archivo *raster* DEM obtenido desde IDE Chile, específicamente es una imagen del satélite ALOS, el cual tiene una resolución de 12.5 m.

#### **5.4.3. Variables de factor humano**

Este tipo de variables se derivan de las interacciones, dinámicas y procesos que generan las diversas sociedades con su entorno, si bien cada sociedad tiene una cultura distintiva, que modifica las variables que se tienen en cuenta al momento de analizar la probabilidad de ignición de incendios forestales, es indudable que debido a la globalización e interconexión de las diversas sociedades las ciudades tienen una cultura cosmopolita, estas ciudades también son un elemento importante al momento de analizar la probabilidad de ignición de incendios forestales, ya que es donde se concentran las personas y existe una mayor probabilidad de ignición de incendios. En este caso, las variables seleccionadas son las que se presentan en la tabla 5.



La densidad de la población se obtiene mediante los datos del Censo 2017, los cuales se pueden trabajar en Redatam, programa mediante el cual se puede obtener un dato que representa la densidad de población de cada manzana censal, estos puntos se llevan a ArcGis Pro, donde mediante la herramienta “*Kernel Density*”, que calcula la densidad de las entidades de punto de alrededor de cada celda *raster* de salida.

Conceptualmente, se ajusta una superficie curva uniforme sobre cada punto. El valor de superficie es más alto en la ubicación del punto y disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto, alcanza cero en la distancia Radio de búsqueda desde el punto. Solo es posible un vecindario circular. El volumen bajo la superficie es igual al valor Campo de población del punto. Para calcular la densidad de cada celda *raster* de salida, se agregan los valores de todas las superficies de kernel en donde se superponen con el centro de la celda *raster*. La función kernel se basa en la función kernel cuártica que se describió en Silverman (1986).

La densidad prevista en una nueva ubicación (x,y) se determina con esta fórmula:

$$Density = \frac{1}{(radius)^2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{3}{\pi} \cdot pop_i \left( 1 - \left( \frac{dist_i}{radius} \right)^2 \right)^2 \right]$$

For  $dist_i < radius$

donde:

$i = 1, \dots, n$  son los puntos de entrada. Solo debe incluir puntos en la suma si están dentro de la distancia de radio de la ubicación  $(x,y)$ .

$pop_i$  es el valor de campo de población del punto  $i$ .

$dist_i$  es la distancia entre el punto  $i$  y la ubicación  $(x,y)$ .

Posteriormente, la densidad calculada se multiplica por el número de puntos. Esta corrección hace que la integral espacial sea igual que el número de puntos (o la suma o el campo de población) en lugar de que siempre sea igual que 1. Esta implementación usa una función kernel cuártica (Silverman, 1986). Será necesario calcular la fórmula para cada ubicación en la que desea estimar la densidad. Puesto que se está creando un *raster*, los cálculos se aplican al centro de cada celda en el *raster* de salida.

La distancia a caminos y la distancia a ciudades se obtienen de una manera similar, lo primero es obtener los caminos y áreas urbanas presentes en la zona de análisis, los cuales se obtienen desde IDE Chile, ambos elementos se encuentran en formato *shapefile*, los cuales mediante la herramienta “*Euclidian Distance*” permite crear un *raster* en el cual se calcule para cada celda, la distancia euclidiana hasta el origen más cercano (en este caso los distintos *shapefile* de caminos y áreas urbanas).

## 5.5. Procesamiento de Variables

### 5.5.1. Espacializar puntos de incendios forestales

Los puntos de incendios forestales son entregados por la CONAF con extensión .xls, es decir, que se pueden abrir con el programa excel. Para cada año se entrega un libro de excel con los incendios de la temporada correspondiente, que contiene las coordenadas UTM de cada incendio, sumado a que algunos incendios tienen otros datos, como el nombre del incendio, la fecha de inicio o la fecha de extinción del incendio, es importante mencionar que la mayoría de los incendios no cuentan con estos datos, además que no presentan mayor relevancia para la investigación.

Los archivos excel que contienen los incendios forestales se pueden cargar como tablas al programa ArcGis Pro, las cuales se pueden espacializar mediante la herramienta "*Display XY data*" al tener las coordenadas UTM que contiene cada tabla, obteniendo como resultado un *shapefile* con los incendios de cada año desde el 2002 hasta el 2016, estos *shapessfile* se deben unir en un solo archivo, lo que se realiza mediante la herramienta "*Merge*", la cual permite seleccionar los datos que conservará el *shapefile* resultante, en este caso, el *shapefile* contendrá todos los incendios forestales del área de estudio y sus coordenadas, ya que la herramienta tiene 1 parámetro que establece una máscara que limite el resultado, en este caso, el área de estudio.

### 5.5.2. Igualar variables de incendios forestales

En este punto de la investigación todas las variables se encuentran en formato *raster*, aunque no son todos los *rasters* iguales, es decir, algunos presentan diferentes extensiones, proyecciones o resolución, para incorporar las variables predictoras de incendios forestales al programa Rstudio, es necesario que todos los archivos *raster* presenten las mismas características, es por esto, que los archivos de las variables predictoras deben ser igualadas, mediante las herramientas de ArcGis Pro como “*Project Raster*” que permite definir la proyección de los *rasters*, “*Extract by Mask*”, que permite recortar los *rasters* según una máscara, logrando que todos tengan la misma extensión y finalmente la herramienta “*Resample*” que permite remuestrear la resolución espacial de un *raster* y establecer reglas para agregar o interpolar valores en los nuevos tamaños de píxel. El remuestreo de los píxeles se realiza de 2 métodos distintos según la variable remuestreada, en el caso de variables continuas se ocupa la técnica “cúbica”, que lleva a cabo una convolución cúbica y determina el nuevo valor de una celda basándose en el ajuste de una curva suave a través de los 16 centros de celdas de entrada más cercanos, en el caso de variables discretas se ocupa la técnica de remuestreo “Más cercano”, que ejecuta una asignación del valor de la celda según el valor vecino más cercano.

A continuación, se presenta la tabla 5, que resume las variables utilizadas, su resolución de entrada y de salida y la fecha de los datos. Todas las variables se igualaron a una resolución de salida de 250 m, ya que es un punto medio entre la menor y mayor resolución de entrada, es importante recalcar que las variables no se igualan a la resolución de entrada mayor, debido a que en el proceso de remuestreo se pueden perder datos, si el remuestreo es muy brusco, por lo mismo, es que en este proceso se realizó en 3 etapas para las variables

bioclimáticas, primero se remuestreo a 750 m, luego a 500 m y finalmente a 250 m.

*Tabla 5: Resumen de las variables utilizadas y sus características.*

Variables	Resolución de entrada	Resolución de salida	Fecha de los datos
Temperatura media anual (bio 1)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Rango diurno medio (bio 2)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Isotermalidad (bio 3)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Estacionalidad de la temperatura (bio 4)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Temperatura máxima del mes más cálido (bio 5)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Temperatura mínima del mes más frío (bio 6)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Rango anual de temperatura (bio 7)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)

Temperatura media del trimestre más húmedo (bio 8)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Temperatura media del trimestre más seco (bio 9)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Temperatura media del trimestre más cálido (bio 10)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Temperatura media del trimestre más frío (bio 11)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Precipitación anual (bio 12)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Precipitación del mes más lluvioso (bio 13)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Precipitación del mes más seco (bio 14)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Estacionalidad de la precipitación (bio 15)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Precipitación del trimestre más húmedo (bio 16)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)

Precipitación del trimestre más seco (bio 17)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Precipitación del trimestre más cálido (bio 18)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Precipitación del trimestre más frío (bio 19)	1000	250	Promedio del período 1970-2000 (Normal climática)
Densidad de la población	250	250	2017
Pendiente	250	250	2021
Orientación	250	250	2021
Distancia caminos	250	250	2018
Cobertura de suelo	30	250	2014
Elevación	12	250	2021
Distancia a ciudades	250	250	2018

Fuente: Elaboración propia, 2022.

## 5.6. Análisis exploratorio

### 5.6.1. Puntos de incendios forestales

Al espacializar los puntos de incendios forestales se identifican diferentes problemáticas asociadas a estos puntos, el primero es el ya mencionado, la existencia de puntos en lugares donde es imposible que ocurrieran incendios forestales, como el mar, diversos cuerpos de agua o áreas urbanas donde no existía vegetación en los años en que se desarrolló el incendio, por lo que es necesario identificar este tipo de puntos y eliminarlos.

Otro problema se pone en evidencia al ejecutar la herramienta en ArcGis Pro llamada “*Extract values to multi points*”, que extrae valores de celda en ubicaciones especificadas en una clase de entidad de punto desde uno o más *rasters* y registra los valores en la tabla de atributos de la clase de entidad de punto. Algunos puntos que se encuentran en las zonas límite del área de estudio no presentan valores de los *rasters*, por lo que es necesario eliminarlos de la misma forma que en el caso expuesto anteriormente.

### 5.6.2. Correlación de variables

En los pasos anteriores se seleccionaron variables que tienen injerencia en la ocurrencia de incendios forestales, pero estas se deben someter a una



correlación entre las mismas, con el objetivo de que las variables que se incluyan en el análisis tengan un nivel de correlación menor, evitando que las variables sean de cierta forma repetitiva y tenga injerencia en el resultado de la metodología.

La correlación de las variables se realiza mediante el programa Rstudio y la función "Cor", que establece el coeficiente de correlación de Pearson mediante la siguiente fórmula:

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N}$$

Donde:

"x" es igual a la variable número uno, "y" pertenece a la variable número dos, " $z_x$ " es la desviación estándar de la variable uno, " $z_y$ " es la desviación estándar de la variable dos y "N" es el número de datos.

El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente.

El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de 1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye.

Entre las principales ventajas del coeficiente de correlación de Karl Pearson se encuentran:

- El valor es independiente de cualquier unidad que se utiliza para medir las variables.
- Si la muestra es grande, es más probable la exactitud de la estimación.

Algunas de las desventajas del coeficiente de correlación son:

- Es necesario que las dos variables sean medidas a un nivel cuantitativo continuo.
- La distribución de las variables debe ser semejante a la curva normal.

Es importante señalar que la existencia de correlación entre variables no explica causalidad, esto se puede ejemplificar con un investigador que está ejecutando una correlación entre el cáncer y el matrimonio. En este estudio, existen dos variables: el cáncer y el matrimonio. Si el matrimonio tiene una correlación negativa con el cáncer. Esto significa que las personas casadas tienen menos probabilidad de desarrollar cáncer. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el matrimonio sea lo que evita de manera directa el cáncer. La correlación no establece un hecho, es decir, no explica causalidad.

Otra función utilizada en Rstudio es “Heatmaply\_cor”, la cual permite generar un dendrograma de las correlaciones entre las variables, lo que facilita la visualización de la correlación entre las variables.

### **5.6.3. Selección de variables**

Al disponer de la correlación de variables, se debe seleccionar finalmente las variables que serán incorporadas en el análisis ejecutado en el programa Rstudio, esta selección se basa en 4 criterios, el primero es la correlación y el dendrograma que se obtiene, mientras que el segundo criterio es la cantidad de veces que los autores usan la variable según la revisión bibliográfica, el tercero es la resolución de entrada de las variables, ya que las variables bioclimáticas tienen una resolución mucho menor que las variables topográficas, el criterio final es la subjetividad del autor.

## **5.7. Análisis**

### **5.7.1. Modelo *Random Forest***

El método llamado "*Random Forest*", es un método estadístico de aprendizaje automático, basado en árboles de decisión, pero usando una gran cantidad de estos árboles, donde cada árbol se crea seleccionando un subconjunto de datos de la muestra original, para luego combinar todos los árboles y así obtener un resultado. Un árbol de decisión es un algoritmo de aprendizaje supervisado que divide la muestra en conjuntos homogéneos basados en la variable de entrada más significativa para obtener una variable dependiente ya establecida, este árbol de decisión tiene desventajas como la pérdida de información al categorizar

variables continuas, la inestabilidad al modificar mínimamente la muestra se obtienen resultados radicalmente distintos o el sobre ajuste a los datos de entrenamiento (Orellana, 2018).

Debido a los problemas anteriores, se desarrolló el modelo *Random Forest*, el cual al usar una gran cantidad de árboles de decisiones y cada uno se entrena con una muestra aleatoria de los datos de entrenamiento o muestra del ejercicio, obteniendo un mejor rendimiento de generalización al compararlo con la ejecución de un solo árbol, son fáciles de usar comparado con otros métodos de aprendizaje estadístico, además de ser un método muy útil para la exploración de datos, identificando rápidamente las variables predictoras más importantes (Amat, 2020).

Es importante señalar que todos los métodos de ensamblaje estadístico y aprendizaje automático sufren el problema de equilibrio entre Bias (sesgo) y varianza. Bias hace referencia a una medida que refleja que tanto se alejan en promedio las predicciones del modelo con respecto a los valores reales, es decir que si la Bias es alta, quiere decir que el modelo no es capaz de aprender la relación entre las variables predictoras y la variable respuesta, mientras que la varianza hace referencia a cuanto cambia el modelo dependiendo de los datos utilizados en el entrenamiento, es decir, si la varianza es alta, el modelo está memorizando los datos en lugar de aprender la verdadera relación entre las variables predictoras y la variable respuesta (Orellana, 2018).

Una solución al problema anterior es el uso del modelo *Random Forest*, ya que, los árboles de decisión tienen por naturaleza un bajo Bias y alta varianza, el uso de varios árboles de decisión simultáneos permite reducir la varianza, siempre y

cuando los árboles individuales no estén correlacionados, para evitar esta correlación, *Random Forest* realiza una selección aleatoria de X cantidad de predictores de la muestra total para cada nodo o árbol, la mejor división entre estos X predictores es usada para ramificar cada árbol (Orellana, 2018).

El análisis y la construcción de este tipo de modelos se lleva a cabo con el software Rstudio mediante herramientas de programación. Es importante señalar que los resultados obtenidos se acompañan de los valores asociados a los errores y aciertos del modelo.

El modelo *random forest* en este análisis se encarga de determinar las zonas más propensas a incendios forestales en el área de estudio mediante la revisión de las variables dependientes y como estas se relacionan con los incendios forestales pasados.

Los modelos *random forest* pueden ser de regresión o clasificación, la regresión es útil para predecir productos que son continuos, esto significa que la respuesta a su pregunta se presenta mediante una cantidad que puede determinarse de manera flexible en función de las entradas del modelo en lugar de limitarse a un conjunto de etiquetas. Por otro lado, los algoritmos de clasificación se usan cuando el resultado deseado es una etiqueta discreta, en otras palabras, son útiles cuando la respuesta al problema cae dentro de un conjunto finito de resultados posibles.

En el caso de este análisis, se utiliza un modelo de regresión, ya que el resultado esperado son valores continuos que varían entre 0 a 1, donde el valor más alto

quiere decir que existe mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales con base en las variables independientes seleccionadas en los pasos anteriores, esta predicción que ejecuta el modelo se distribuye a lo largo de toda el área de estudio.

Para que el modelo funcione bien, es necesario llevar a cabo una serie de procedimientos que permiten disminuir los errores estadísticos del método, como el *Out of bag samples*, que consiste en establecer una parte de los datos para verificar el modelo, en este caso un 10% de los datos se seleccionan para esta función. La creación de puntos aleatorios que representan pseudoausencias también entra en estos procedimientos, estos puntos se generan para que existan puntos donde existen incendios y puntos donde no ocurrieron estos eventos, de esta forma, el modelo puede establecer el valor de las variables dependientes en el caso de la existencia de incendios y en el caso de ausencia de incendios. En este análisis, se crearon 641 puntos aleatorios, lo que da un total de 7.050 puntos en el caso de todos los incendios, por otra parte, en el caso de los incendios forestales de gran tamaño, se generaron 8 puntos aleatorios, lo que da un total de 83 puntos.

Para obtener un modelo que tenga el menor error posible y explique una gran parte de la varianza estadística, es necesario generar una gran cantidad de iteraciones ajustando y modificando los diversos parámetros, entre los que se encuentran:

- Ntree o número de árboles, este parámetro determina la cantidad de árboles que se encontraran dentro del bosque, mientras más árboles estén en el modelo será mejor, aunque esto conlleva mayor tiempo y capacidad de procesamiento.

- Mtry o cantidad de variables dependientes que se muestrean aleatoriamente como candidatas en cada división o árbol, generalmente se usa la fórmula  $= p/3$ .
- Keep.forest o si el modelo se queda con la información de los árboles que se han utilizado, permitiendo que el modelo realice predicciones futuras.

Para finalizar, se establecen los residuos cuadráticos medios (MSR), para lograrlo, se comienza con la suma de cuadrados de residuos (SSR). Es decir, la suma de los cuadrados de los residuos (desviaciones entre los valores predichos y los valores reales de los datos), pero dividido por el número de observaciones. La fórmula es la siguiente:

$$MSR = \frac{SSR}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}$$

Donde:

- N es el número de observaciones
- $\hat{y}_i$  es el valor estimado
- $y_i$ , es el valor observado

En cuanto al porcentaje de la varianza explicada, es la diferencia entre la varianza de destino y la varianza de error de la predicción. Otra estadística que se obtiene es la importancia de las variables dependientes y los *rasters* de las predicciones de los modelos para los casos del total de incendios forestales y los incendios forestales de gran tamaño.

Para ambos modelos se utiliza un número de árboles igual a 1.000, usando una gran cantidad de árboles, pero al mismo tiempo no superando el límite que requiera la necesidad de una gran cantidad de tiempo y capacidad de computación para la ejecución de los modelos. Por otra parte, la cantidad de variables independientes muestreadas aleatoriamente como candidatas para cada árbol en el caso de todos los incendios forestales tiene un valor de 2, ya que el total de variables que se utilizan en el análisis es de 7, mientras que en el caso de los incendios forestales de gran tamaño se utiliza un valor de 3, puesto que el número total de variables independientes utilizadas en el análisis es de 8.

### **5.7.2. Analisis multicriterio**

De los procesos *random forest*, se obtienen 2 resultados principales, que son archivos *rasters* que contienen la predicción de ocurrencia de incendios e incendios forestales de gran tamaño de los modelos estadísticos, estos archivos poseen valores que varían entre 0 y 1, donde los valores más cercanos a 1 son aquellas zonas más propensas a incendios forestales.

En los modelos estadísticos se dejó afuera una variable muy importante, que es la cobertura del uso de suelo, ya que los incendios forestales no se pueden producir en aquellas zonas en los que no existe combustible en forma de vegetación, esta variable se deja afuera de los modelos en Rstudio debido a que los análisis de regresión necesitan que las variables dependientes sean continuas, mientras que la cobertura de suelo es una variable categórica.



El análisis multicriterio consiste en la integración de varios criterios o factores a los cuales se les puede otorgar un peso específico dependiendo de su importancia en el resultado final, en este caso, en la propensión a incendios e incendios forestales de gran tamaño. En este trabajo se realizan 2 análisis multicriterio para cada categoría establecida, es decir, uno para todos los incendios forestales y otro para los incendios forestales de gran tamaño.

Los factores seleccionados para el análisis multicriterio son el resultado de cada modelo *random forest* y la cobertura de uso de suelo, los cuales se encuentran en formato *raster*.

#### **5.7.2.1. Reclasificaciones**

Es necesario reclasificar cada archivo *raster* resultante de los modelos *random forest* en una escala que va desde el valor 1 (menos susceptible a la ocurrencia de incendios) hasta el valor 5 (más susceptible a la ocurrencia de incendios), para que se puedan ponderar efectivamente y el resultado muestre las zonas más propensas a incendios e incendios forestales de gran tamaño en la misma escala de valores, es decir, valores de 1 a 5.

La otra variable que se incluirá en el análisis multicriterio también debe ser reclasificada, es decir, la cobertura de suelo debe ser reclasificada en 5 grupos, pero en este caso existen muchos más factores dentro de la variable cobertura de suelo, para clasificar cada cobertura de suelo dentro de alguno de los 5 grupos de reclasificación, se tienen en cuenta la revisión bibliográfica y la subjetividad del autor.

#### **5.7.2.2. Suma ponderada**

Cuando todos los factores están reclasificados, se utiliza la herramienta “Suma ponderada” de ArcGIS, la cual superpone varios *rasters* al multiplicar cada uno por su peso y sumar los resultados (ESRI, 2021). Para establecer los pesos específicos de cada factor, generalmente se utiliza el método de “matriz de comparaciones pareadas y razón de consistencia”, para comparar todos los factores entre sí. En el caso de este análisis, donde solo se superponen 2 variables, no es necesario esta matriz y los pesos específicos de los factores se determinan con base en la revisión bibliográfica y la subjetividad del autor.

El resultado final de esta metodología son 2 archivos *raster* que contienen la probabilidad de ignición de incendios e incendios forestales de gran tamaño cuyos valores van desde el 1 (menor probabilidad) hasta el 5 (mayor probabilidad), con base en las variables que se han presentado a lo largo de este análisis.

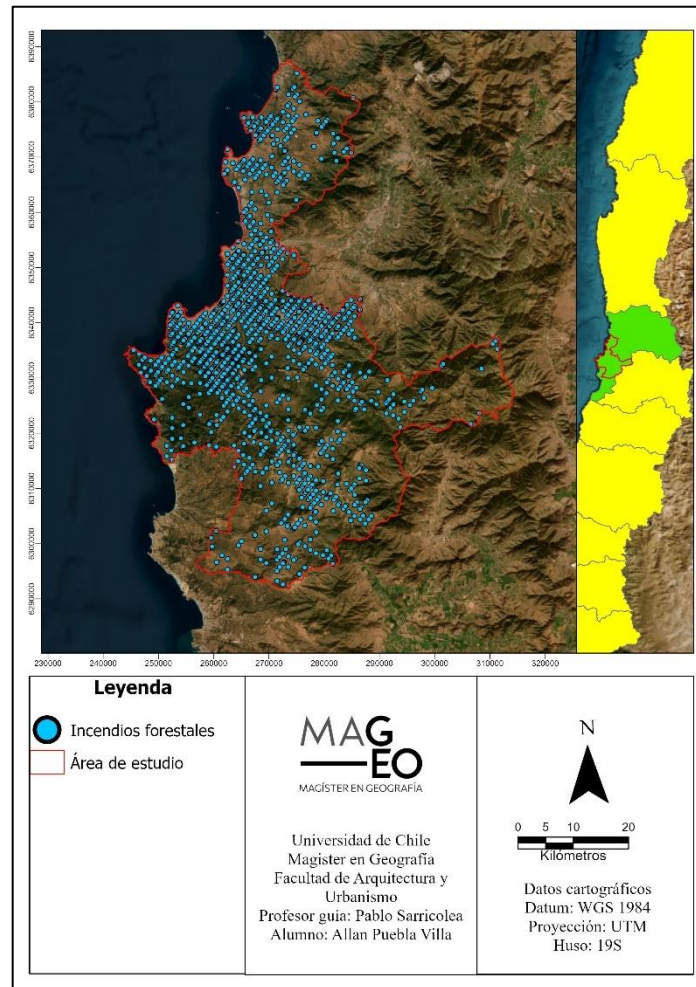
## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Análisis exploratorio**

#### **6.1.1. Limpieza de los puntos de incendios forestales**

Luego de proceder con la limpieza de los puntos de incendios forestales, dejando solamente aquellos que se encuentren dentro del área de estudio y eliminar aquellos que se encuentren en zonas en las que es imposible que ocurra un incendio forestal, como los cuerpos de agua, el mar o las zonas urbanas totalmente impermeable y sin vegetación. El resultado final de esta actividad es la figura 6, que muestra la totalidad de puntos que se tendrán en cuenta al llevar a cabo el análisis.

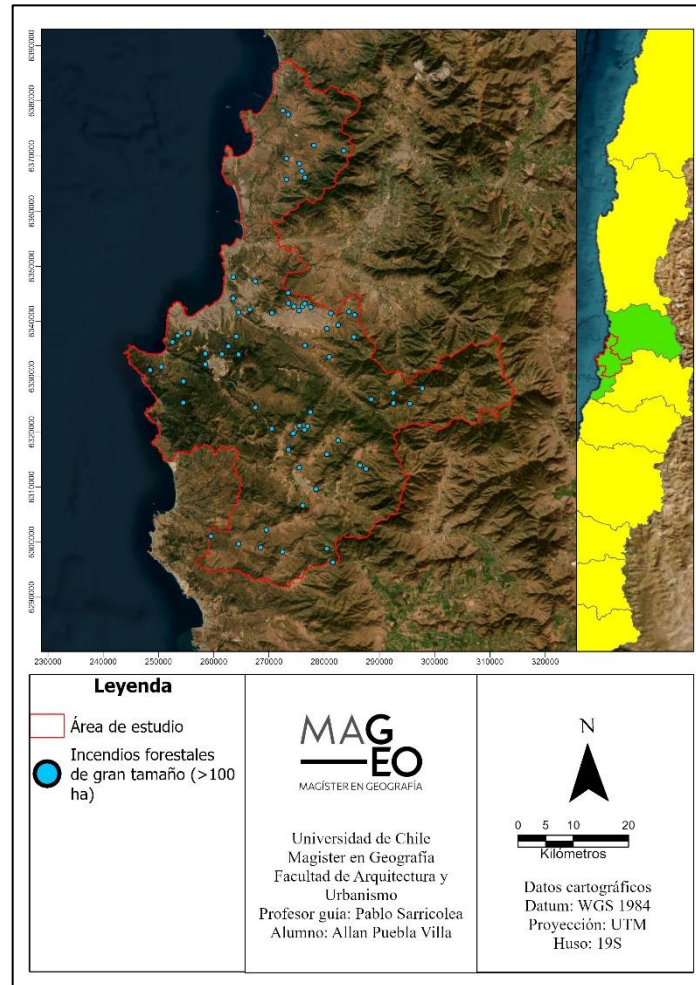
Figura 6: Puntos de incendios forestales en el área de estudio durante el periodo 2002-2017.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la CONAF, 2022.

El total de incendios analizados es de 6.409 eventos, entre los cuales se pueden identificar aquellos denominados como incendios forestales de gran tamaño, que se definen en el planteamiento del problema y son aquellos eventos que resaltan por sus características extremas, como el área o superficie que afectan. En este caso, se consideró incendios forestales de gran tamaño a todo aquel evento que haya afectado una superficie igual o superior a 100 ha, el número de incendios que cumplen esta regla es de 75 eventos, los cuales se reflejan en la figura 7.

Figura 7: Puntos de incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio durante el periodo 2002-2017.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la CONAF, 2022.

El incendio más devastador en el área de estudio afectó una superficie de 3.740 ha, se produjo durante la temporada 2007-2008, en la comuna de Valparaíso y fue denominado como “Llampaiquillo 2”.

### 6.1.2. Correlación entre variables

El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente.

Para interpretar un coeficiente de correlación, el primer paso es verificar si ha sido casual (si es o no es estadísticamente significativo) y en segundo lugar podemos valorar su magnitud. Una correlación estadísticamente significativa quiere decir que en una muestra semejante encontraríamos una correlación entre las dos variables distinta de cero (pero no necesariamente de una magnitud parecida). Podemos extrapolar el hecho de la relación, no su magnitud. Básicamente, el primer paso es descartar que la correlación encontrada sea producto del azar.

El límite convencional para descartar el azar es el 5%: afirmamos que una correlación es estadísticamente significativa cuando se podría explicar por factores aleatorios solamente 5 veces o menos de cada cien. Este umbral del 5% es convencional, pero es el aceptado habitualmente y se denomina nivel de confianza; suele expresarse  $\alpha = .05$  (probabilidades de error al afirmar la relación) o también (en positivo) nivel de confianza del 95% (probabilidades de acertar al afirmar la relación). La expresión habitual es  $p < .05$ , o probabilidad de error inferior al 5% al afirmar que se da una relación.

Al tener clara la significancia de la correlación, es importante tener en cuenta la magnitud de la correlación, si la magnitud es igual a 0, quiere decir que no existe

correlación, mientras que si el valor se acerca a 1 o -1, la relación se puede considerar de gran valor. Si bien, establecer el límite de considerar una correlación alta es bastante subjetivo, en la mayoría de las investigaciones, se considera que la magnitud es alta si el valor supera o iguala a 0.85. Otra forma de determinar cuando el valor de una correlación es de magnitud considerable, es comparar las correlaciones que se den en el análisis, es decir, comparar las correlaciones y sus magnitudes entre las diferentes variables del análisis.

#### **6.1.2.1. Todos los incendios forestales**

Al tomar en cuenta todos los incendios forestales y generar la matriz de correlación de variables se obtiene la figura 8, de la cual se pueden obtener varias afirmaciones, la primera tiene que ver con el nivel de significancia o p-valor de estas correlaciones, la mayoría de las relaciones presentan un p-valor mayor o igual a 0.05, por lo que se podría establecer que estas correlaciones son significativas, en el caso de la figura, aquellas casillas que poseen una X, quiere decir que poseen un nivel de significancia menor a 0.05, es decir, que no son significantes. La variable que presenta poca significancia en la correlación con las demás variables es la Orientación.

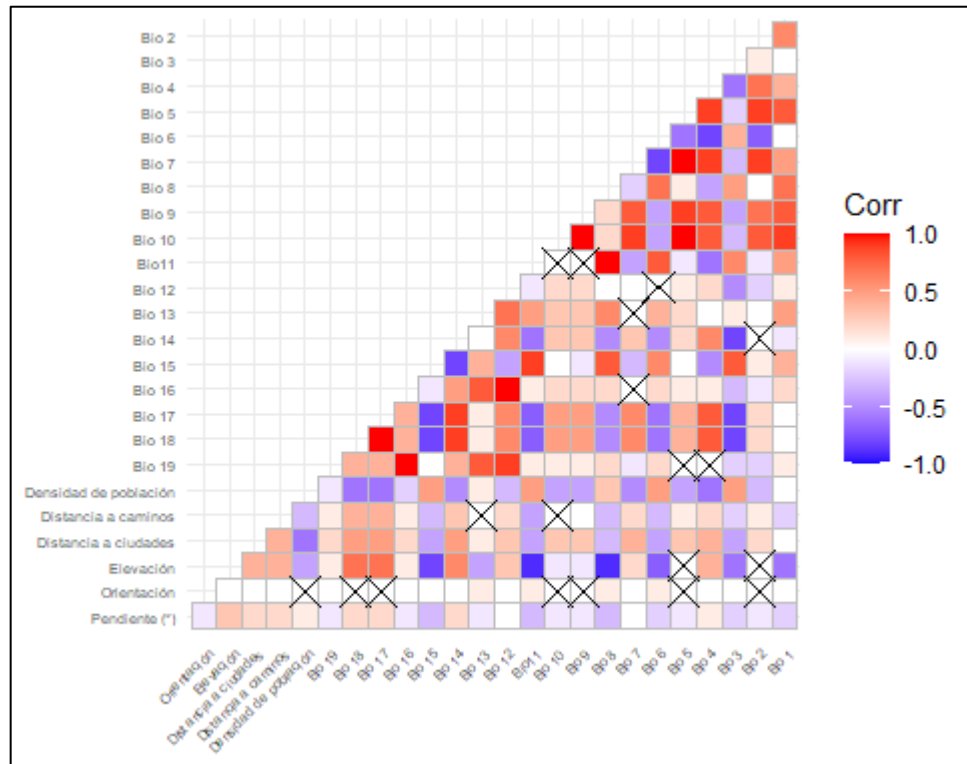
La segunda afirmación tiene que ver con las correlaciones entre las variables. Entre las correlaciones positivas con magnitud igual a 1 se encuentran las siguientes correlaciones: Bio 19 - Bio 16, las precipitaciones de los trimestres más frío y del más húmedo tienen una correlación absoluta, ya que muchas veces estos trimestres coinciden en el mismo lapso de tiempo, es decir, el trimestre más húmedo es generalmente también trimestre más frío; Bio 18 - Bio 17, la misma explicación se puede dar con esta relación, porque, el trimestre más cálido

también coincide con el trimestre más seco; Bio 16 - Bio 12, esta correlación tiene una magnitud alta, ya que, si la precipitación del trimestre más húmedo aumenta, la precipitación anual también lo hará; Bio 11 - Bio 8, la explicación de la coincidencia de trimestre también se da en el caso de la temperatura, el trimestre más húmedo y más frío coinciden, por lo que sus temperaturas promedio en estos periodos también lo harán; Bio 9 - Bio 10, el trimestre más seco y más cálido son los mismos, por lo que sus temperaturas promedio también coincidirán; Bio 7 - Bio 5, por último, el rango de temperatura se calcula mediante la fórmula = Bio 5 – Bio 6, por lo que su correlación se explica debido a que si aumenta la temperatura máxima del mes más cálido, el valor del rango de temperatura también aumentará.

Por otra parte, las correlaciones positivas con magnitud alta, es decir, aquellas que igualen o superen el valor de 0.9, son las siguientes: Bio 19 – Bio 12, el aumento de las precipitaciones en el trimestre más frío aumentará la precipitación anual; Bio 14 con las variables Bio 18 y 17, debido a que el mes más seco se da dentro de los trimestres más seco y cálido; Bio 10 – Bio 1, debido a que la temperatura promedio del trimestre más frío afecta la temperatura promedio anual; Bio 5 - Bio 9, ya que la temperatura máxima del mes más cálido se da en el mismo periodo de tiempo que el trimestre más seco; Bio 7 con las variables Bio 2 y Bio 4, la variable rango de temperatura anual representa una estadística anual relacionada con la temperatura, al igual que las variables rango promedio diurno de temperatura y la estacionalidad de la temperatura.



Figura 8: Matriz de correlación de variables predictoras de incendios forestales.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Finalmente, las correlaciones negativas que igualan o disminuyen el valor de  $-0.9$  son las siguientes: elevación con las variables Bio 9 y Bio 11, esto se da producto de que, al aumentar la elevación, la temperatura va disminuyendo progresivamente, por lo que es lógico que se dé esta correlación negativa.

### 6.1.2.2. Incendios forestales de gran tamaño

Al tomar en cuenta solo los incendios forestales de gran tamaño y generar la matriz de correlación de variables se obtiene la figura 9, de la cual se pueden

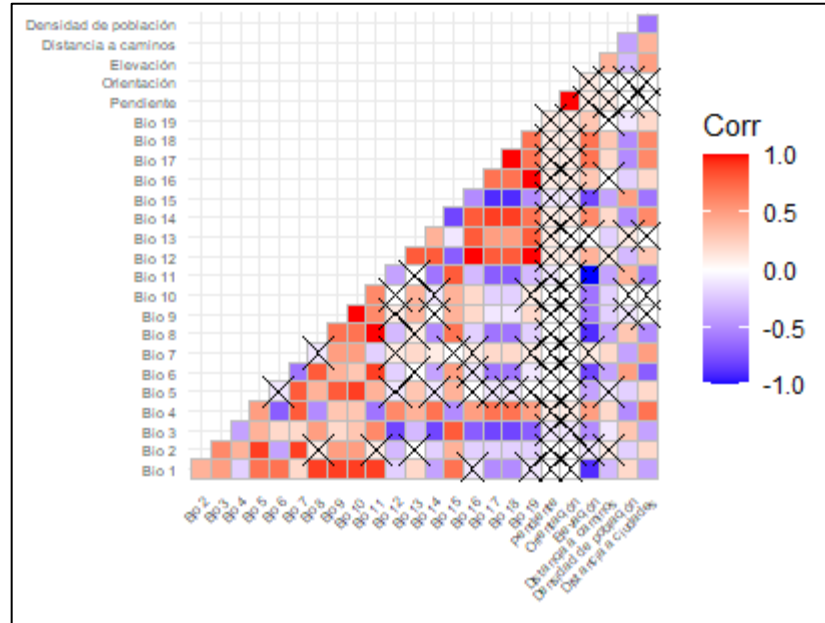
obtener varias afirmaciones, la primera tiene que ver el nivel de significancia o p-valor de estas correlaciones, la mayoría de las relaciones presentan un p-valor mayor o igual a 0.05, por lo que se podría establecer que estas correlaciones son significativas, en el caso de la figura, aquellas casillas que poseen una X, quiere decir que poseen un nivel de significancia menor a 0.05, es decir, que no es significativo. En este caso, existen muchas correlaciones que no tienen significancia estadística, especialmente en el caso de las variables pendiente y orientación con las demás variables, esta es la primera gran diferencia entre los incendios forestales y los incendios forestales de gran tamaño, pero su explicación se debe al escaso número de datos, ya que como se mencionó anteriormente, los incendios forestales de gran tamaño tomados en consideración son 75 eventos, mientras que el total de incendios forestales son 6.409 eventos, al aumentar el número de datos, las correlaciones son más significativas y sus magnitudes más confiables.

La segunda afirmación tiene que ver con las correlaciones entre las variables. Entre las correlaciones positivas con magnitud igual a 1 se encuentran las siguientes: Bio 17 – Bio 18, que se explica debido a que las precipitaciones de los trimestres más secos y cálidos dentro del año coinciden al ser generalmente el mismo periodo de tiempo; Bio 12 con las variables Bio 16 y Bio 19, ya que la precipitación anual será mayor si precipita más en los trimestres más húmedo y más frío; Bio 8 – Bio 11, esta relación se debe a que el trimestre más húmedo coincide con el trimestre más frío, por lo que sus temperaturas promedio son las mismas; Bio 9 – Bio 10, lo mismo sucede con las temperaturas del trimestre más seco y el trimestre más cálido; Bio 16 – Bio 19, esta relación se debe a que el trimestre más húmedo coincide con el trimestre más frío, por lo que sus precipitaciones son las mismas; Pendiente – Orientación, esta es una correlación inesperada e interesante, ya que a simple vista no existe ninguna explicación, por

lo que podría ser de valor explorar en otras investigaciones si esta correlación es producto del azar o tiene una justificación en el caso de los incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio.

Por otra parte, las correlaciones positivas con magnitud alta, es decir, aquellas que igualen o superen el valor de 0.9, son las siguientes: Bio 6 con las variables Bio 11 el mes más frío generalmente se encuentra dentro del trimestre más frío, por lo que sus temperaturas están altamente relacionadas; Bio 14 con las variables Bio 17 y Bio 18, el mes más seco generalmente se encuentra dentro de los trimestres más seco y más cálido, por lo que sus precipitaciones están altamente relacionadas; Bio 5 con la variable Bio 10, ya que la temperatura máxima en el mes más cálido influye en la temperatura promedio del trimestre más cálido; Bio 2 con las variables Bio 5 y Bio 7, porque el rango de temperatura promedio al ser mayor, implica que la diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas es mayor, estableciendo que las temperaturas máximas en los meses más cálidos sean mayores, como también que el rango de temperatura anual sea mayor; Bio 1 con las variables Bio 8, Bio 9, Bio 10 y Bio 11, la temperatura promedio anual tiene una clara correlación con la temperatura promedio en el trimestre más húmedo, con la temperatura promedio en el trimestre más seco, con la temperatura promedio en el trimestre más cálido y con la temperatura promedio en el trimestre más frío.

Figura 9: Matriz de correlación de variables predictoras de incendios forestales de gran tamaño.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En el caso de las correlaciones negativas que igualan o disminuyen el valor de -0.9 son las siguientes: Elevación con las variables Bio 8 y Bio 1, esto se da producto de que, al aumentar la elevación, la temperatura va disminuyendo progresivamente, por lo que es lógico que se dé esta correlación negativa; Bio 15 con las variables Bio 17 y Bio 18, esta correlación es otra diferencia que se encuentra con respecto al análisis de todos los incendios, esta correlación se da producto de que si la precipitación se da en los trimestres más cálidos y secos, quiere decir que la estacionalidad de la precipitación es menor, ya que está mucho menos concentrada en un período de tiempo. Finalmente, solo existe una correlación que presenta un valor de -1, la cual corresponde a las variables elevación y Bio 11, que se debe a que al aumentar la elevación la temperatura disminuye progresivamente.

### **6.1.3. Selección de variables**

Para definir las variables que se incorporan al análisis se diferencia entre todos los incendios y los incendios forestales de gran tamaño. Como factores a considerar para esta selección, se tiene en cuenta los resultados obtenidos de las correlaciones anteriores, para que de esta forma no se repitan variables altamente correlacionadas que no tendría sentido incorporarlas en el análisis, con la intención de graficar estas correlaciones se crean dendrogramas, en los que las variables se ordenan y agrupan según sus correlaciones, al trazar una línea paralela a las variables, se puede saber cuantas variables se utilizaran para el análisis, posteriormente, de cada grupo tocado por la línea se debe elegir una variable, esta elección se basa en criterios ya mencionados.

#### **6.1.3.1. Todos los incendios forestales**

Al generar la línea en el dendrograma que contiene la correlación de variables de todos los incendios forestales, como se muestra en la figura 10, en la que se observa que se seleccionaron un total de 7 variables, existen 2 grupos que poseen un número de 6 variables cada uno, pero también existen grupos que poseen 2 o incluso 1 variable cada uno, en el caso de que un grupo este conformado por solo 1 variable, esta es seleccionada.

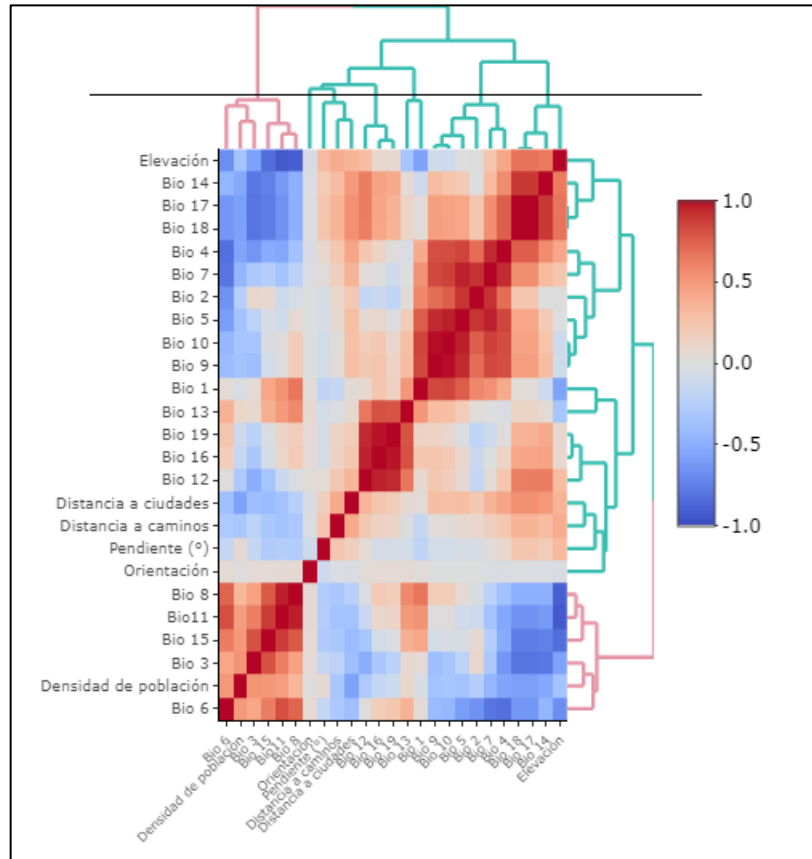
En el primer grupo, de izquierda a derecha, se encuentran 6 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 6, densidad de población, Bio 3, Bio 15, Bio 11 y Bio 8. De las variables anteriores, la seleccionada es la densidad de población, por diferentes razones, entre las que se encuentran, la resolución de

entrada, las variables bioclimáticas (1.000 m) poseen una resolución muy inferior a la densidad de población (250 m). Por otra parte, con base en la revisión bibliográfica, se puede establecer que la densidad de población es la variable más usada por los autores, específicamente 7 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sumado a lo anterior, la variable densidad de población es un factor humano.

En el segundo grupo solo tiene 1 variable, que es la orientación, como ya se ha mencionado, al tener solo 1 variable no es necesario realizar una elección.

En el tercer grupo se encuentran 3 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Pendiente, distancia a caminos y distancia a ciudades. De las variables anteriores, la seleccionada es la distancia a caminos, por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la distancia a caminos es la más utilizada entre los autores, específicamente 9 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas, a su vez, todas las variables tienen un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

Figura 10: Dendrograma con corte de las variables para todos los incendios forestales en el periodo de 2002-2017.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En el cuarto grupo se encuentran 3 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 12, Bio 16 y Bio 19. De las variables anteriores, la seleccionada es la precipitación anual (Bio 12), por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la precipitación anual es la más utilizada entre los autores, específicamente 4 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas (1.000 m), debido a que todas son variables bioclimáticas. Ninguna de estas variables tiene un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

En el quinto grupo se encuentran 2 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 13 y Bio 1. De las variables anteriores, la seleccionada es la temperatura media anual (Bio 1), por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la temperatura media anual es la más utilizada entre los autores, específicamente 3 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas (1.000 m), debido a que todas son variables bioclimáticas. Ninguna de estas variables tiene un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

En el sexto grupo se encuentran 6 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 9, Bio 10, Bio 5, Bio 2, Bio 7 y Bio 4. De las variables anteriores, la seleccionada es la temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10), por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la temperatura media del trimestre más cálido es la más utilizada entre los autores, específicamente 4 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas (1.000 m), debido a que todas son variables bioclimáticas. Ninguna de estas variables tiene un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

En el séptimo y último grupo se encuentran 4 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Elevación, Bio 14, Bio 17 y Bio 18. De las variables anteriores, la seleccionada es la elevación, por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la elevación es la más utilizada entre los autores, específicamente 8 autores utilizan esta variable en sus análisis. La resolución de entrada de la elevación (12 m), es mucho mayor que la de las variables bioclimáticas (1.000 m). Ninguna de estas variables tiene un factor



humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

En la tabla 6, se resumen las variables que se utilizan en el análisis en el caso de todos los incendios forestales, mostrando los autores que los utilizaron en sus análisis y un breve comentario sobre el uso que le daban a cada variable.

*Tabla 6: Resumen de las variables que se utilizan en el análisis de todos los incendios forestales.*

Variables	Autores que utilizaron la variable	Comentarios
Temperatura media anual (Bio 1)	Yang et al (2021); Boulanger et al (2018); Huot et al (2021);	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la probabilidad de ignición ante incendios forestales.
Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10)	Polk (2014); Jaque Castillo et al (2021); Sulova & Arsanjani (2021); Syphard & Keeley (2015)	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la probabilidad de ignición ante incendios forestales.
Precipitación anual (Bio 12)	Polk (2014); Yang et al (2021); Sulova & Arsanjani (2021); Huot et al (2021);	Los autores coinciden en una relación negativa entre la variable y la probabilidad de ignición ante incendios forestales.

<p>Densidad de la población</p>	<p>Alegria (2020); Miranda et al (2020); Syphard &amp; Keeley (2015); Muñoz et al (2019); Yang et al (2021); Sulova &amp; Arsanjani (2021); Thomason (2015);</p>	<p>Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la probabilidad de ignición ante incendios forestales. Es una de las variables que más autores utilizan en sus análisis, debido a la gran importancia del factor humano en los incendios.</p>
<p>Orientación</p>	<p>Alegria (2020); Polk (2014); Muñoz et al (2019); Sulova &amp; Arsanjani (2021);</p>	<p>Los autores coinciden en que las zonas que presentan una orientación en la cual se encuentran expuestas a mayores horas de sol son aquellas que tienen una mayor la probabilidad de ignición ante incendios forestales.</p>
<p>Distancia caminos</p>	<p>Alegria (2020); Miranda et al (2020); Syphard &amp; Keeley (2015); Muñoz et al (2019); Yang et al (2021); Carrasco et al (2021); Jaque Castillo et al (2021); Sulova &amp; Arsanjani (2021); Thomason (2015);</p>	<p>Los autores coinciden en una relación negativa entre la variable y la probabilidad de ignición ante incendios forestales. Es una de las variables que más autores utilizan en sus análisis, debido a</p>

		la gran importancia del factor humano en los incendios.
Elevación	Miranda et al (2020); Syphard & Keeley (2015); Polk (2014); Yang et al (2021); Carrasco et al (2021); Jaque Castillo et al (2021); Sánchez (2021); Sulova & Arsanjani (2021);	Los autores señalan que la altura se debe tener en cuenta debido a que afecta las coberturas del suelo, la temperatura, la precipitación y el viento, lo que puede aumentar o disminuir la probabilidad de ignición ante incendios forestales.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.1.3.2. Incendios forestales de gran tamaño

Al generar la línea en el dendrograma que contiene la correlación de variables de los incendios forestales de gran tamaño, como se muestra en la figura 11, en la que se observa que se seleccionaron un total de 8 variables.

En el primer grupo, en sentido de izquierda a derecha, se encuentran 2 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Distancia a caminos y elevación. De las variables anteriores, la seleccionada es la distancia a caminos, por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la distancia a caminos es la más utilizada entre los autores, específicamente 9 autores utilizan

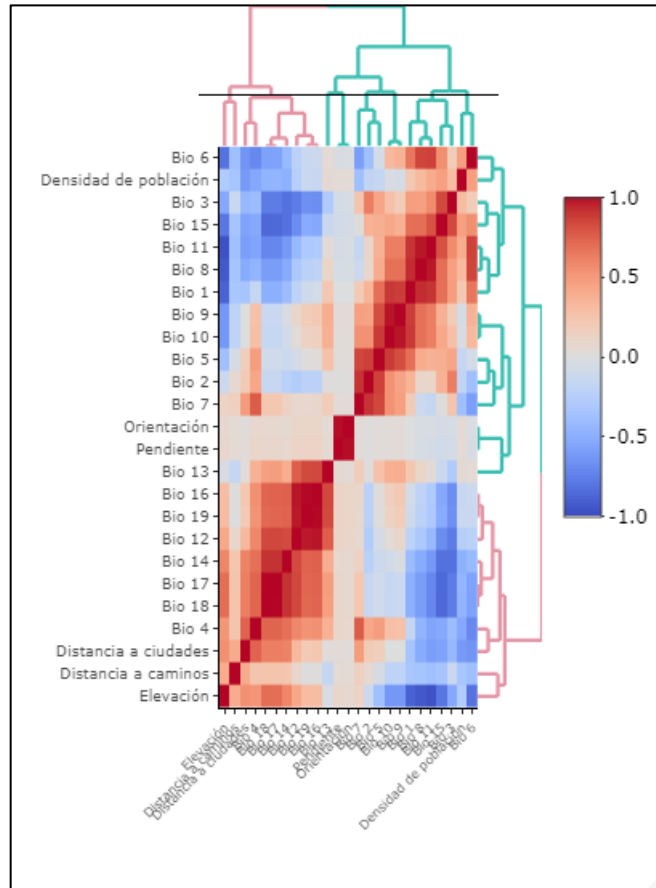
esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas o inferiores a la resolución de salida, por lo que no es un criterio para tener en cuenta, a su vez, la distancia a caminos tiene un factor humano, por lo que es un criterio que se usa para definir la variable seleccionada.

En el segundo grupo se encuentran 8 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Distancia a ciudades, Bio 4, Bio 18, Bio 17, Bio 14, Bio 12, Bio 19 y Bio 16. De las variables anteriores, la seleccionada es la distancia a ciudades, ya que presenta una mejor resolución de entrada que las variables bioclimáticas, posee un factor humano significativo y si bien la variable Bio 12 es más usada por los autores analizados, la resolución de entrada y el factor humano son más importantes al momento del análisis.

En el tercer grupo solo se encuentra 1 variable, la cual es: Precipitación del mes más lluvioso (Bio 13). Al ser la única variable existente en este grupo, se selecciona automáticamente producto de su poca correlación con las demás variables.

En el cuarto grupo se encuentran 2 variables, las cuales son: Orientación y pendiente. De las variables anteriores, la seleccionada es la pendiente, por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la pendiente es la más utilizada entre los autores, específicamente 8 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas (250 m), por otra parte, ninguna de las variables posee un factor humano.

Figura 11: Dendrograma con corte de las variables para los incendios forestales de gran tamaño en el periodo de 2002-2017.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En el quinto grupo se encuentran 3 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 5, Bio 7 y Bio 2. De las variables anteriores, la seleccionada es la temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5), por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la variable Bio 5 es la más utilizada entre los autores. Sus resoluciones de entrada son las mismas (1.000 m), a su vez, ninguna variable tiene un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada. La elección se basa principalmente en la idea de que, al existir una mayor temperatura máxima en el

mes más cálido, que coincide con la temporada de incendios, favorece la disminución de la humedad y el mejor estado del combustible en caso de un incendio forestal.

En el sexto grupo se encuentran 2 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 10 y Bio 9. De las variables anteriores, la seleccionada es la temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10), por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la temperatura media del trimestre más cálido es la más utilizada entre los autores, específicamente 4 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas, a su vez, ninguna de las variables tiene un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

En el séptimo grupo se encuentran 5 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 3, Bio 15, Bio 11, Bio 1 y Bio 8. De las variables anteriores, la seleccionada es la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8), por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la temperatura media del trimestre más húmedo es la más utilizada entre los autores, específicamente 3 autores utilizan esta variable en sus análisis. Sus resoluciones de entrada son las mismas, a su vez, ninguna de las variables tiene un factor humano, por lo que no es un criterio que se pueda usar para definir la variable seleccionada.

Finalmente, en el octavo grupo se encuentran 2 variables de las cuales se deben elegir, estas son: Bio 6 y Densidad de población. De las variables anteriores, la seleccionada es la densidad de población, por diferentes razones, entre las que se encuentran, la revisión bibliográfica, ya que la densidad de población es la

más utilizada entre los autores, específicamente 7 autores utilizan esta variable en sus análisis. La resolución de entrada es mejor en el caso de la densidad de población y posee un factor humano de suma importancia como la concentración de la población.

En la tabla 7, se resumen las variables que se utilizan en el análisis en el caso de los incendios forestales de gran tamaño, mostrando los autores que los utilizaron en sus análisis y un breve comentario sobre el uso que le daban a cada variable.

*Tabla 7: Resumen de las variables que se utilizan en el análisis de los incendios forestales de gran tamaño.*

Variables	Autores que utilizaron la variable	Comentarios
Temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5)	Muñoz et al (2019); Boulanger et al (2018); Syphard & Keeley (2015)	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la amenaza ante incendios forestales.
Temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8)	Polk (2014); Sulova & Arsanjani (2021); Thomason (2015);	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la probabilidad de ignición de incendios forestales.
Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10)	Polk (2014); Jaque Castillo et al (2021); Sulova & Arsanjani (2021); Syphard & Keeley (2015)	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la probabilidad de ignición de incendios forestales.

Precipitación anual (Bio 13)	Ningún autor	-
Densidad de población	Alegria (2020); Miranda et al (2020); Syphard & Keeley (2015); Muñoz et al (2019); Yang et al (2021); Sulova & Arsanjani (2021); Thomason (2015)	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la amenaza ante incendios forestales. Es una de las variables que mas autores utilizan en sus analisis, debido a la gran importancia del factor humano en los incendios.
Distancia a ciudades	Alegria (2020); Miranda et al (2020); Syphard & Keeley (2015); Muñoz et al (2019); Yang et al (2021); Carrasco et al (2021); Jaque Castillo et al (2021); Sulova & Arsanjani (2021); Thomason (2015)	Los autores coinciden en una relación negativa entre la variable y la amenaza ante incendios forestales. Es una de las variables que mas autores utilizan en sus analisis, debido a la gran importancia del factor humano en los incendios.
Pendiente	Alegría (2020); Miranda et al (2020); Polk (2014); Muñoz et al (2019); Yang et al (2021); Carrasco et al (2021); Sánchez	Los autores coinciden en una relación positiva entre la variable y la probabilidad de ignición de incendios forestales. Las pendientes más altas favorecen la propagación de los incendios forestales.



	(2021); Sulova & Arsanjani (2021);	
Distancia caminos	Alegría (2020); Miranda et al (2020); Syphard & Keeley (2015); Muñoz et al (2019); Yang et al (2021); Carrasco et al (2021); Jaque Castillo et al (2021); Sulova & Arsanjani (2021); Thomason (2015);	Los autores coinciden en una relación negativa entre la variable y la probabilidad de ignición de incendios forestales. Es una de las variables que más autores utilizan en sus análisis, debido a la gran importancia del factor humano en los incendios.

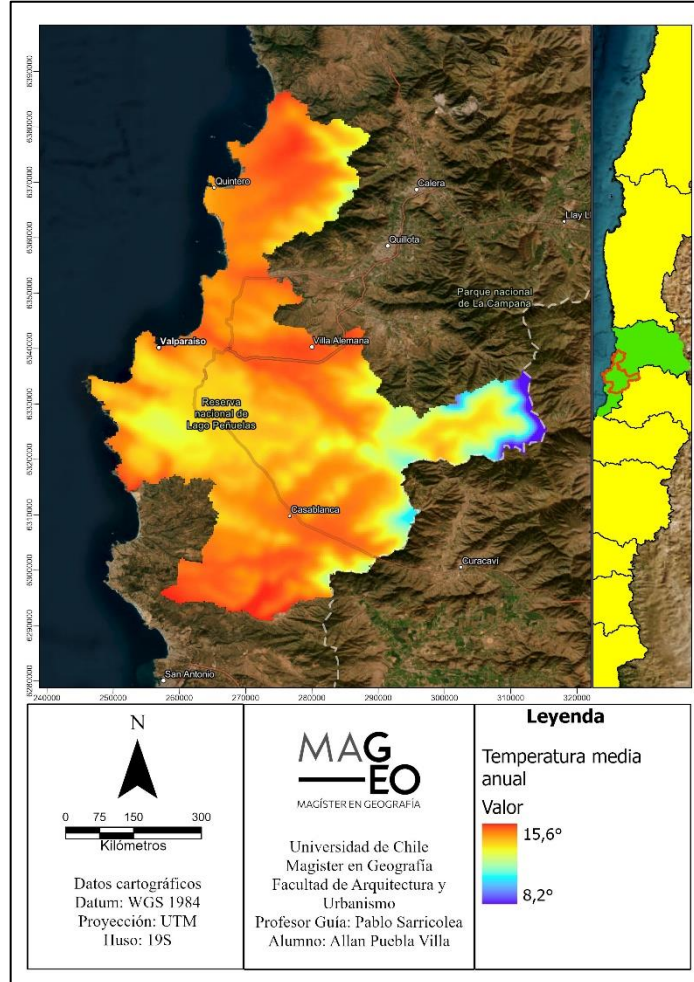
Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### **6.1.4. Espacialización de variables que se utilizan en el análisis**

##### **6.1.4.1. Temperatura media anual (Bio 1)**

Como se observa en la figura 12, la temperatura media anual varía entre los 8,2° y los 15,6°, los valores mínimos se presentan en las zonas de mayor altura del área de estudio, coincidiendo con los picos más pronunciados de la cordillera de la costa, los cuales se concentran el extremo este de la figura, por otra parte, los valores más altos se presentan sobre todo en los fondos de los valles más bajos y que se encuentran delimitados por cotas con valores pronunciados. Es importante destacar que la variación de la temperatura promedio anual es baja, solamente de 7,4°, que se explica en gran medida por la influencia del mar como regulador térmico, favoreciendo la escasa variación de temperatura entre el día y la noche.

Figura 12: Temperatura media anual.

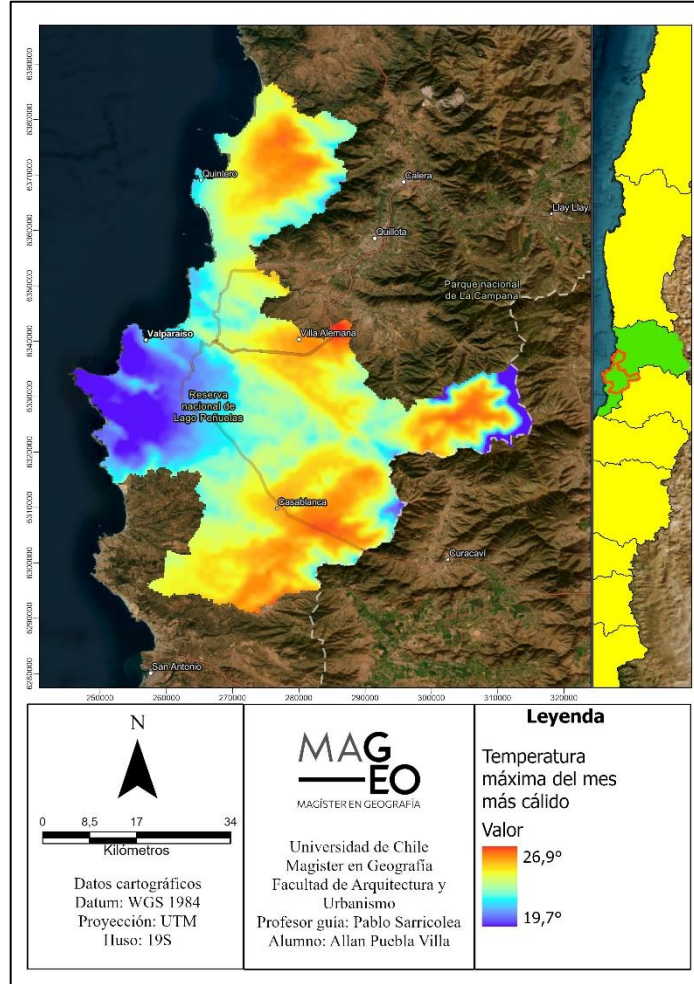


Fuente: Elaboración propia, 2023.

#### **6.1.4.2. Temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5)**

La figura 13 muestra como la temperatura máxima del mes más cálido varía exactamente  $7,2^{\circ}$ , siendo el valor más bajo  $19,7^{\circ}$  y el valor más alto  $26,9^{\circ}$ , las temperaturas más bajas se concentran en 2 grandes zonas, la primera es la que se encuentra en torno a la cordillera de la costa, en el extremo oriente del área de estudio, que es donde se registra la temperatura máxima de menor valor, la segunda se encuentra en la zona al sur de la ciudad de Valparaíso, donde se enmarcan el Lago Peñuelas y la Laguna de la Luz y las localidades de El Batro y Quintay, esta zona presenta valores que varían entre los  $20^{\circ}$  y los  $22^{\circ}$ . Los valores más altos se concentran en 3 grandes zonas, la primera y que presenta el valor más alto es un área de  $8 \text{ km}^2$ , que se encuentra entre las ciudades de Limache y Villa Alemana, la segunda zona es la ciudad de Casablanca y el poblado de La Vinilla, que registra valores que varían entre los  $25^{\circ}$  y  $26^{\circ}$ , la última zona es un área de  $98 \text{ km}^2$  en torno a la ciudad de Puchuncavi, que registra valores entre los  $24^{\circ}$  y  $26^{\circ}$ .

Figura 13: Temperatura máxima del mes más cálido.

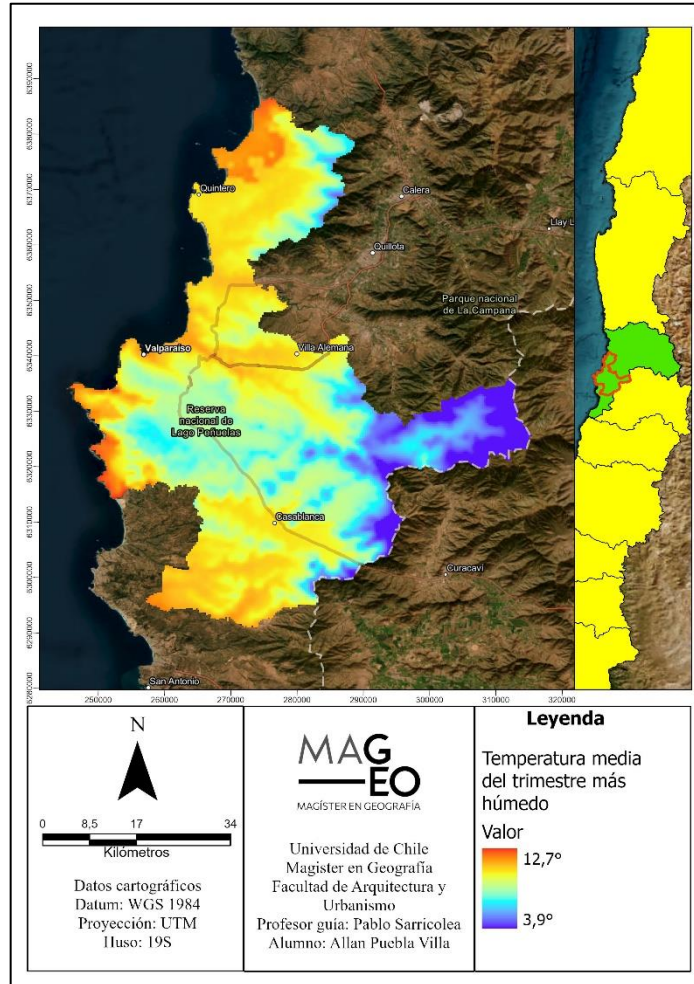


Fuente: Elaboración propia, 2023.

#### **6.1.4.3. Temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8)**

La temperatura media del trimestre más húmedo varía entre los 3,9 °C y 12,7 °C, tal como se muestra en la figura 14, en cuanto a su distribución espacial, es bastante similar a la temperatura media anual, aunque en este caso, al ser el periodo de tiempo del trimestre más húmedo, los valores son más bajos que en el caso de la temperatura media anual, pero se mantienen las mismas tendencias, es decir, los valores extremos inferiores se concentran en la zona oriente del área de estudio, donde están las alturas de la cordillera de la costa, por otra parte, las temperaturas más altas se encuentran en la zona costera, algo se diferencia de la variable Bio 1, en este caso los valores altos se concentran en los extremos norte y sur de las zonas costeras del área de estudio, la diferencia entre esta variable y la temperatura media anual, se debe principalmente a la influencia del mar como regulador térmico y el periodo que se analiza, es decir, el trimestre más húmedo del año.

Figura 14: Temperatura media del trimestre más húmedo.

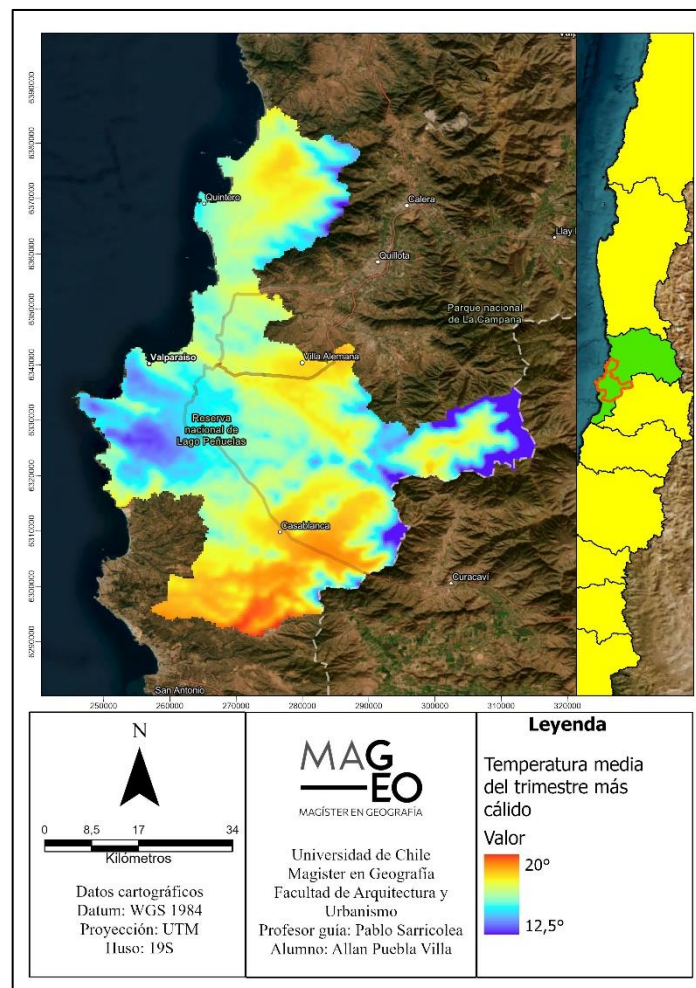


Fuente: Elaboración propia, 2023.

#### 6.1.4.4. Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10)

La temperatura media del trimestre más cálido, como se observa en la figura 15, presenta la concentración de los valores más altos solo en la zona sur del área de estudio, es importante destacar que los valores extremos altos están presente en mucha menor cantidad que en otros periodos del año, por otra parte, los valores bajos se concentran en el extremo oriente, donde se encuentran las alturas de la cordillera de la costa y en la zona del lago Peñuelas al sur de la ciudad de Valparaíso.

Figura 15: Temperatura media del trimestre más cálido.



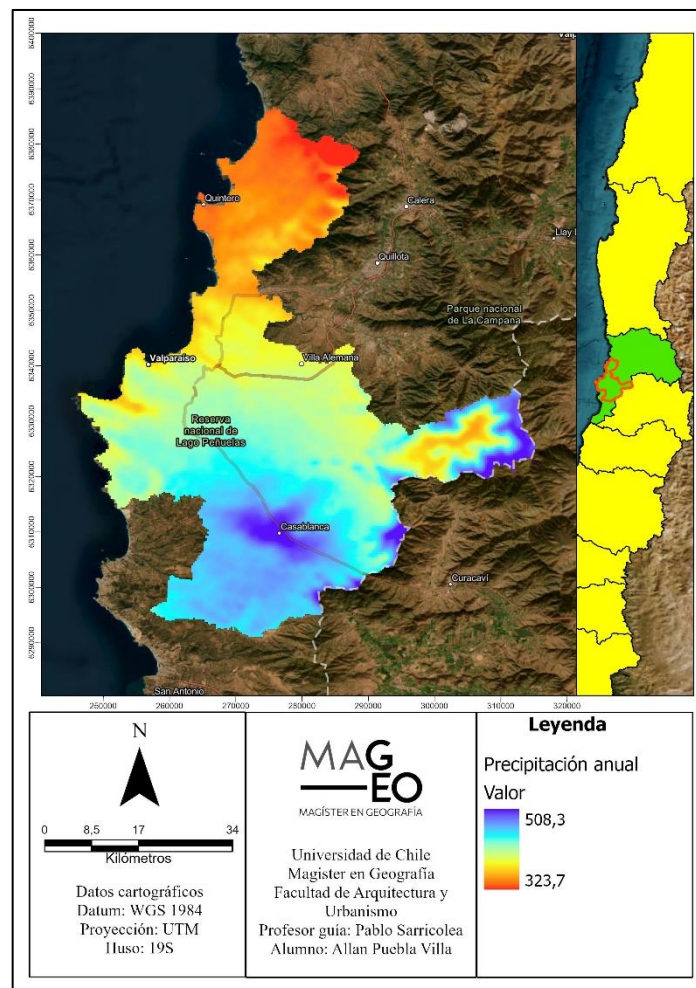
Fuente: Elaboración propia, 2023.



#### 6.1.4.5. Precipitación anual (Bio 12)

La precipitación anual se presenta en la figura 16, evidencia una clara tendencia en la que los valores van disminuyendo desde norte a sur, los valores varían entre los 323,7 mm y los 508,3 mm. Los valores de mayor precipitación se concentran en 2 principales zonas, la primera es la zona de la cordillera de la costa en las áreas orientales del área de estudio, la segunda es la ciudad de Casablanca que tiene una gran zona a su alrededor de gran precipitación, en cuanto a los valores bajos de lluvia caída se concentra en la zona norte del área de estudio.

Figura 16: Precipitación anual (mm).

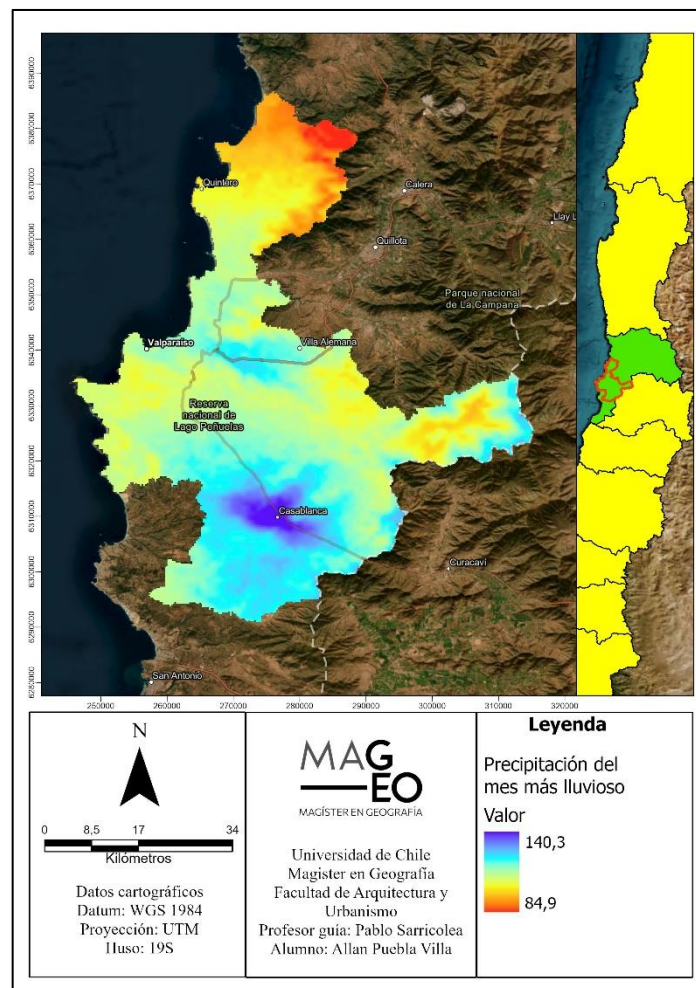


Fuente: Elaboración propia, 2023.

### 6.1.4.6. Precipitación del mes más lluvioso (Bio 13)

La precipitación del mes más lluvioso se presenta en la figura 17, que presenta características muy similares a la variable Bio 12 de Precipitación anual, como la clara tendencia de aumento de la precipitación de norte a sur, los valores más bajos de precipitación se concentran en la zona norte del área de estudio, lo llamativo de esta variable es que los valores de mayor precipitación no se concentran en la cordillera de la costa, sino que en la zona circundante a la ciudad de Casablanca, lo que es algo a considerar y destacar.

Figura 17: Precipitación del mes más lluvioso (mm).

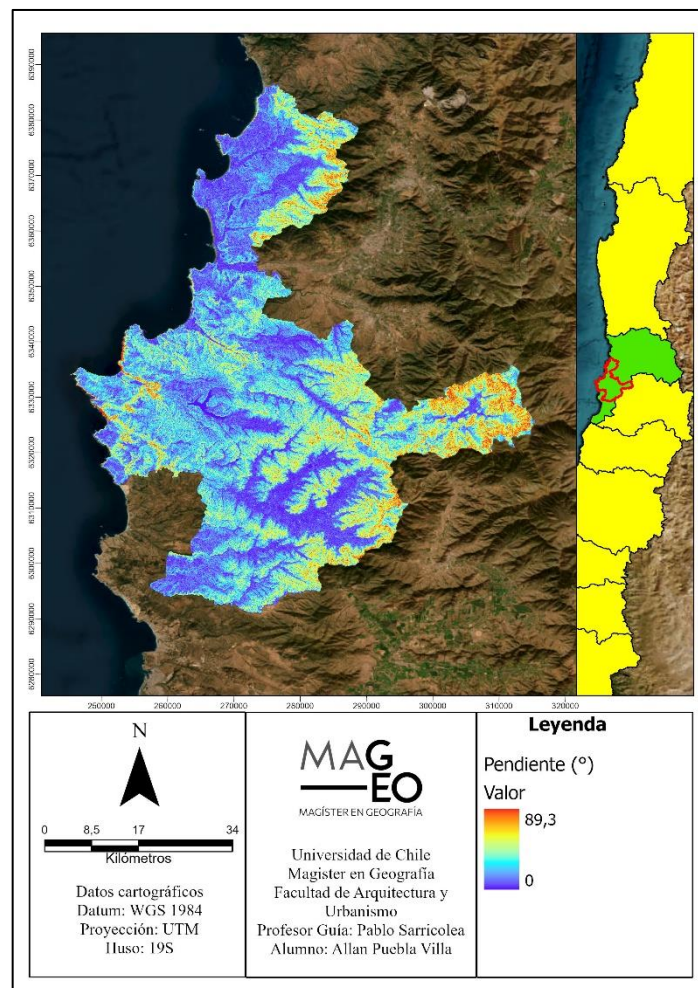


Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.1.4.7. Pendiente

La pendiente es representada en la figura 18, en la que se aprecia que en general el territorio es bastante plano, sobre todo en las zonas de los valles de Casablanca y de la ciudad de Puchuncaví, existen valores altos en la cordillera de la costa que se desarrolla en sentido norte-sur, aunque también existen valores altos en las montañas o cordones montañosos que se desarrollan en sentido este-oeste que se desprenden de la cordillera de la costa, finalmente también existen valores altos en la ciudad de Valparaíso y sus diversos cerros.

Figura 18: Pendiente.

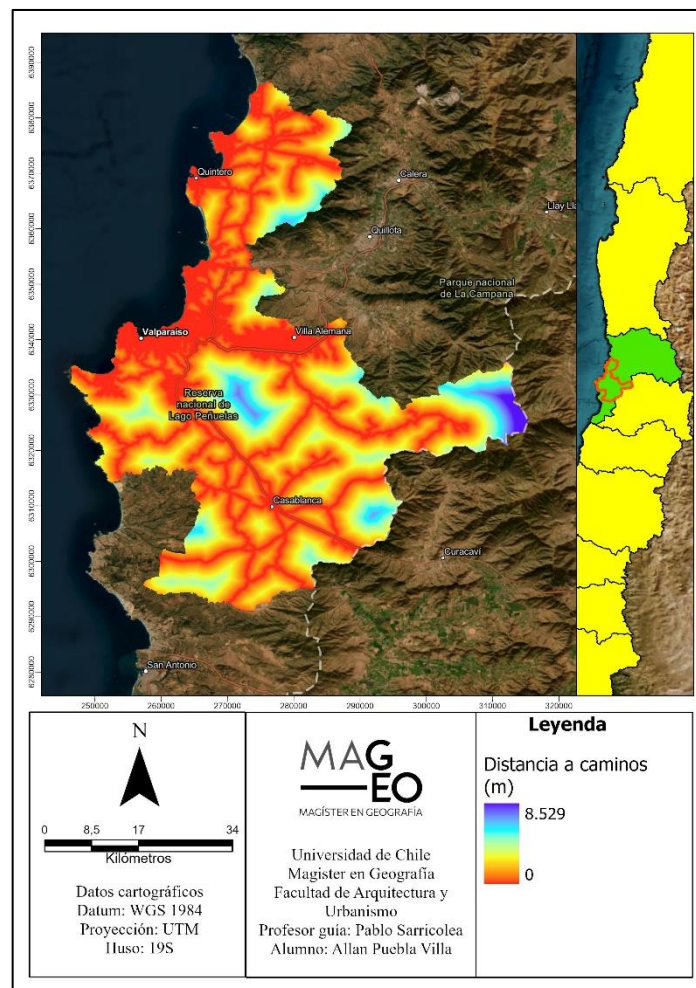


Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 6.1.4.8. Distancia a caminos

La distancia a los caminos se representa en la figura 19, los caminos están bastante distribuidos a lo largo del área de estudio, los valores van desde los 0 a los 8.529 m, la mayoría del territorio se encuentra cercano a un camino, por lo que, los valores que más se repiten se encuentran entre los 0 y los 1.000 m, los valores más altos o zonas más lejanas a los caminos se encuentran en la cordillera de la costa, en el extremo oriente del área de estudio y en algunas zonas de la Reserva Nacional Lago Peñuelas.

Figura 19: Distancia a caminos.

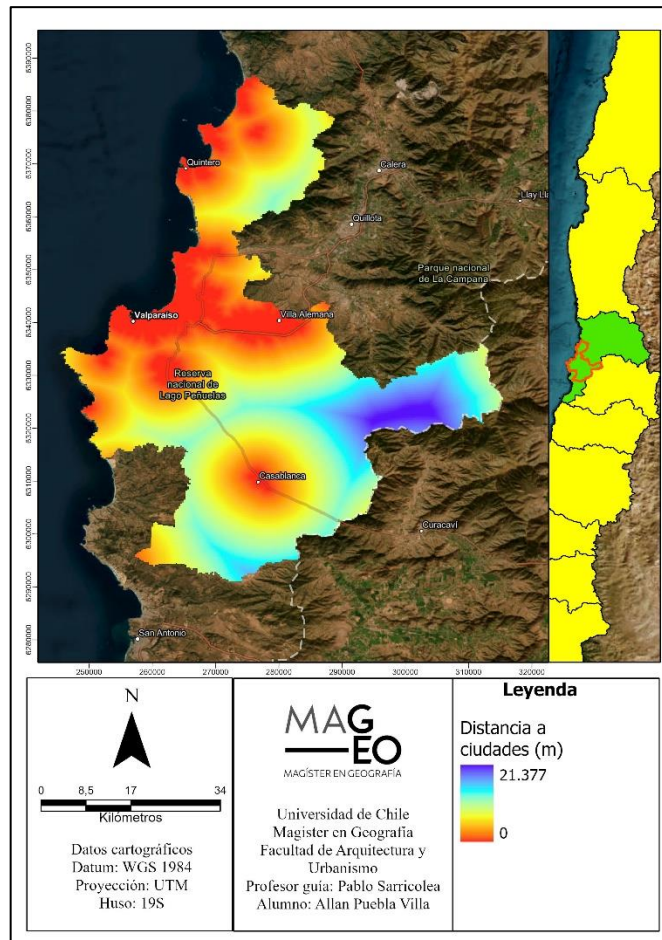


Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.1.4.9. Distancia a ciudades

La distancia a ciudades se muestra en la figura 20, los valores de distancia a ciudades van desde los 0 hasta los 21.377 m, el área de estudio presenta varias ciudades (Puchuncavi, Quintero, Concon, Viña del mar, Valparaíso, Quilpue, Villa Alemana y Casablanca), por lo que la mayor parte del terreno presenta valores que van desde los 0 hasta los 5.000 m, los valores más altos se concentran en las zonas que se encuentran entre la ciudad de Casablanca y las demás ciudades del área de estudio y en la zona baja de la cordillera la costa que presenta los valores extremos más altos.

Figura 20: Distancia a ciudades.

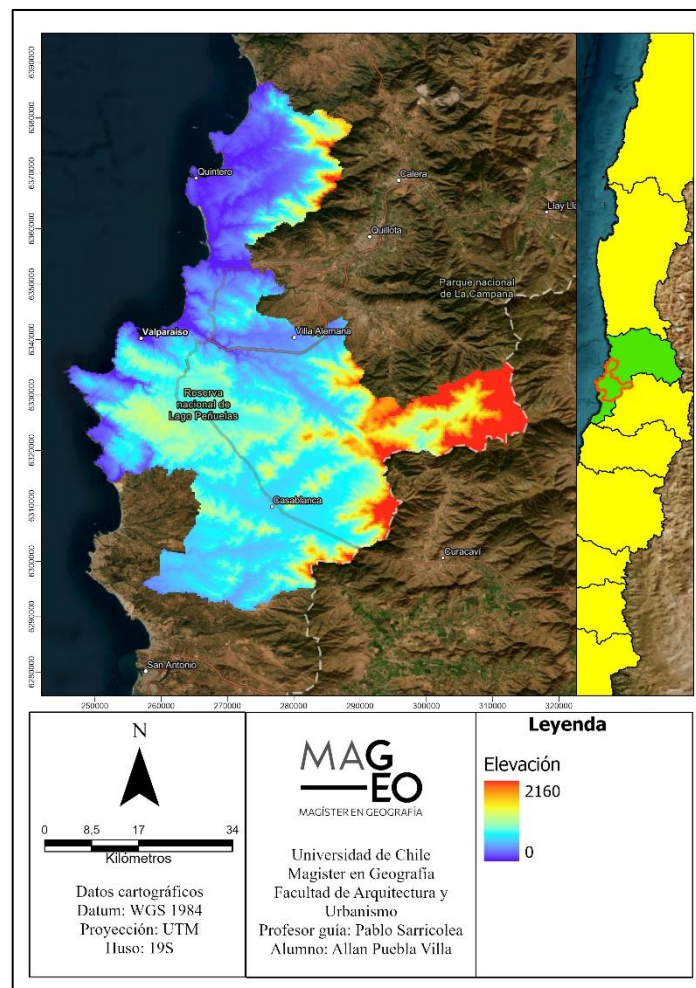


Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.1.4.10. Elevación

Como se observa en la figura 21, la elevación del área de estudio presenta valores que van desde los 0 hasta los 2.160 m, en general se presentan valores bajos o cercanos a la media de los datos, los valores más altos se asocian a la cordillera de la costa que se desarrolla en un eje que va de norte a sur, pero es cortada en diversas secciones por algunos cursos de agua, como el río Aconcagua, es importante destacar los valores medios que se encuentran en los cerros asociados a la ciudad de Valparaíso.

Figura 21: Elevación.

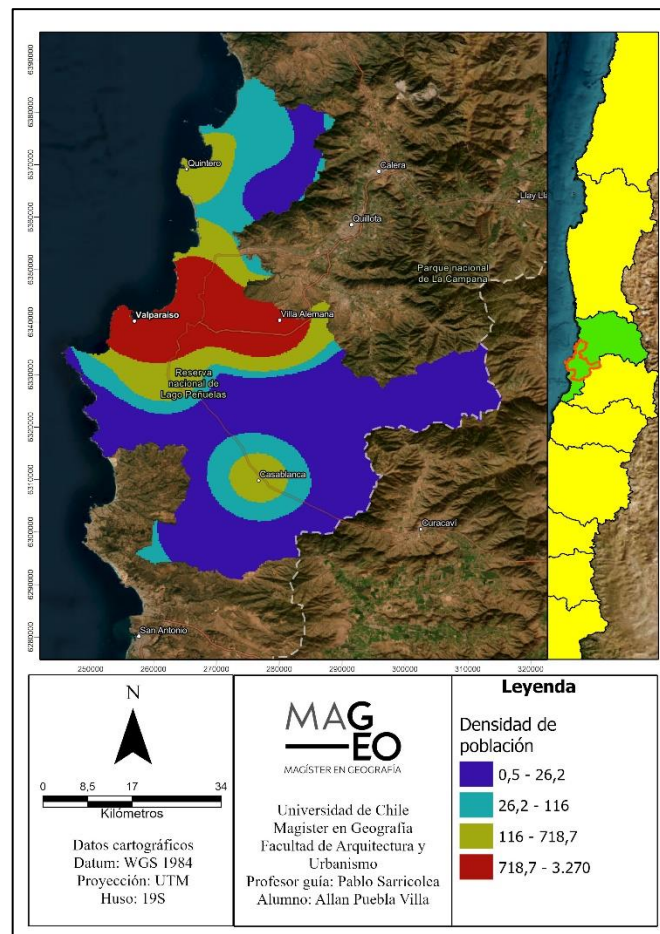


Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.1.4.11. Densidad de población

La densidad de la población se valora en habitantes por kilómetro cuadrado, que se muestra en la figura 22, en la que se observa que la densidad es relativamente baja en la mayor parte del área de estudio, las principales zonas donde se concentra la población son las ciudades de Villa Alemana, Quilpue y la conurbación de Viña del Mar y Valparaíso, que presentan los valores extremos altos, en cuanto a valores medios se concentran en las ciudades de Casablanca y Quintero, el resto del área de estudio presenta valores bajos de densidad de población.

Figura 22: Densidad de población (h/km<sup>2</sup>).

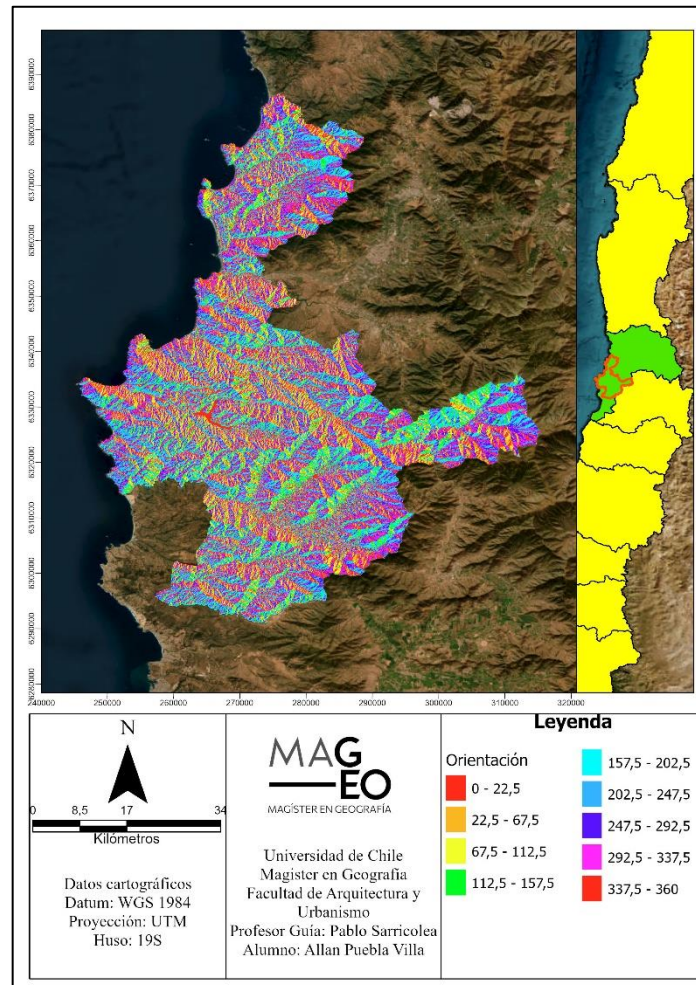


Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.1.4.12. Orientación

La orientación se clasifica en diversas categorías que representan la orientación a cada punto cardinal y se representa en la figura 23, la orientación del terreno es de importancia para el análisis, ya que, según la clasificación del terreno, este puede desarrollar cierta vegetación o contener diversos contenidos de humedad, como también variar en diversos factores climáticos, como la temperatura, precipitación o cantidad de radiación solar.

Figura 23: Orientación del terreno.



Fuente: Elaboración propia, 2022.



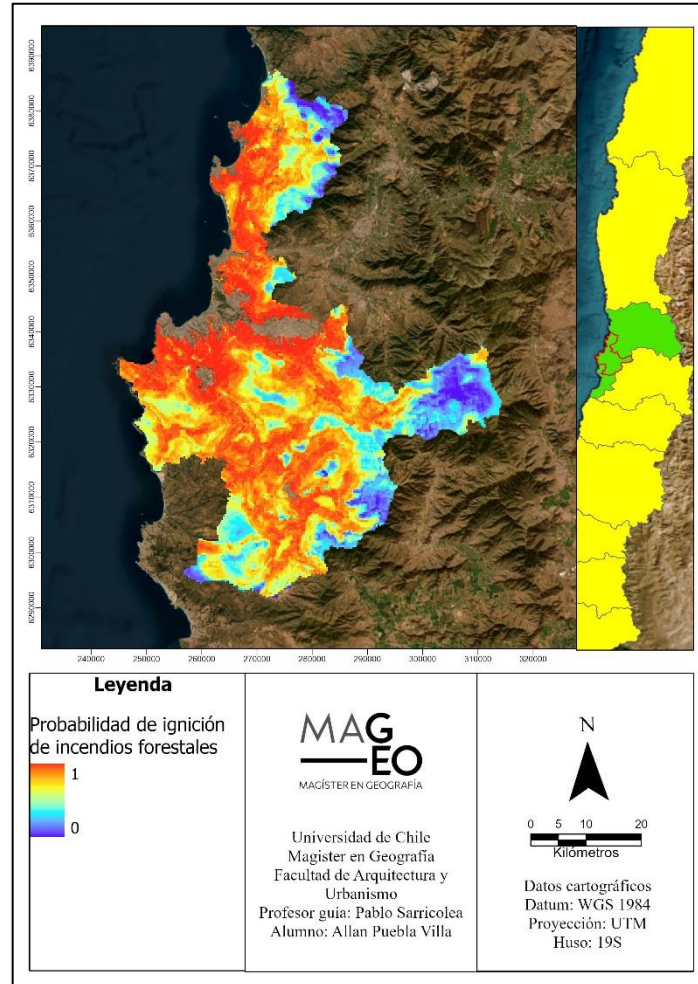
## 6.2. Análisis

### 6.2.1. *Random Forest*

#### 6.2.1.1. Todos los incendios forestales

En el caso del análisis mediante la metodología *random forest* para todos los incendios forestales se obtiene como resultado un archivo *raster*, el cual establece la probabilidad de ignición de incendios forestales con base en las variables mencionadas anteriormente. Los valores de probabilidad varían entre 0 (Menor probabilidad) y 1 (Mayor probabilidad), los cuales se observan en la figura 24.

Figura 24: Probabilidad de ignición de incendios forestales.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Las zonas pobladas y ciudades se han omitido del *raster* de probabilidad de ignición de incendios forestales, ya que por definición un incendio forestal no se puede desarrollar en un área como los poblados y ciudades, donde no existe material disponible o vegetación que funcione como combustible ni una extensión considerable del mismo como para desarrollar los incendios forestales. Los valores extremos altos de probabilidad de ignición de incendios forestales se presentan en las zonas relacionadas con las variables de factor humano, es decir, principalmente donde existen valores bajos de distancia a caminos y valores altos

de densidad de población, que como se observa en el nivel de importancia de las variables analizadas, poseen gran relevancia, sobre todo en el caso de la distancia a caminos, por otra parte, la probabilidad de ignición de incendios forestales baja se concentran en la zona noreste del área de estudio al este de la ciudad de Puchuncavi, los valores extremos mínimos se concentran en la zona este del área analizada, donde se encuentran los máximos valores de altura en la cordillera de la costa, es decir, los lugares que se encuentran con valores altos de distancia a caminos y los valores bajos de densidad de población, otra zona con valores bajos de probabilidad de ignición de incendios forestales se encuentra en la zona sur del área de estudio, al este y suroeste de la ciudad de Casablanca.

En cuanto a las estadísticas resultantes de esta metodología, se puede destacar que, para llegar a este modelo final, se ejecutaron 10 modelos previos en los que se modificaban diferentes características y parámetros como el número de árboles del modelo, la cantidad de variables muestreadas aleatoriamente, el porcentaje de datos excluidos para la validación o la profundidad máxima de cada árbol, con el fin de alcanzar niveles más altos de significancia estadística, como los del modelo presentado. El promedio de los residuos cuadráticos medios tiene un valor de 0,02190954, es importante señalar que el error se comenzó a estabilizar a partir de los 150 árboles, pero se ejecutaron un mayor número con el fin de asegurar el menor error posible al generarse los 1.000 árboles de decisión, mientras que el % de la varianza explicada alcanza el valor de 79,73, lo que es un valor estadísticamente alto y considerable, aunque podría ser más alto al incorporar la variable uso de suelo.

La importancia de las variables se resume en la tabla 8, La variable con mayor importancia es la distancia a los caminos con un 19,8%, posee una gran

diferencia de importancia si se compara con el resto de las variables, llegando a ser un 4,7% más importante que la variable que le sigue, que es la temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10) con una importancia de un 15,1%, la temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10) y la orientación, presentan valores de importancia medios, mientras que la elevación, la densidad de población y la precipitación anual (Bio 12) presentan valores de importancia bastante similares que varían entre el 12,4% y el 12,8%. La variable con mayor importancia tiene un factor claramente humano, porque la distancia a caminos indica que es mucho más probable la ignición de un incendio producto de la circulación de personas por estos caminos, ya que como señalan diversos informes de CONAF, la mayoría de los incendios forestales se producen por los descuidos de las personas, que pueden ser lanzar cigarrillos mientras conducen o detenerse a realizar diversas actividades en sectores cercanos a los diversos caminos del área de estudio. La densidad de población presenta una importancia de un 12,5%, la segunda más baja de todas las variables, algo para tener en cuenta considerando que también es una variable de factor humano.

*Tabla 8: Variables y su nivel de importancia.*

Variables	Importancia (%)
Temperatura media anual (Bio 1)	13,4
Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10)	15,1
Precipitación anual (Bio 12)	12,4
Distancia a caminos	19,8
Densidad de población	12,5
Elevación	12,8

Orientación

14

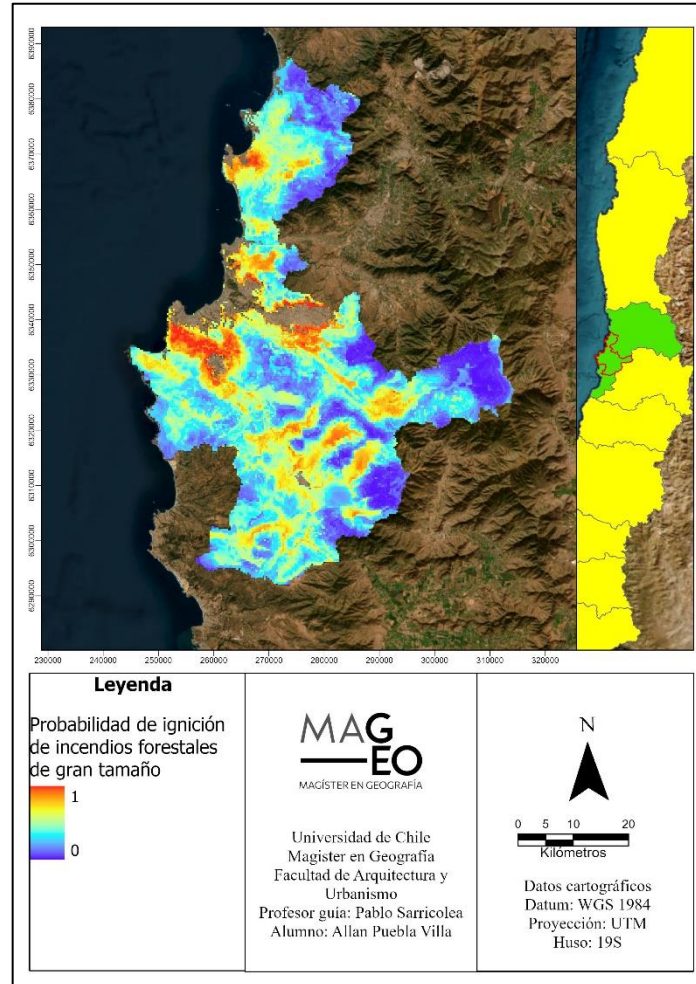
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Las variables relacionadas con la temperatura presentan mayor importancia que las variables relacionadas con la precipitación. Las variables de temperatura que abordan datos del periodo de tiempo de mayor ocurrencia de incendios forestales, como el trimestre más cálido, poseen mayor importancia que aquellas variables de otros periodos del año. La variable con menor importancia es la precipitación anual (Bio 12), esto se explica debido a que es una variable que mide la precipitación durante todo el año y no en el periodo de tiempo en el que se producen la mayoría de los incendios forestales.

#### **6.2.1.2. Incendios forestales de gran tamaño**

En el caso del análisis mediante la metodología *random forest* para los incendios forestales de gran tamaño se obtiene como resultado un archivo *raster*, el cual establece la probabilidad de ignición de incendios forestales con base en las variables mencionadas anteriormente. Los valores de probabilidad varían entre 0 (Menor probabilidad) y 1 (Mayor probabilidad), los cuales se observan en la figura 25.

Figura 25: Probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Las zonas pobladas y ciudades se han omitido del *raster* de probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño, ya que por definición un incendio forestal no se puede desarrollar en un área como los poblados y ciudades, donde no existe material disponible o vegetación que funcione como combustible ni una extensión considerable del mismo como para desarrollar los incendios forestales. Las zonas con mayor nivel de probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño es mucho menor en proporción que en el caso de los incendios forestales, esto se debe a su menor número de casos por temporada y la gran

extensión que debe afectar el fuego para considerarse dentro de esta categoría, lo que los hace excepcionales dentro del área de estudio, los valores extremos altos se concentran principalmente en lugares circundantes o colindantes con los grandes centros poblados como la conurbación de Viña del mar-Valparaíso, las ciudades de Quilpue y Quintero y en algunas zonas de la Reserva Nacional Lago Peñuelas, algo que es de especial interés tomando en cuenta que estos eventos se caracterizan por su gran nivel de destrucción y los daños que podrían causar en los alrededores de estos centros poblados, por otra parte, las zonas con menor probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño coinciden en gran medida con los valores bajos para todos los incendios forestales, pero en este caso son muchas más zonas, entre las que se agregan podemos encontrar el extremo suroeste del área de estudio, al suroeste de la Reserva Nacional Lago Peñuelas y algunos cordones montañosos que se desprenden de la cordillera de la costa, los cuales se adentran en sentido este-oeste, disminuyendo su altura mientras más se acercan al mar, su bajo nivel de probabilidad de ignición se puede asociar con la disminución de las variables de temperatura al poseer una altura considerable, su lejanía a los caminos y su bajo nivel de densidad poblacional.

En cuanto a las estadísticas resultantes de esta metodología, se puede destacar que, para llegar a este modelo final, se ejecutaron 5 modelos previos en los que se modificaban diferentes características y parámetros como el número de árboles del modelo, la cantidad de variables muestreadas aleatoriamente, el porcentaje de datos excluidos para la validación o la profundidad máxima de cada árbol, con el fin de alcanzar niveles más altos de significancia estadística, como los del modelo presentado. El promedio de los residuos cuadráticos medios del modelo tiene un valor de 0,1177678, es importante señalar que el error se comenzó a estabilizar a partir de los 200 árboles, pero se ejecutaron un mayor

número con el fin de asegurar el menor error posible, mientras que el % de la varianza explicada alcanza el valor de 53,78, lo que es un valor estadísticamente bajo, la explicación de esto es el menor número de casos de la variable dependiente, ya que solo existen 75 incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio durante el periodo de tiempo analizado, a su vez, podría deberse a la falta de una variable de importancia en el análisis, como el uso de suelo.

La importancia de las variables se resume en la tabla 9, la variable con mayor importancia es la distancia a ciudades con un 15,3% que representa un gran porcentaje, si se compara con el resto de las variables, existe una gran cantidad de variables que representan un porcentaje de importancia que varían entre los 12% y 13%, como la temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5), la temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10), la precipitación anual (Bio 13), la densidad de población y la pendiente. Resulta interesante que la variable con mayor importancia posee un factor humano determinante, al ser la distancia a ciudades y grandes centros urbanos la principal variable de ignición de incendios forestales de gran tamaño, por otra parte, las variables de temperatura que abordan datos del periodo de tiempo de mayor ocurrencia de incendios forestales, como el trimestre más cálido, poseen mayor importancia que aquellas variables de otros periodos del año.

*Tabla 9: Variables y su nivel de importancia.*

Variables	Importancia (%)
Temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5)	12
Temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8)	10,6



Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10)	12,2
Precipitación anual (Bio 13)	13
Densidad de población	13,3
Distancia a ciudades	15,3
Distancia a caminos	11,3
Pendiente	12,3

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La variable de la precipitación anual (Bio 13) posee mayor importancia que todas las variables relacionadas con la temperatura, esto se contrapone a los resultados obtenidos en el caso de todos los incendios forestales. La variable con menor importancia es la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8), esto se explica debido a que es una variable que mide la temperatura en un periodo de tiempo en el que no se producen la mayoría de los incendios forestales, puede que esta variable favorezca la disponibilidad de materia inflamable, pero para la ignición en sí misma no es de mayor importancia.

## 6.2.2. Análisis multicriterio

### 6.2.2.1. Reclasificación de los resultados *Random forest*

La reclasificación de los archivos *rasters* resultantes del método *random forest* se procede de la misma manera en los casos de todos los incendios y los incendios forestales de gran tamaño, debido a que ambos casos presentan valores que van desde el 0 hasta el 1, la reclasificación se realiza según la tabla 10.

Tabla 10: Rangos originales y valores reclasificados.

Rango original	Reclasificación
0 – 0.2	1
0.2 – 0.4	2
0.4 – 0.6	3
0.6 – 0.8	4
0.8 - 1	5

Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.2.2.2. Reclasificación de la cobertura de suelo

La cobertura de suelo se reclasifica en 5 categorías, según los anexos N°1 y N°2, la categoría 5 o de mayor probabilidad de ignición de incendios forestales se compone de diversos tipos de vegetación, como las plantaciones de bosques,

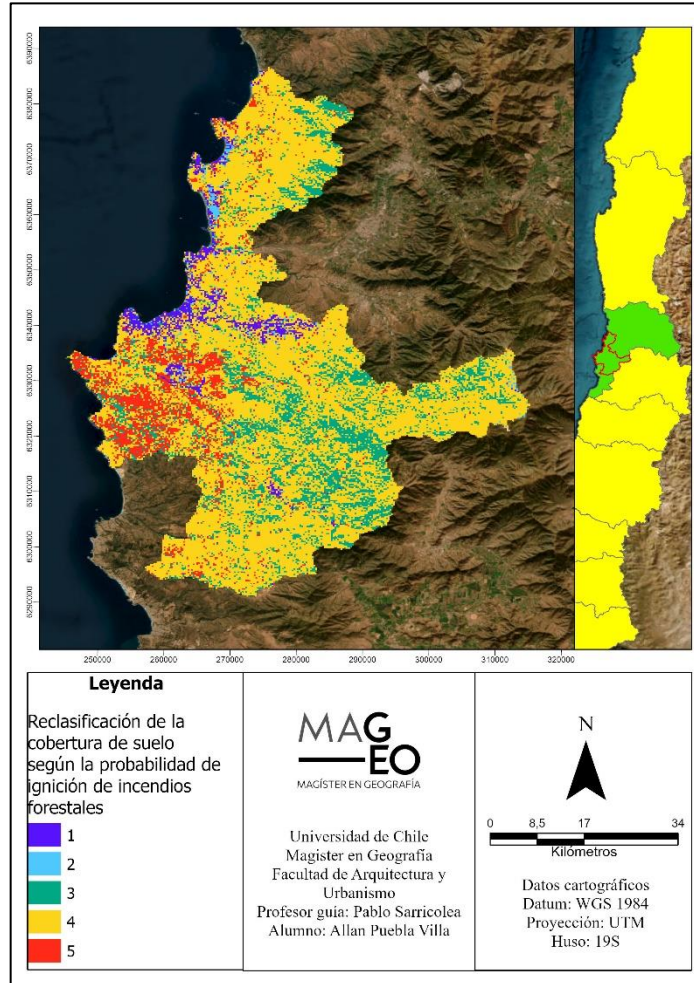
que en el área de estudio se dividen en plantaciones de hoja ancha y de coníferas, las plantaciones de matorrales, debido a que las plantaciones al establecer especies de forma artificial rompen con la dinámica y las relaciones naturales de la zona, lo que puede facilitar la ignición de incendios forestales, en esta categoría también se incorporan los pastizales áridos, debido a que su composición de poca humedad y gran extensión en el territorio favorecen la ignición. La categoría 4 se compone de tipos de vegetación como los matorrales y pastizales, pero en este caso su distribución y establecimiento es de forma natural, es decir, no son plantaciones con fines económicos, en estos ambientes se acumula vegetación muerta y existe una gran cantidad de combustibles que pueden propiciar un incendio forestal. La categoría 3, se compone principalmente de vegetación destinada al cultivo, como invernaderos y huertos, como también de bosque nativo de hoja ancha y matorrales tipo suculentas. La categoría 2 se compone principalmente de suelos desnudos, como suelos arenosos y rocosos, que como su nombre lo señala, poseen escasa o nula vegetación o material combustible disponible para la ocurrencia de incendios forestales. Finalmente, la categoría 1 se compone de zonas donde existen cuerpos de agua, ya sean lagos, océanos, ríos, marismas, humedales o salares, también de zonas donde existe hielo o nieve, finalmente las superficies impermeables se encuentran en esta categoría, como las ciudades o poblados donde por definición no existe posibilidad de un incendio forestal en su interior.

La mayor parte del terreno se reclasificó dentro de la categoría 4, específicamente abarca 1.776 km<sup>2</sup>, esta categoría se presenta principalmente en las zonas alrededor de las ciudades y principales centros poblados, su gran extensión se debe a la gran cantidad de vegetación como matorrales y pastizales en el área de estudio. La categoría con menor extensión es la N°2, que específicamente abarca 22 km<sup>2</sup>, esto se debe a que los suelos desnudos son

sumamente escasos en el área de estudio, ya que el suelo es ideal para la agricultura y la proliferación de matorrales y pastizales naturales.

En cuanto a la categoría 1, es decir, la menos probable de ignición de incendios forestales, posee una superficie de 97,3 km<sup>2</sup>, que se encuentran principalmente en las zonas urbanas impermeables, como también en los cuerpos de agua, entre los cuales, los principales a destacar son el Lago Peñuelas, el Embalse de la Luz, el Embalse Aromo o el Río Aconcagua. Finalmente, la categoría 5 que representa mayor probabilidad de ignición de incendios forestales, abarca una superficie de 224,1 km<sup>2</sup>, asociadas a las plantaciones de bosques, praderas y matorrales que se dan en el área de estudio, una especie bastante encontrada en estas plantaciones es el Eucaliptus, una especie que requiere de una gran cantidad de recursos hídricos. La reclasificación resultante se muestra en la figura 26.

Figura 26: Reclasificación de la cobertura de suelo según la probabilidad de ignición de incendios forestales.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 6.2.3. Suma ponderada

La herramienta “Suma ponderada” de ArcGis Pro, permite multiplicar las celdas de los *rasters* de cada variable utilizada en el análisis multicriterio por un peso especificado por el autor, otorgando como resultado un archivo *raster* que superpone las variables.

A continuación se presentan 2 resultados, en el primero se utilizan las variables de cobertura de suelo y el resultado de la metodología *random forest* para todos los incendios forestales, en el segundo, se utilizan las variables de cobertura de uso de suelo y el resultado de la metodología *random forest* para los incendios forestales de gran tamaño. En los 2 resultados se otorga el mismo peso a cada variable, es decir, a la cobertura de suelo se le otorga un peso de 0.3, mientras que las variables que resultaron de las metodologías *random forest*, se les otorga un valor de 0.7, al otorgar pesos que varíen entre 0 y 1, los resultados tendrán valores que oscilarán entre 1 y 5. Aquellas zonas y lugares que tienen como resultado un nivel de probabilidad de ignición de incendios forestales, cuyo valor oscila entre 4,2 y 5, es decir, la categoría llamada “Muy alta”, se pueden definir como áreas prioritarias de gestión de desastres ante incendios forestales e incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio.

#### 6.2.3.1. Todos los incendios forestales

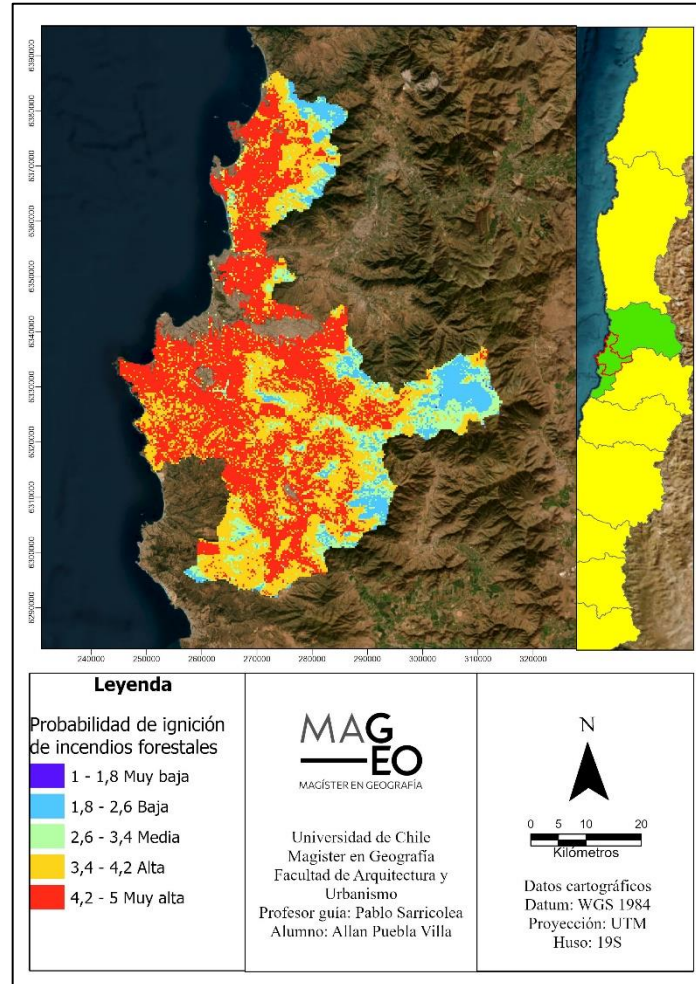
El resultado obtenido se refleja en la figura 27, en este caso las zonas con una probabilidad de ignición de incendios muy alta son las que abarcan más superficie, específicamente 1.091,6 km<sup>2</sup>, ante la gran extensión de esta

categoría, resulta difícil establecer áreas prioritarias para la gestión de desastre, ya que gran parte de la zona de estudio se encuentra susceptible a la ignición de un incendio forestal según el modelo. Gran cantidad de áreas con una probabilidad de ignición de incendios muy alta se concentra en las zonas circundantes a los centros poblados y los diferentes tipos de caminos que se desarrollan en el área de estudio, por lo que cualquier tipo de descuido de las personas que habitan o circulan por estos espacios puede ser causante de un incendio forestal.

La probabilidad de ignición alta abarca una superficie de 796,9 km<sup>2</sup>, este nivel se concentra principalmente en la zona este de la ciudad de Quintero, en algunas zonas de la Reserva nacional Lago Peñuelas y el extremo sur del área de estudio. La probabilidad de ignición media abarca una superficie de 261,2 km<sup>2</sup>, esta categoría funciona principalmente como una zona intermedia entre los niveles alto y bajo, se desarrolla generalmente en franjas de separación entre los niveles mencionados.

En cuanto a las probabilidades baja y muy baja abarcan 192 km<sup>2</sup> y 0,6 km<sup>2</sup> respectivamente, se concentran principalmente en el extremo este del área de estudio debido a las condiciones topográficas y bioclimáticas, ya que en este lugar hay alturas considerables, que propician la disminución de la temperatura y el aumento de las precipitaciones, una zona que presenta esta categoría se encuentra al este de las ciudades de Maitencillo y Puchuncaví, que se explica principalmente por su lejanía a los caminos y la baja densidad poblacional del lugar. Finalmente, otra zona donde la probabilidad de ignición ante incendios forestales es baja, se encuentra en Lagunillas, donde el suelo desnudo, la poca densidad de población y la distancia a los caminos, explican la baja probabilidad.

Figura 27: Probabilidad de ignición de incendios forestales.



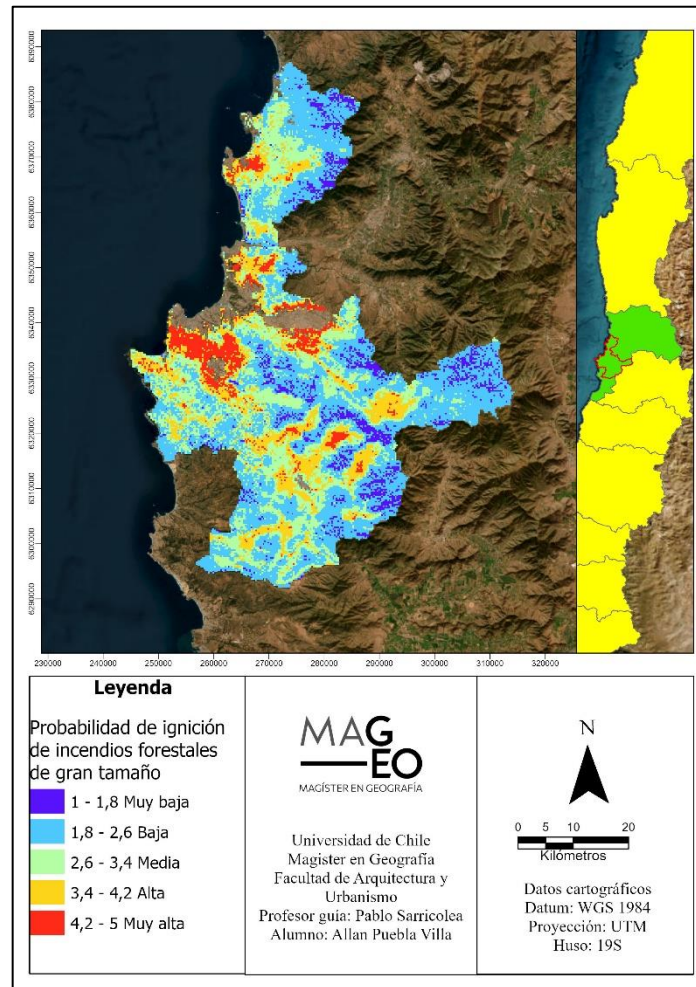
Fuente: Elaboración propia, 2022.



### **6.2.3.2. Incendios forestales de gran tamaño**

El resultado obtenido se refleja en la figura 28, en este caso las zonas con una probabilidad de ignición muy alta son las que abarcan menor cantidad de superficie, específicamente son 137 km<sup>2</sup>, se pueden destacar lugares con este nivel de probabilidad, especialmente aquellos cercanos a grandes centros poblados, como los sectores que se encuentran entre Placilla y Valparaíso, pues existe una gran cantidad de vegetación que se destina a la producción forestal y se encuentra muy cercana a las viviendas y a los caminos que conectan las 2 localidades; El sector en los alrededores de las ciudades de Quilpué y Villa Alemana presenta un gran manchón con una probabilidad de ignición muy alta, esto se debe a la cercanía de la vegetación a estos centros poblados, la existencia de basurales cercanos a la vegetación y a las viviendas; La zona costera con un nivel de probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño muy alta es el área que rodea la Bahía de Quintero, aunque en este caso, la mayor parte de la zona se dedica al cultivo de diferentes tipos de vegetales, por lo que quizás su importancia sea menor si se compara con los ejemplos anteriores; Finalmente es importante destacar una zona al noreste de la ciudad de Casablanca, cerca de la localidad de Lo Ovalle, que se caracteriza por mantener grandes extensiones destinadas a la agricultura.

Figura 28: Probabilidad de ignición ante incendios forestales de gran tamaño.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

En cuanto las probabilidades de ignición alta y media abarcan una superficie de 354,4 km<sup>2</sup> y 641 km<sup>2</sup> respectivamente, se desarrollan como conectores entre las diversas zonas de probabilidad de ignición muy alta, como en el caso del sureste de la ciudad de Concón, donde se encuentran entre zonas de probabilidad muy alta, pero que no llegan a este nivel producto de poseer un tipo de vegetación menos propensa a la ignición, encontrarse lejos de los caminos o poseer una baja densidad poblacional. Existen grandes zonas de estas categorías en los

alrededores de la ciudad de Casablanca, donde los incendios forestales de gran tamaño han sido menos recurrentes que en otras áreas como la Reserva Nacional Lago Peñuelas o sus alrededores. Finalmente, existen grandes extensiones de esta categoría al este del poblado de La Retuca, que posee zonas con una gran cantidad de praderas y matorrales que se encuentran relativamente cercanos a la ruta número 50.

La probabilidad de ignición que abarca mayor cantidad de superficie es el que tiene valores entre 1,8 a 2,6 calificado como baja, específicamente 1.044 km<sup>2</sup>, se aprecia que existe una gran extensión que se desarrolla desde el extremo este del área de estudio hacia la costa, siguiendo las cumbres más altas de la cordillera de la costa y las zonas circundantes a estas, no se puede establecer algunas zonas características de esta categoría, ya que es la de mayor superficie y no se encuentra en nichos concretos con características definidas. Las zonas con una probabilidad de ignición muy baja abarcan una superficie de 163 km<sup>2</sup> y se encuentran principalmente en todo el margen este del área de estudio, esto se debe a que estas zonas son las más alejadas de los caminos y las ciudades, presentan baja densidad poblacional, tienen una altura considerable, es decir que las temperaturas disminuyen y las precipitaciones aumentan como norma general y poseen poca vegetación o vegetación no apta para funcionar como combustible para un incendio forestal de gran tamaño.

## 7. Conclusiones

Los modelos ejecutados mediante la metodología mencionada establecen que la superficie que se encuentra con una probabilidad de ignición de incendios forestales muy alta es de 1.091,6 km<sup>2</sup>, mientras que, al considerar la probabilidad de ignición de incendios forestales de gran tamaño, esta categoría abarca una superficie de 137 km<sup>2</sup>, demostrando que las áreas prioritarias de gestión son muy diferentes si consideramos todos los incendios forestales o solo los incendios forestales de gran tamaño. Lo anterior se puede utilizar para mejorar la gestión del riesgo de desastres, al tener en cuenta que los recursos son finitos y a veces son requeridos en otros lugares, es necesario enfocar los recursos de combate de este tipo de eventos en las zonas con una probabilidad de ignición muy alta ante incendios forestales de gran tamaño.

Los modelos establecieron la variable que posee mayor importancia según si se analizaban todos los incendios forestales o solo los incendios forestales de gran tamaño, en el primer caso, la variable más importante fue la distancia a caminos con un valor de 19,8%, lo es bastante alto si se compara con las demás variables, en el caso de los incendios forestales de gran tamaño, la variable más importante fue la distancia a ciudades con un valor de 15,3%. Que estas variables sean las más importantes, coincide con que la mayoría de los autores cuyos trabajos fueron destacados en la revisión bibliográfica afirmen que la probabilidad de ignición de incendios forestales depende no solo de variables físicas, sino que también humanas y de la especial importancia de estas últimas.

Las variables bioclimáticas, es decir, precipitación y temperatura, que se utilizan en este análisis, se pueden clasificar según el periodo de tiempo que abarcan, en este sentido, en ambos modelos obtuvieron mayor importancia aquellas variables bioclimáticas que se concentran en el periodo de tiempo en que ocurren la mayor cantidad de incendios forestales, el periodo estival, esto se da porque un aumento de la temperatura y disminución de la precipitación durante el verano favorece la disponibilidad de combustible con un contenido de humedad mucho más bajo. Lo anterior se relaciona con la importancia que presentan los trimestres o meses con mayor temperatura o menor precipitación en el modelo de los incendios forestales de gran tamaño.

En cuanto a los modelos *random forest*, presentan datos estadísticos como el porcentaje de varianza explicada, cuyos valores alcanzan los 79,73% y 53,78% en los casos de todos los incendios y los incendios forestales de gran tamaño, respectivamente, al considerar la categoría de todos los incendios forestales es un valor aceptable, que podría ser mejorado al incluir la variable de uso de suelo, en cambio, al tomar en cuenta solo los incendios forestales de gran tamaño, el valor es estadísticamente bajo, lo cual se podría explicar por la falta de la variable cobertura de suelo, que ayudaría al modelo a predecir de mejor manera los incendios forestales e incendios forestales de gran tamaño, en este modelo se usan menos puntos de la variable dependiente, específicamente solo se utilizan 75 puntos, lo cual es otro factor a considerar, ya que, con un mayor número de puntos mejoraría el valor de la varianza explicada por el modelo.

Otro aspecto a destacar, es la relación existente entre la actividad humana, el cambio climático y el aumento de la probabilidad de ignición de incendios forestales, es innegable que el cambio climático se acelera por las diversas actividades humanas que generan gases de efecto invernadero, principalmente

el uso de combustibles fósiles y la actividad animal para nuestro beneficio, esto a su vez, favorece la ocurrencia de fenómenos extremos, entre los que se encuentran los incendios forestales de gran tamaño, que hace algunos años no eran tan recurrentes, estos eventos tienen entre sus consecuencias el gran daño ambiental, generando de esta manera un efecto de retroalimentación positiva.

La planificación resulta fundamental al momento de analizar el riesgo ante eventos siconaturales, en el caso de esta investigación se aborda el PREMVAL y la probabilidad de ignición de incendios e incendios forestales de gran tamaño. Para evitar consecuencias funestas, los desarrolladores de este tipo de instrumentos o quienes los actualicen, deben tener en cuenta las características bioclimáticas, topográficas y sociales del territorio, para otorgar un uso de suelo coherente con los niveles de riesgo presentes en el área, evitando los errores de otras planificaciones, como la existencia de viviendas y zonas pobladas cercanas a grandes cantidades de combustible o vegetación propensa a incendios forestales.

La hipótesis de esta investigación señala que las variables más importantes en la probabilidad de ignición de incendios forestales serían la densidad de población y la distancia a las ciudades. En el resultado de esta investigación, las 2 variables mencionadas en la hipótesis, la densidad de población aparece en ambos modelos, en el caso de los incendios forestales de gran tamaño es la segunda variable más importante con un valor de 13,3% y al considerar todos los incendios forestales la variable posee un valor de importancia de 12,5%, siendo la segunda variable menos importante. La variable distancia a ciudades solo aparece en el modelo de los incendios forestales de gran tamaño, pero presenta la mayor importancia del modelo, con un valor de 15,3%. Se puede señalar que la hipótesis se encontraba en un punto medio, ya que la densidad y la distancia

a ciudades fueron variables que aparecen en los modelos, pero solo en los incendios forestales de gran tamaño una de ellas es la variable más importante, mientras que en el caso de todos los incendios forestales la distancia a caminos no aparece y la densidad de población es la segunda variable menos importante. En lo que acierta la hipótesis, es en que la variable más importante es aquella que posee un factor humano, ya que como se menciona, la probabilidad de ignición de incendios forestales se construye tanto de variables sociales como ambientales, al resultar la distancia a caminos como la variable más importante en el caso de todos los incendios, sumado a que prácticamente la totalidad de los incendios e incendios forestales de gran tamaño son causados por el ser humano, el resultado de este análisis muestra que la importancia de las actividades y forma de vida de los seres humanos es un factor preponderante en la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

La conclusión general o simplificada de esta investigación es que los incendios e incendios forestales de gran tamaño son producto de un conjunto de variables tanto físicas como sociales, pero que en el contexto actual y del área de estudio, las variables más importantes son la distancia a los caminos, la cobertura de suelo y las condiciones bioclimáticas en el periodo estival.

Esta investigación aborda el tema de los incendios forestales, su principal aporte en este sentido es la separación entre los incendios y los incendios forestales de gran tamaño, tratando estos últimos como un eje de investigación importante, ya que las estadísticas actuales, sus tendencias y las previsiones a futuro, indican que los eventos extremos como los incendios forestales de gran tamaño serán cada vez más comunes, por lo que es necesario poner el foco en este tipo de eventos, buscando maneras de disminuir sus consecuencias, limitando los daños y favoreciendo la prevención. La investigación no presenta nada nuevo en cuanto

a las metodologías que se utilizan, pero si innova en la forma de utilizarlas, ya que se genera una mezcla de estas, se utilizan las metodologías de aprendizaje automático y de análisis multicriterio, aprovechando las mejores cualidades de cada una, para intentar robustecer el análisis.

Este documento puede servir como un punto de base para la investigación de los incendios forestales de gran tamaño en el área de estudio, al considerar las virtudes y defectos de esta. Las limitantes que se podrían mejorar en un futuro, sería aumentar la cantidad de variables analizadas, lo que robustecería los modelos estadísticos, facilitando y mejorando la capacidad predictiva de los modelos, la separación del análisis en diferentes periodos de tiempo también podría ayudar en este objetivo, ya que las características de los incendios y sus variables predictoras pueden ir modificándose con el paso de los años, dando así una importancia cambiante a cada variable dependiendo del periodo de tiempo estudiado. Otro aspecto que podría ser mejorado, es el porcentaje de la varianza explicada y los residuos obtenidos de los modelos, en futuras investigaciones sería relevante intentar diferentes métodos para obtener valores de estos parámetros más significativos.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, G., Undurraga, T., Cotoras, D. & Orellana, T. (2022). El estudio científico del cambio climático en Chile: espacio local y fenómeno global. *Antropologías del sur*, 9(17), 199-218. <https://dx.doi.org/10.25074/rantros.v9i17.2147>.

Alcántara, T. (2019). La gestión integral del riesgo de incendios en las zonas de interfaz urbano-forestal: el caso del megaincendio de Valparaíso. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/172913>.

Alegría, R. (2020). Estudio y evaluación del riesgo de incendios forestales en la interfaz urbano-forestal de las comunas que componen el Área Metropolitana de Valparaíso: periodo 2000 - 2017. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178619>.

Amat, J. (2020). Random Forest con Python. Disponible en: [https://www.cienciadedatos.net/documentos/py08\\_random\\_forest\\_python.html](https://www.cienciadedatos.net/documentos/py08_random_forest_python.html).

Amigo, C., Alamos, N., Arrieta, D., Billi, M., Contreras, M., Larragubel, C., Muñoz, A., Smith, P., Urquiza, A., Vargas, M., Videla, J. T. & Winckler, P. (2021). Riesgo integrado de Asentamientos Humanos. Conurbación Valparaíso—Viña del Mar. Documento de trabajo NEST`-r3 N°2, Santiago, Chile. <https://www.doi.org/.17605/OSF.IO/VUA4G>.

Anchaluisa, S., & Suárez, E. (2013). Efectos del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicas de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*; Myrtaceae) en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(2), 14-23.

Andreu, A. & Hermansen-Báez, LA. (2008) Fire in the South 2: the southern wildfire risk assessment. A report by the Southern Group of State Foresters. Available at <http://www.southernwildfirerisk.com/reports/FireInTheSouth2.pdf>.

Arroyo, M., Pauchard, A., Alarcón, D., Armesto, J., Bozinovic, F., Bustamante, R., Echeverría, C., Estay, S., García, R., Gaxiola, A., Miranda, M., Pliscoff, P., Rozas, D., Salas-Eljatib, C & Rozzi, R. (2019). «Impactos del cambio climático en la biodiversidad y las funciones ecosistémicas en Chile». En P. A. Marquet et al. (editores), Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Atkinson, D., Chladil, M., Janssen, V. & Lucieer, A. (2010). Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment. *International Journal of Wildland Fire* 19, 649–658. doi:10.1071/WF08185.

Bachmann, A. & Allgower, B. (2001). A consistent wildland fire risk terminology is needed! *Fire Management Today*. 61(4), 28–33.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2022). Relieve Región de Valparaíso, Chile Nuestro País. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/relieve.htm>.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2022). Clima y fauna Región de Valparaíso, Chile Nuestro País. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/relieve.htm>.

Brillinger, D. (2010). Some examples of the communication of risk and uncertainty. *21(7-8)*, 719–727. doi:10.1002/env.1040.

Boer, C. 1989. Effects of the forest fire 1982-83 in East Kalimantan on wildlife. FR Report No. 7. Samardinda, Indonesia, Deutsche Forstservice GmbH.

Börgel, R. (1983). Prevención de catástrofes en el área cordillerana y precordillerana de la Región Metropolitana. Proyecto DIUC N° 149183 Pontificia Universidad Católica de Chile, Informe científico interno.

Bustillo Sánchez, M., Tonini, M., Mapelli, A. & Fiorucci, P. (2021). Spatial Assessment of Wildfires Susceptibility in Santa Cruz (Bolivia) Using Random Forest. *Geosciences*, 11, 224. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050224>.

Caballero, D. (2004). Gestión de los riesgos de incendios en la interfase forestalurbana: Proyecto WARM. En IIº Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección contra los incendios Forestales (pp. 1-16).

Canadell, J. y López-Soria, L. 1998. Lignotuber reserves support regrowth following clipping of two Mediterranean shrubs. *Functional Ecology* 12: 31-38.

Calderón, R. & Frey, K. (2017). El ordenamiento territorial para la gestión del riesgo de desastres en Colombia. *Territorios*, (36), 239-264.

Cardona, O. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Disponible en: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19852>.

Carracedo, V., Diego, C., García, J. & Rasilla, D. (2009). Clima e incendios forestales en Cantabria: evolución y tendencias recientes.

Carrasco, J., Acuna, M., Miranda, A., Alfaro, G., Pais, C. & Weintraub, A. (2021). Exploring the multidimensional effects of human activity and land cover on fire occurrence for territorial planning, *Journal of Environmental Management*, Volume 297, 113428, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113428>.

Castillo, M., Julio, G. & Quintanilla, V. (2011). Vulnerabilidad y daño potencial ocasionado por incendios en áreas de interfaz urbano-forestal, provincia de

Valparaíso. Chile central. Disponible en:  
<http://www.observatorioubogrd.cl/descargas/VULNERABILIDAD%20Y%20DAN%20POTENCIAL%20INCENDIOS%20FORESTALES-VALPARAISO.pdf>.

Castillo, M., Julio-Alvear, G. & Salinas, R. (2015). Current Wildfire Risk Status and Forecast in Chile: Progress and Future Challenges. In *Wildfire Hazards, Risks and Disasters* (pp. 59-75).

Castillo, J., Fernández, A., Fuentes, R. & Ojeda, C. (2021) Data-based wildfire risk model for Mediterranean ecosystems – case study of the Concepción metropolitan area in central Chile, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 3663–3678, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3663-2021>.

CEPAL. (2023). Daño y pérdida de biodiversidad. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/temas/biodiversidad/perdida-biodiversidad>.

Chuvieco, E., Martín, M., Martínez, J. & Salas, F. (1998). Geografía e incendios forestales. *Serie Geográfica*, 11, 11-17.

Chuvieco, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-181.

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, MP., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, JR., Herrera, MA & Zamora, R. (2010) Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling* 221, 46–58. doi:10.1016/J.ECOLMODEL.2008.11.017

Consortio para el Servicio de Prevención, Extinción de Incendios, Protección Civil y Salvamento de Guadalajara. CEIS. (2015). Incendios de vegetación. Manual de incendios, Parte 6. México, Guadalajara.

Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2021). Incendios Forestales en Chile. Consultado el 01/11/2021. Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>.

Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2021). Estadísticas históricas. Estadísticas - Resumen Regional Ocurrencia (Número) y Daño (Superficie Afectada) por Incendios Forestales 1977 – 2021. Consultado el 08/11/2021. Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>.

Corporación Nacional Forestal [CONAF]. (2022). Reservas de la biosfera. Disponible en: <https://www.conaf.cl/parques-nacionales/reservas-de-la-biosfera/>.

Coy, M. (2010). Los estudios del riesgo y de la vulnerabilidad desde la geografía humana: Su relevancia para América latina. Población y sociedad, 17(1), 9-28. Disponible en: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S185285622010000100002&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185285622010000100002&lng=es&tlng=en).

Del Canto, S. & Paskoff, R. (2021). Características y evolución geomorfológica actual de algunas playas de Chile central, entre Valparaíso y San Antonio (V Región). Revista De Geografía Norte Grande, (10), 31–45. Recuperado a partir de <http://www.revistacienciapolitica.cl/index.php/RGNG/article/view/39665>

De La Barrera, F. (2023). Francisco de la Barrera, académico UdeC: “Tenemos un paisaje que está configurado para los desastres”. Noticias UdeC. Recuperado a partir de <https://noticias.udec.cl/francisco-de-la-barrera-academico-udec-tenemos-un-paisaje-que-esta-configurado-para-los-desastres/>.

Díaz-Delgado, R. (2003). Efecto de la recurrencia de los incendios sobre la resiliencia post-incendio de las comunidades vegetales de Cataluña a partir de imágenes de satélite. Ecosistemas 2003/3.

Doerr, S & Santín, C. (2016). Global trends in wildfire and its impacts: perception versus realities in a changing world *Philos. Trans. R. Soc. B*, 371, p. 20150345.

Dotson, D., Jacobson, S., Kaid, L & Carlton, S. (2012). Media Coverage of Climate Change in Chile: A Content Analysis of Conservative and Liberal Newspapers, *Environmental Communication*, 6:1, 64-81, DOI: 10.1080/17524032.2011.642078.

Dow, K., Berkhout, F & Preston, B. (2013). Limits to adaptation to climate change: a risk approach, *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Volume 5, Issues 3–4. Pages 384-391. ISSN 1877-3435. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.005>.

Downing, T., Olsthoorn, A & Tol, R. (1999). *Climate, change and risk*. Routledge 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE. ISBN 0-415-17031-1.

EULA (2018). Estudio Básico Diagnóstico Plan de Gestión Reserva de la Biósfera Nevados de Chillán-Laguna del Laja. Código BIP 30414775-0). Gobierno Regional de Biobío. EULA-Chile, Universidad de Concepción. Disponible en: <https://biogeoart.cl/wp-content/uploads/2020/07/PLAN-DE-GESTION-RdB.pdf>.

Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M. & Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales. Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Católica y Corporación Nacional Forestal.

Gajardo, R. (1994). *La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica*. Santiago, Chile: Editorial Universitaria.

Gellert-de Pinto, G. (2012). El cambio de paradigma: de la atención de desastres a la gestión del riesgo. *Boletín Científico Sapiens Research*, 2(1), 13-17.

González, M.E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., Vásquez, F.,

Lara, A., Aldunce, P., Delgado, V., Arriagada, Ugarte, A.M., Sepúlveda, A., Farías, L., García, R., Rondanelli, R.,J., Ponce, R.,Vargas, F., Rojas, M., Boisier, J.P., C., Carrasco, Little, C., Osses, M., Zamorano, C., Díaz-Hormazábal, I., Ceballos, A., Guerra, E., Moncada, M., Castillo, I . (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile.

Haltenhoff, H. (2008). Incendios forestales: ¿Dónde estamos? Corporación Nacional Forestal, Gerencia de protección contra incendios forestales, Santiago de Chile.

Herzer, H., Rodríguez, C., Celis, A., Bartolomé, M. & Caputo, G. (2002). Convivir con el riesgo o la gestión del riesgo. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Tercer Mundo. Bogotá, Colombia, 1-17.

Hewitt, K. (1983). "The Idea of Calamity in a Technocratic Age". En Hewitt, K (ed) Interpretations of Calamity. Allen and Unwin. London.

Humerez, A. & Balboa, A. (2012). Estudio fundado de riesgos. Plan regulador metropolitano de Valparaíso. Secretaría Ministerial de Vivienda y Urbanismo, Región de Valparaíso.

Iglesias, D., Rucci, T., Frank, O., Llorens, F., Buschiazzi, D., De Giuseppe, R., Obieta, R & Salvariori, C. (2007). Modificaciones producidas por incendios naturales y programados sobre el estrato leñoso herbáceo de la zona central de la provincia de la pampa. Disponible en: <http://170.210.120.55/index.php/semiárida/article/viewFile/5060/5259>.

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2017). Base cartográfica censal. Alcances y consideraciones para el usuario. Departamento de Geografía.

Irastorza, U. (2019). Incendios forestales. Udane Irastorza paisajista. Disponible en: <http://www.udaneirastorza.com/incendios-forestales/>.

Jaque Castillo, E., Fernández, A., Fuentes Robles, R. & Ojeda, C. (2021). Data-based wildfire risk model for Mediterranean ecosystems – case study of the Concepción metropolitan area in central Chile, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 3663–3678, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3663-2021>.

Julio, G. (1996). Fundamentos del manejo del fuego. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Departamento de Manejo de Recursos Forestales.

Kulma, D. (2019). "La sostenibilidad de la reconstrucción 2014-2019 tras el Gran incendio en Valparaíso: una mirada desde la habitabilidad, resiliencia y preparación en la gestión de desastres". Independent Study Project (ISP) Collection. 3243. Disponible en: [https://digitalcollections.sit.edu/isp\\_collection/3243](https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/3243).

Kunreuther, H., Heal, G., Allen, M., Edenhofer, O., Field, C & Yohe, G. (2013). Risk management and climate change. *Nature Clim Change* 3, 447–450. <https://doi.org/10.1038/nclimate1740>.

Luebert, F. & Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria.

Macías M. & Jesus, M. (2015). Crítica de la noción de resiliencia en el campo de estudios de desastres. *Revista Geográfica Venezolana*, 56(2),309-325. ISSN: 1012-1617. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347743079009>

Malingreau, J., Stephens, G. & Fellows, L. (1985). Remote sensing of forest fires: Kalimantan and North Borneo in 1982-83. *Ambio* 14: 314- 321.



Maturana, J., Bello, M. & Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña*, 2000, 13-27.

Martínez, J., Vega-García, C. & Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* 90, 1241–1252. doi:10.1016/J.JENVMAN.2008.07.005.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2013). Memoria explicativa Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso (PREMVAL). Secretaría Regional Ministerial, Region de Valparaíso.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2021). ¿Qué es el cambio climático?. Disponible en: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/que-es-el-cambio-climatico/>.

Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (MAGA). (2005). Metodologías para la evaluación de daños en áreas afectadas por incendios forestales. Proyecto FAO TCP/GUA/2903 (A).

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2018). Ley de Fortalecimiento de la Regionalización del País, N°21.074. Disponible en: [www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1115064](http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1115064).

Montenegro, G., Ginocchio, R., Segura, A., Keely, J. & Gomez, M. (2004). Fire regimes and vegetation responses in two Mediterranean-climate regions. *Revista chilena de historia natural*, 77(3), 455-464.

Narváez, L., Pérez Ortega, G. & Lavell, A. (2009). La gestión del riesgo de desastres. Un enfoque basado en procesos.

Nasi, R., Denni, R., Meijaard E., Applegate, G. & Moore, P. (2001) Los incendios forestales y la diversidad biológica. Disponible en <https://www.fao.org/3/y3582s/y3582s08.htm>.

Loboda, T. & Csiszar, IA. (2007) Assessing the risk of ignition in the Russian Far East within a modeling framework of fire threat. *Ecological Applications* 17, 791–805. doi:10.1890/05-1476

Oficina de Cambio Climático de la Sección de Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile. (2020). Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Disponible en: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/ReporteClimatico2020-edmay2021.pdf>.

Omi, P. N. (2005). *Forest Fires: A Reference Handbook*. ABC-CLIO.

Oliveira, S., Rocha, J. & Sá, A. (2021). Wildfire risk modeling. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23, 100274. doi:10.1016/j.coesh.2021.100274.

Orellana, J. (2018). *Arboles de decision y Random Forest*. Disponible en: <https://bookdown.org/content/2031/>.

Ortiz, C. (2009). *Plan de protección contra incendios forestales para la comuna de Calbuco, Región de Los Lagos*. Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar a Título de Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile.

Paveglio, T., Brenkert-Smith, H., Hall, T. & Smith, A. (2015). Understanding social impact from wildfires: advancing means for assessment. *International Journal of Wildland Fire*, (), –. doi:10.1071/WF14091

Peel, M., Finlayson, B. & McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, pag. 1635, 2007

Ramírez, J. & Ofelmina, D. (2015). *Construcción social del riesgo de desastres: la teoría de representaciones sociales y el enfoque social en el estudio de problemáticas socio-ambientales*. Disponible en: <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/146/pdf>.

Reyes, A., Montilla, A., Castillo, P. & Zambrano, M. (2017). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante eventos naturales. Factores socialmente construidos. Disponible en: <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/146/pdf>.

Roces, J. & Santin, C. Los incendios no siempre son el enemigo: cómo beneficia el fuego a los ecosistemas y los humanos. The conversation, Disponible en: <https://theconversation.com/los-incendios-no-siempre-son-el-enemigo-como-beneficia-el-fuego-a-los-ecosistemas-y-los-humanos-161960>.

Rodríguez, D. (2007). Maximizando impactos positivos del fuego mediante quemas prescritas en apoyo al manejo integral de incendios forestales.

Santibañez-Frey, H. (2019). Conflictos socio-ambientales en el Área Metropolitana de Valparaíso. Revista Austral de Ciencias Sociales, (35), 261-281.

Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., Hernández-Mora, M., de la Barrera, F., Smith, P. & Meseguer-Ruiz, Ó. (2019) Recent wildfires in Central Chile: detecting links between burned areas and population exposure in the wildland urban interface. Science of The Total Environment, 135894. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135894.

Servicio Forestal de Estados Unidos, Departamento de Agricultura (USDA). (2021). Wildfire Hazard Potential Archived Products. Disponible en: <https://www.firelab.org/project/wildfire-hazard-potential-archived-products>.

Silverman, B. Estimación de densidad para las estadísticas y el análisis de datos. New York: Chapman and Hall, 1986.

Tolhurst, K., Shields, B. & Chong, D. (2008). Phoenix: development and application of a bushfire risk management tool. The Australian Journal of Emergency Management 23(4), 47–54.

Úbeda, X & Sarricolea, P. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*. Volume 146, Pages 152-161, ISSN 0921-8181. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.004>.

Valparaíso, Municipalidad & Guillermo, P. (2018). Plan Maestro para la Gestión del Riesgo de Incendios Forestales - Urbanos Valparaíso (Memoria Técnica). Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/338168569\\_Plan\\_Maestro\\_para\\_la\\_Gestion\\_del\\_Riesgo\\_de\\_Incendios\\_Forestales\\_-\\_Urbanos\\_Valparaiso\\_Memoria\\_Tecnica](https://www.researchgate.net/publication/338168569_Plan_Maestro_para_la_Gestion_del_Riesgo_de_Incendios_Forestales_-_Urbanos_Valparaiso_Memoria_Tecnica).

Villers, M. (2009). Incendios forestales. *Ciencias*, (081). Disponible en: <https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/12036>.

Yang, X., Jin, X. & Zhou, Y. (2020). Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. *Forests* 2021, 12, 1299. <https://doi.org/10.3390/f12101299>.

Wilches-Chaux, G. (1998). Auge, Caída y Levantada de Felipe Pinillo, Mecánico y Soldador o Yo Voy Correr el Riesgo: Guía de La Red para la Gestión Local del Riesgo. La Red. ITDG Perú, Quito.

World Wildlife Fund (WWF)., Boston Consulting Group (BCG). Fires forests and the future report. Disponible en [https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf\\_fires\\_forests\\_and\\_the\\_future\\_report.pdf](https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_fires_forests_and_the_future_report.pdf).

**9. ANEXOS**

Anexo N°1: Valores de reclasificación de la variable cobertura de suelo.

VALOR	NUEVO
120	3
130	3
140	3
150	1
211	3
212	3
241	5
251	5
311	4
312	4
320	4
330	5
410	4
420	4
430	3
440	5
450	4
510	1
530	1
610	1
620	1
630	1
640	1
800	1
910	1
920	2
931	2
932	2
1210	1

## Anexo 2: Significado de cada valor de la variable cobertura de suelo.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
100 Cultivos	110 Arrozales	
	120 Invernaderos	
	130 Otros Cultivos	
	140 Huertos	
	150 Barbechos	
200 Bosques	210 Nativo de Hoja Ancha	211 Primarios 212 Renovales
	220 Nativo de Coníferas	221 Primarios 222 Renovales
	230 Mixtos	231 Primarios 232 Renovales
	240 Plantaciones de Hoja Ancha	241 Adultas 242 Cosechas
	250 Plantaciones de Coníferas	251 Adultas 252 Cosechas
300 Pastizales	310 Praderas	311 Anuales 312 Perennes
	320 Otros Pastizales	
	330 Pastizales Áridos	
400 Matorrales	410 Matorrales	
	420 Matorrales Arborescentes	
	430 Suculentas	
	440 Plantación de Matorrales	
	450 Otros Matorrales Áridos	
500 Humedales	510 Marismas	
	520 Pantanos	
	530 Otros Humedales	
600 Cuerpos de Agua	610 Lagos	
	620 Reservorios	
	630 Ríos	
	640 Océano	
800 Superficies Impermeables		
900 Tierras desnudas	910 Salares	
	920 Suelos arenosos	
	930 Suelos rocosos	931 Rocas 932 Gravas
1000 Hielo y Nieves	1010 Nieve 1020 Hielo	
1200 Nubes	1200 Nubes	1210 Nubes