

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO - CHILE



“CÁLCULO DE ÍNDICE DE RIESGO DE INCENDIOS UTILIZANDO VARIABLES METEOROLÓGICAS”

RODOLFO CASTILLO MATELUNA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesor Guía: Dr. Claudio Torres
Profesor Co-Guía: Dr. Gonzalo Carvajal
Profesor Correferente: Ing. Daniel San Martín

Septiembre - 2019

DEDICATORIA

Dedicado a mi mama, que se ha esforzado desde que tengo memoria por darme las oportunidades para llegar a ser quién soy.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad, por la formación y oportunidades que me aportó.

Agradezco al Departamento de Informática, por prepararme para enfrentar problemas.

Agradezco a mis profesores de título, por su apoyo constante e infinita paciencia.

Agradezco a mis compañeros de generación, con los que compartí y superé los desafíos codo a codo.

Agradezco al equipo de Xompass, por darme la oportunidad de enfrentarme a problemas del mundo real.

Agradezco a mi mama, por entregarme todo. Agradezco a mi hermanita, por ser la mejor. Agradezco a la Yeyé, a mis tíos, Eugenio y Rodolfo por ser pilares fundamentales de mi formación.

Y por supuesto, agradezco al amor de mi vida, mi Gatato, por ser mi mayor motivación.

RESUMEN

Resumen— Se busca evaluar la factibilidad de utilizar índices de riesgo de incendios obtenidos con datos meteorológicos actualizados como una herramienta de toma de decisiones a corto plazo. Para esto, se contrastan los resultados de una variedad de modelos que definen índices de riesgo de incendio basados principalmente en variables meteorológicas contra las ocurrencias de incendios entre 2013-2017 (entre ellas presente, el Gran Incendio de Valparaíso de 2014) con el propósito de encontrar posibles causales o patrones que puedan definir condiciones propicias para la ignición dentro de un intervalo de tiempo acotado. Se establece en qué casos es recomendable usar los modelos y en cuáles no. Se presta mayor importancia a factores de sequía y precipitación acumulada en su rol como pilar fundamental de los cálculos realizados. Finalmente se obtiene que dada la naturaleza de los índices revisados y propuestos, es complejo actuar conforme a información calculada en el momento, sin embargo, se propone un método alternativo basado simplemente en períodos prolongados de sequía que puede ser puesto en práctica.

Palabras Clave— Riesgo de incendios, Valparaíso, sequía

ABSTRACT

Abstract— The goal of this investigation is to evaluate the feasibility of using fire risk indices from up-to-date meteorological data as a valid short-term decision making factor. To achieve this, results of a variety of fire risk index models, primarily based on meteorological variables, are compared against wildfire events across 2013-2017 (including the 2014 Great Fire of Valparaíso) whilst trying to understand some causality or pattern present that implicates wildfire ignition in a specific timeframe. Advice over circumstantial usage of models is offered. The main role of drought and accumulated precipitation is acknowledged. Finally, considering the nature of existing and proposed indices, it is not recommendable to react on data calculated within the moment, nevertheless, an alternative method is proposed for day-to-day decision making, based on long lasting periods of drought.

Keywords— Fire risk, Valparaíso, drought

GLOSARIO

Dataset: Inglés para *conjunto de datos*.

Entrenar: Se refiere al ajuste u obtención de parámetros de modelos matemáticos.

Framework: Puede tener varios significados; en el texto se utiliza bajo el contexto de un conjunto de librerías implementadas para el lenguaje de programación Python.

GIS: Sistema de información geográfico (por sus siglas en inglés); consiste en un tipo de visualización de datos dinámico, que permite interactuar con información representada sobre un mapa.

Repositorio GIT: Sistema de control de versiones; consiste en un sistema que mantiene un árbol de archivos y sus diferencias en el tiempo.

Script: Se refiere a la definición de un programa computacional.

Undersampling: Se refiere a reducir la cantidad de datos en un *dataset* de manera conveniente con el propósito de balancear los valores. Particularmente útil al configurar valores esperados para un entrenamiento.

Web scrapping: Técnica de obtención automatizada de datos desde páginas web. Usualmente se implementa con scripts.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	IV
GLOSARIO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	6
2.1 INICIOS	6
2.2 ÍNDICE DE MCARTHUR	7
2.3 NFDRS	8
2.4 FWI	8
2.5 ÍNDICE DE JULIO	9
2.6 RISCO DO FOGO	13
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN	18
3.1 FUENTE DE DATOS	18
3.1.1 DATOS METEOROLÓGICOS	18
3.1.2 DATOS DE OCURRENCIAS DE INCENDIOS	20
3.2 ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE JULIO	21
3.2.1 FACTOR DE SEQUÍA ACTUALIZADO	23
3.2.2 ANÁLISIS FÓRMULA GENERAL V/S ESPECÍFICA	31
3.3 ANÁLISIS DEL RISCO DO FOGO	32
3.4 EXPERIMENTACIÓN	35
3.4.1 1RA ITERACIÓN	35
3.4.2 2DA ITERACIÓN	38
3.4.3 3RA ITERACIÓN	43
3.4.4 30/30/30	47

CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN	48
4.1 COMPARACIÓN DE SOLUCIONES Y RESULTADOS	48
4.1.1 ÍNDICE DE JULIO	48
4.1.2 RISCO DO FOGO	48
4.1.3 EXPERIMENTOS	49
4.1.4 PRECIPITACIÓN Y SEQUÍA	52
4.1.5 CASO DE ESTUDIO: GRAN INCENDIO DE VALPARAÍSO	53
4.2 RESOLUCIÓN DE LOS DATOS	55
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	58
5.1 RESPECTO A LAS SOLUCIONES	58
5.2 PROPUESTA DE APLICACIÓN	59
5.3 TRABAJO FUTURO	59
ANEXOS	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ocurrencia y Daño de Incendios Forestales, Decenio 2008-2017	3
2	Medidor de índice de peligro de incendios forestales (FFDM) de McArthur. La escala determina si el peligro es: Bajo, Moderado, Alto, Muy Alto o Extremo. . .	7
3	Estructura del NFDRS (Versión del 1978).	9
4	Estructura del FWI.	10
5	Zonas de riesgo definidas por G. Julio	11
6	Mejora porcentual del riesgo de incendio revisado (en rojo) con respecto al preliminar (en azul). El gráfico representa el porcentaje resultados, riesgo de incendio sobre alto/medio, en períodos donde se detectaron focos	14
7	Evolución temporal de Rb_7 respecto a la cantidad de días de sequía (PSE), interesa particularmente el caso para $A=1.5$ <i>Broadleaf evergreen</i> como se verá más adelante	16
8	Ubicación estación meteorológica utilizada para extracción de datos.	19
9	Categoría de incendios ocurridos entre 2013-2017 v/s cantidad de ocurrencias. Las categorías marcadas en azul corresponden a quemadas controladas	22
10	Delimitación de zonas de incendios: Zona 1 (la más pequeña) a Zona 3 (la más grande). El símbolo amarillo con una estrella al centro representa la ubicación de la estación meteorológica del Aeródromo de Rodelillo.	23
11	Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 1era Iteración.	25
12	Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 2da Iteración.	26
13	Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con $T=0$ días, esto es, cada incendio está garantizado a ser asociado con una lluvia.	27
14	Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con $T=3$ días.	27

15	Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con T=7 días.	28
16	Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con T=0 días y precipitación acumulada mínima de 0.5mm.	28
17	Series de tiempo comparando precipitación (mm, en rojo), Índice de Julio con factor de sequía original (%, en azul oscuro) e Índice de Julio con factor de sequía basado en PSE (%, en azul claro). Muestra desde mayo 28, 2013 hasta junio 4, 2013.	30
18	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Índice de Julio con factor de sequía original. Útil para percibir patrón de comportamiento.	30
19	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Índice de Julio con factor de sequía basado en PSE. Útil para percibir patrón de comportamiento. Comparado con la Figura 18, los valores comienzan 4 meses después (mayo) debido a que el PSE necesita precipitaciones acumuladas de hasta 120 días en el pasado.	31
20	Series de tiempo comparando precipitación (mm, en rojo), Índice de Julio general con factor de sequía basado en PSE (%, en azul claro) e Índice de Julio específico zona 1 (%, en naranja). Muestra desde mayo 28, 2013 hasta junio 4, 2013.	32
21	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Índice de Julio específico zona 1. Útil para percibir patrón de comportamiento. La forma es nuevamente semejante, pero esta instancia genera valores fuera de límite con los mismos datos de entrada, lo que sugiere que la fórmula general es de mayor utilidad para este caso de estudio.	32
22	Clasificación de la vegetación en la zona de estudio 3 (ver Tabla 6). Se ve que gran parte de la zona está urbanizada (ciudad de Valparaíso), otra parte está cubierta con vegetación tipo <i>Evergreen Broadleaf forest</i> con factor $A = 1,5$ (ver Tabla 4) y una tercera parte de <i>Woody savannas</i> con factor $A = 2,4$ (ver Tabla 4).	33
23	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Risco de Fogo. RDF con $A = 1,5$ en rojo, RDF con $A = 2,4$ en morado pastel. La intersección de las curvas se ve en morado oscuro. Útil para percibir patrón de comportamiento.	34

24	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Riesgo básico (5). RB con $A = 1,5$ en morado oscuro, RB con $A = 2,4$ en rosado. Útil para percibir patrón de comportamiento. Recordar que esto conforma la base del RDF 23 en conjunto con un factor de temperatura y otro de humedad. . . .	34
25	Series de tiempo comparando precipitación (mm, en rojo) y PSE (en gris). Muestra desde mayo 28, 2013 hasta junio 4, 2013.	35
26	Gráfico de dispersión en 3D. Los ejes comparan humedad relativa (%), con temperatura (°C) y el valor de RDF calculado. Este gráfico muestra sólo instancias donde haya existido un incendio en el período 2013-2017.	37
27	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 1. Índice (%, celeste), RDF (%, rojo), PSE (%, gris). Útil para percibir patrón de comportamiento. Los resultados presentados en la imagen son el resultado del entrenamiento utilizando incendios ocurridos dentro de la zona 1.	38
28	Histograma mostrando ocurrencias de distancias entre el foco de un incendio y la estación meteorológica. El promedio es de 5822.16m.	39
29	Series de tiempo mostrando las horas de inicio de los incendios registrados entre 2013-2017.	39
30	Gráfico de barras mostrando cantidad de incendios por registro. El universo sólo contempla registros que tienen al menos 1 incendio asociado. El ceil(promedio) es 2 (válido también para el subconjunto de quemas ilegales). .	40
31	Gráfico de barras mostrando cantidad de incendios por hora. La hora promedio es a las 15:12.	41
32	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 2 (lineal). Los resultados presentados en la imagen son el resultado del entrenamiento utilizando incendios ocurridos dentro de la zona 3.	43
33	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 2 (capa intermedia). Los resultados presentados en la imagen son el resultado del entrenamiento utilizando incendios ocurridos dentro de la zona 3.	43
34	Histograma de cantidad de agua caída en el período 2013-2017. Promedio: 9.24mm.	44
35	Histograma de valores esperados asignados según los criterios de la segunda iteración.	45

36	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 2 (lineal). Se utiliza un subconjunto de los datos de entrenamiento como es definido en la descripción de la tercera iteración. Los resultados originales se muestran en rojo y los obtenidos luego del <i>undersampling</i> en rosado.	45
37	Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 3 (lineal). Se utiliza un subconjunto de los datos de entrenamiento como es definido en la descripción de la tercera iteración. Los datos de entrenamientos pasaron por un proceso de <i>undersampling</i> , efectivamente eliminando exceso de ceros.	46
38	Series de tiempo mostrando una muestra correspondiente al 10 % de los valores calculados para el índice de Julio original (en azul) y modificado (basado en PSE, en naranja). Cada barra verde en la línea de tiempo es un incendio. Cabe destacar que los datos del índice modificado comienzan luego de 6 meses requeridos para tener datos iniciales.	49
39	Series de tiempo mostrando valor calculado del índice del RDF, con $A = 1,5$ (rojo) y $A = 2,4$ (café). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio.	49
40	Series de tiempo mostrando valor calculado del índice del RDF, con $A = 1,5$ (rojo) y el valor calculado para el índice de Julio modificado (celeste). La ventana temporal corresponde a abril, 2014.	50
41	Series de tiempo mostrando valor calculado de la primera iteración de los experimentos. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	50
42	Series de tiempo mostrando valor calculado de la segunda iteración de los experimentos. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	51
43	Series de tiempo mostrando valor calculado de la variación de la segunda iteración (rosado) de los experimentos y RDF (rojo). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	51
44	Series de tiempo mostrando valor calculado de la variación de la tercera iteración (rojo) de los experimentos. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	52
45	Series de tiempo mostrando valor de la precipitación para un registro de la estación (rojo). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	52
46	Series de tiempo mostrando valor del factor de precipitación acumulada original de G. Julio. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	53

47 Series de tiempo mostrando valor del factor de precipitación acumulada modificado de G. Julio (basado en valores actuales del PSE). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	54
48 Series de tiempo mostrando valor del PSE. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio	54
49 Gráfico de dispersión en 3d mostrando valores de factor de sequía/precipitación acumulada sólo en instancias donde ocurrió un incendio. Factor de sequía PSE (rojo). Factor modificado de precipitación acumulada de Julio (azul).	55
50 En el eje y, se muestran los períodos donde se produce el valor máximo de sequía de manera continua, es decir, desde inicio a fin del período, el único valor de PSE calculado es el máximo. En el eje x se grafica la duración en horas del período para poder visualizar más fácilmente. La porción naranja representa la duración hasta el inicio del Gran Incendio.	56
51 6 índices calculados a lo largo del día 12 de abril de 2014. En todos los casos el eje y corresponde al valor calculado (mayor significa más peligro). En el eje X se muestra la hora del día para un valor calculado.	57
52 Mapa coloreado según el índice de probabilidad de ignición calculado.	62

ÍNDICE DE TABLAS

1 Factor de estacionalidad de G. Julio	12
2 Categorías de rangos de índices de riesgo de G. Julio (caso general)	13
3 Categorías de rangos de índices de riesgo de G. Julio (zona de peligro 1)	13
4 Clases de vegetación según el International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) con los factores numéricos (A) asociados influyentes en el modelo para calcular RF. El valor -x- indica que no existe una constante A atribuida a ese tipo de vegetación	15
5 Clasificación discreta asignada a 5 rangos de RF	17
6 Definición de límites: 4 coordenadas representando cada esquina de un área (están ordenadas de manera que coincidan visualmente con su posición en el mapa) y cantidad de incendios (2013-2017) ocurridos dentro de dichos límites por cada zona.	22

INTRODUCCIÓN

Un incendio es un evento que involucra fuego descontrolado que abrasa y destruye elementos materiales y/o vivos. Para que se produzca un incendio, se requiere de la presencia de un elemento de ignición, combustible y oxígeno. En el caso de un incendio forestal, se encuentra como característica principal las extensas proporciones de destrucción de flora y fauna propia de un sector [CONAF, 2019].

Los incendios forestales se alimentan de combustible sólido y destruyen todo a su paso. Existen tres tipos de incendios forestales: Incendio de subsuelo (el cual quema raíces de árboles y materia orgánica de zonas enterradas), incendio de superficie (que quema matorrales, hierbas secas, hojas secas y pastizales) y los incendios de copa (donde el fuego se extiende violentamente por las copas de los árboles, de fácil propagación) [Zárate López, 2004].

Los incendios forestales se clasifican en activos, controlados y extinguidos. El primero refiere a un fuego de libre propagación no controlada que afecta tanto a la vegetación como a la fauna del sector, éstos deben ser controlados rápidamente por su rapidez de propagación. Un incendio controlado refiere a un fuego aislado, cuyo avance queda detenido y no se propaga. Por último, tenemos al fuego extinguido, en esta situación el incendio deja de reproducirse y causar daño [T13, 2019].

En Chile, por razones tanto climáticas como por ecosistema propio, se produjo un fenómeno de aumento en los incendios forestales en los últimos 25 años [Peña, 2008], generando eventos por temporada que superan las 50 000 hectáreas quemadas año a año. Siendo un factor preocupante el origen, que recae en un 99.7 % en acciones humanas [CONAF, 2019] ya sea por razones accidentales, negligentes o intencionales. Otros factores importantes a considerar son el aumento de temperaturas globales que se están produciendo, la disminución de lluvias (aumento de sequía) y los flujos de viento, los cuales son elementos propicios para este fenómeno.

Dada la magnitud destructiva de este tipo de eventos, se clasifican como situaciones no deseadas que deben ser tratadas mediante acciones reactivas y preventivas. Las acciones reactivas están relacionadas principalmente en la recuperación de las áreas afectadas. Las preventivas por otro lado, se basan en la educación de las masas con propaganda informativa [Prevención, 2019].

En definitiva, los incendios son sucesos catastróficos imprevisibles, sin embargo, requieren de condiciones favorables para su ignición y propagación, por eso, se hace interesante la investigación de las variables que influyen y cómo lo hacen.

Ante este requerimiento surge la siguiente pregunta: ¿a qué variables se puede asociar la ocurrencia de un incendio?

Al igual que el problema, no es una pregunta novedosa y posee respuestas de diversos auto-

res que han estudiado profundamente el tema [Wright, 1932, Noble *et al.*, 1980, Julio, 1990, Sismanoglu y Setzer, 2004, Van Wagner *et al.*, 1987, Deeming, 1972], teniendo todos en común el objetivo de definir un proceso o correlación que pueda generar un índice numérico asociado con la detección de condiciones favorables para que se produzca un incendio, en otras palabras, la cuantificación del riesgo.

En esta investigación, se evalúan esos estudios con el fin de implementar y analizar con datos locales sus rendimientos, para luego discutir sobre sus comparaciones y finalmente producir nuevas propuestas a partir de lo encontrado, detallando las iteraciones del proceso. Finalmente, se analiza el caso de estudio correspondiente al Gran Incendio de Valparaíso de 2014 y se sacan conclusiones respecto a las posibles aplicaciones de los resultados obtenidos.

En general el desarrollo se presenta de manera sistemática, distribuido en las siguientes secciones:

- **Definición del Problema:** se contextualizan los hechos que generan el problema y se definen los objetivos de la investigación.
- **Marco Conceptual:** se presenta el estado del arte de los índices más importantes y relevantes para la investigación comenzando con una historia sobre los orígenes del área de estudio.
- **Propuesta de Solución:** se definen las fuentes de datos, se implementan índices de la literatura, se generan índices nuevos y se analizan los resultados.
- **Validación de la Solución:** se contrastan los resultados de la Propuesta de Solución con las ocurrencias de incendios y se analiza el caso de estudio del Gran Incendio de Valparaíso.
- **Conclusiones:** se rescatan y exponen los aprendizajes clave, se propone una aplicación de los resultados y se discute el potencial trabajo futuro con bases en la investigación.

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

Los incendios son fenómenos altamente destructivos cuyas consecuencias son transversales a un sinnúmero de categorías, desde las personas damnificadas hasta los servicios que proveen las necesidades básicas en la sociedad moderna. Existen incendios de diversas magnitudes, que conllevan a distintos niveles de catástrofe y dificultades en su extinción. Sin embargo, lo ideal es que su ocurrencia no llegue a concretarse, por lo que además de acciones correctivas, este campo, necesita el constante desarrollo de medidas preventivas.

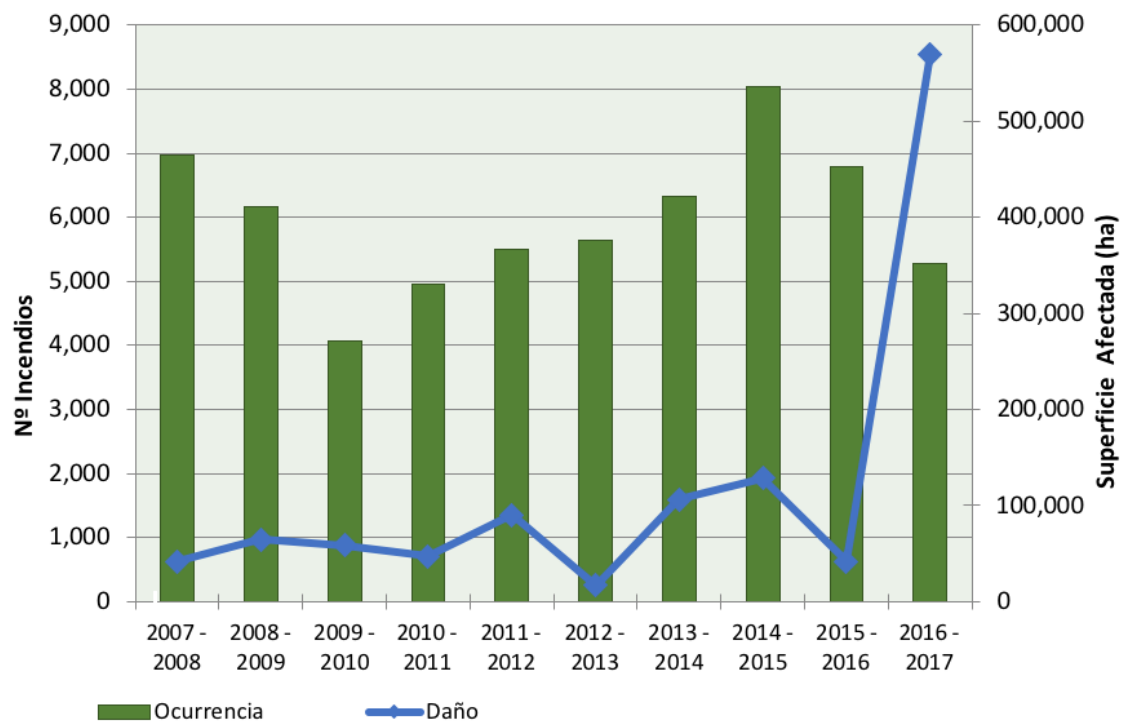


Figura 1: Ocurrencia y Daño de Incendios Forestales, Decenio 2008-2017

Fuente: CONAF, <http://www.conaf.cl>

Esto es así debido a la naturaleza geográfica del problema, no sería posible idear una solución genérica, ya que, dependiendo de la geolocalización, las condiciones para que un incendio sea propicio varían drásticamente. Considérese como ejemplo de esto, la utilización de múltiples factores dependientes del tipo de vegetación incluido en el Risco do Fogo [Setzer *et al.*, 2016] que puede ser visto más adelante en la Tabla 4.

Por esto último, existen múltiples investigaciones con el objetivo de entregar información sobre la probabilidad que un incendio comience a propagarse desde una zona determinada [Julio, 1990, Setzer *et al.*, 2016, Van Wagner *et al.*, 1987]. Chile no es la excepción al desarrollo de medidas preventivas de incendios; modelos han sido diseñados e implementados para conocer las zonas que presentan mayor riesgo de incendio [Índice de Riesgo de Incendios Forestales, 2018]. Estos recursos son sin duda de gran utilidad para las organizaciones que combaten incendios, ya que pueden estar más preparados para dar respuesta rápida en los períodos (y zonas) que son considerados más peligrosos respecto a la ignición y propagación de incendios.

Durante la investigación preliminar se encontró que la aplicación principal de los métodos presentados en la literatura se veía reflejado en estudios preventivos a gran escala territorial (regiones, países) y temporal (usualmente anual). Esa aplicación es sin duda de utilidad para la planificación a largo plazo, pero cabe la pregunta: ¿se pueden aplicar las mismas técnicas para implementar sistemas de alerta temprana?. La idea tras esta pregunta, es estudiar la viabilidad de tomar decisiones críticas en procesos de planificación a corto plazo.

Ante esta problemática, el primer paso a seguir es aumentar la resolución de los índices calculados al utilizar datos de entrada horarios ya que gran parte de los procesos descritos en la literatura, hacen uso de datos diarios recolectados en un momento específico del día.

Desde un punto de vista de las tecnologías de la información, los datos que se obtienen sobre este tópico no son centralizados y su publicación no es frecuente. Considerando esto, resulta interesante la idea de compilar distintos métodos de cálculo de índices de riesgo de incendio específicos para distintas zonas en conjunto con datos de libre disposición (específicamente, estaciones meteorológicas automáticas que generan datos de campo) y hacerlos disponibles de una manera global y centralizada. Al aportar datos y resultados en una plataforma abierta de estas características se espera que el interés en el área se vea incrementado de manera que distintas organizaciones puedan contribuir con el desarrollo de técnicas afines que beneficien al campo.

Por último, para acotar el alcance del problema a resolver, el resultado principal que se desea obtener es analizar el comportamiento de diferentes acercamientos al tópico y hacerlos públicos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar modelos para calcular indicadores de riesgo de incendio con datos de campo.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar desempeño de modelo a implementar con series de tiempo históricas obtenidas durante la investigación.
- Comparar desempeño con modelos propuestos en la literatura.
- Diseño, implementación y evaluación de un modelo refinado a partir de las comparaciones realizadas.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

Para entender la importancia de esta investigación hay que entender primero algunos conceptos [Merrill y Alexander, 1987]:

Riesgo de incendio: Es un término general usado para expresar una evaluación de factores ambientales que determinan la facilidad de ignición, la rapidez de propagación, la dificultad de control e impacto del incendio.

Evaluación de riesgo de incendio: Es el proceso de evaluar e integrar sistemáticamente los factores individuales y combinados que influyen el peligro de incendio representado en la forma de índices de riesgo.

Índice de riesgo de incendio: Es un indicador cuantitativo de uno o más aspectos de riesgo de incendio, expresado de manera relativa o como una medida absoluta.

2.1. INICIOS

El interés por tratar de entender los factores ambientales que propician la ocurrencia de un incendio data de 1916 cuando el científico J. A. Larsen determinó que datos de tiempo y clima que se habían estado recolectando desde 1913 para silvicultura¹, tenían potencial de ser utilizados para el estudio de peligro de incendios [Hardy y Hardy, 2007]. Esto se originó por la necesidad de generar precaución ante potenciales incendios forestales luego de la catástrofe de 1910 en donde se quemaron más de 1.3 millones de hectáreas de los bosques de las Montañas Rocosas en el norte de Estados Unidos [Graham *et al.*, 2014]. A partir de una serie de eventos, el servicio forestal de los Estados Unidos de América (USFS), designó a Harry T. Gisborne a la investigación de incendios forestales.

Harry T. Gisborne fue autor de numerosos trabajos e investigaciones de esta área de estudio siendo considerado pionero de la misma [Hardy, 1983]. Para 1922 Gisborne reunió la información disponible a la fecha y llegó a la conclusión que era necesario un mecanismo de evaluación de riesgo que entregara un simple conjunto de números que administradores pudieran comunicar en lenguaje natural a cualquier persona, sin importar su rango o nivel de conocimiento. Este conjunto de números sería calculado a partir de varios factores obtenidos por lecturas de valores meteorológicos de las áreas de interés.

Otro personaje importante en los inicios de la disciplina fue el canadiense James G. Wright quién hizo su primera publicación sobre riesgo de incendio en 1932 tras 8 años de investigación. En su trabajo se puede verificar el uso temprano de variables tales como el efecto de

¹Ciencia que trata del cultivo en masas forestales

la lluvia y la humedad en distintas capas de combustión en la tierra, junto a la temperatura del aire, radiación solar y velocidad del viento [Wright, 1932].

2.2. ÍNDICE DE MCARTHUR

En Australia, McArthur desarrolló el Índice de Peligro de Incendios Forestales en 1967 [Matthews, 2009] (FFDI en inglés), usado ampliamente para predecir la influencia de las condiciones atmosféricas en el comportamiento de incendios. Este índice es usado por el Buró de Meteorología Australiano para alertar a las autoridades acordes [Dowdy *et al.*, 2009]. Inicialmente, McArthur creó una herramienta física para calcular el FFDI, esta herramienta consistía en varios discos concéntricos (ver Figura 2) que se podían deslizar para introducir los valores de entrada; la posición final de los mismos ayudaba a determinar un índice de peligro de incendios.

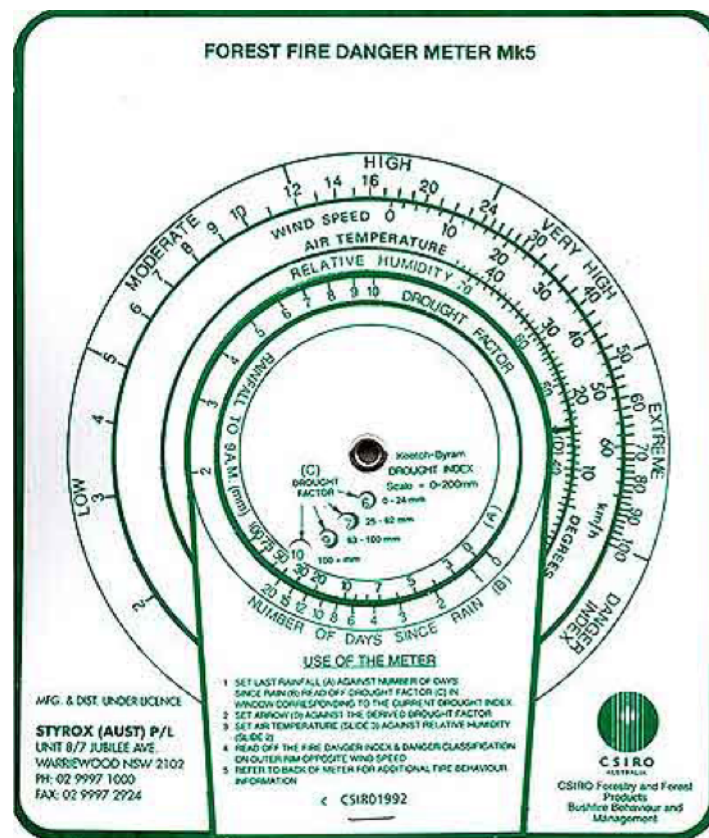


Figura 2: Medidor de índice de peligro de incendios forestales (FFDM) de McArthur. La escala determina si el peligro es: Bajo, Moderado, Alto, Muy Alto o Extremo.

Fuente: <https://www.csiro.au/en/Research/Environment/Extreme-Events/Bushfire/Fire-danger-meters/Mk5-forest-fire-danger-meter> (Visitado 2019-08-26)

Para que este modelo fuera más fácilmente implementado en sistemas computacionales,

Noble et al. [Noble *et al.*, 1980] usaron métodos estadísticos para derivar la ecuación (1) para determinar el FFDI a partir del medidor original.

$$FFDI = 2e^{(-0,45+0,987 \ln(DF)-0,0345RH+0,0338T+0,0234v)} \quad (1)$$

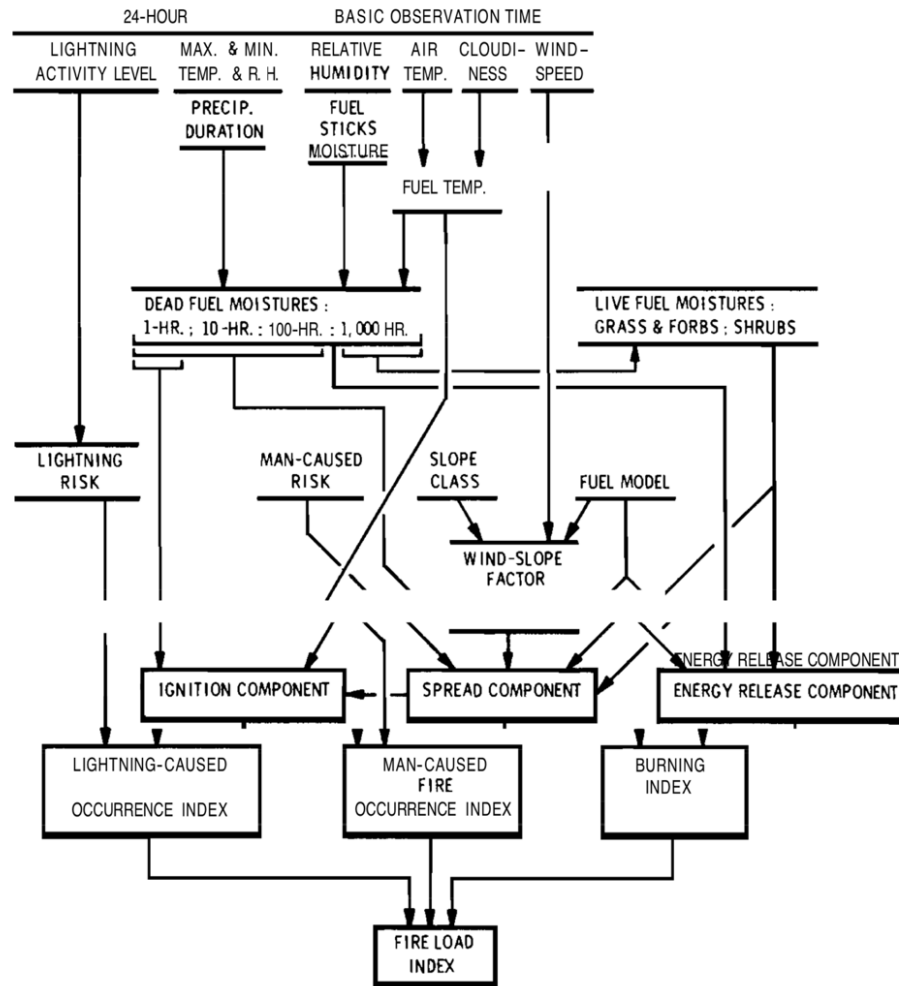
En el modelamiento de McArthur se toman en consideración temperatura (°C), T , rapidez del viento (km/h), v , humedad relativa (%), RH , y factor de sequía, DF .

2.3. NFDRS

De vuelta en Estados Unidos, habiendo transcurrido varios años de ardua investigación a partir de los grandes avances en técnicas y dispositivos que asistían en la captura de datos meteorológicos de entrada y estudios sobre las correlaciones de diversos factores, el esfuerzo comenzado por Gisborne se vio replicado en diferentes zonas de la nación y para 1958, en la reunión nacional de la Sociedad Meteorológica Americana, se propuso construir el Sistema de Calificación de Peligro de Incendios Nacional (NFDRS por sus siglas en inglés) cuyo objetivo era compilar las técnicas locales en un sistema que se pudiera implementar a nivel nacional [Graham *et al.*, 2014]. Luego de distintos desarrollos y pruebas sobre prototipos, se implementó la primera versión en 1972 [Deeming, 1972]. Además, se especificó un período de prueba para la retroalimentación del modelo y nació la segunda versión en 1978 (ver Figura 3), en donde se reflejaban los cambios realizados a partir de la mencionada retroalimentación y los avances en investigación de incendios y tecnología de combustibles [Bradshaw *et al.*, 1984].

2.4. FWI

Por otro lado, en Canadá, también se implementa un índice para uso a nivel nacional, el Índice de Incendios Meteorológico (FWI por sus siglas en inglés). Este índice es el resultado de 4 iteraciones, comenzando con la primera publicación de Wright en 1932, segunda de Wright y Beall en 1939, tercera de Beall en 1948 y la cuarta de Anón. en 1957 [Van Wagner, 1974]. Se sabe que existe una fuerte conexión entre los primeros trabajos del pionero J. G. Wright, con el actual FWI [Van Wagner, 1974], por lo que se caracteriza por ser un desarrollo arduamente elaborado. Para 1969, nueve diferentes versiones de la cuarta iteración estaban en uso en casi todo Canadá. La forma básica del FWI fue propuesta por Muraro (1968) y el primer documento técnico definiendo la estructura final (ver Figura 4) del FWI fue publicado por Van Wagner (1974).

1978 NATIONAL FIRE - DANGER RATING SYSTEM**Figura 3:** Estructura del NFDRS (Versión del 1978).Fuente: [Bradshaw *et al.*, 1984]**2.5. ÍNDICE DE JULIO**

Incluso en Chile existen registros de trabajos donde se busca asociar condiciones meteorológicas a la probabilidad de ocurrencia de incendios. La primera instancia de esto se ve reflejada en un trabajo en el que se estudiaron variables climáticas para preparar la creación de un índice de grado de peligro de incendios forestales [Julio, 1968]. Luego, utilizando datos meteorológicos y registro histórico de aproximadamente 20 000 incendios forestales en el período 1985-1988, se diseñan índices de riesgo de incendios forestales para Chile [Julio, 1990]. En esta publicación, se plantea modelar regresiones múltiples con cinco variables independientes (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, sequía y estacionalidad) generando la probabilidad de ocurrencia como resultado. En adelante se referirá a este conjunto de índices como “Índice de Julio”. Dentro del marco de la investigación preliminar, se definen

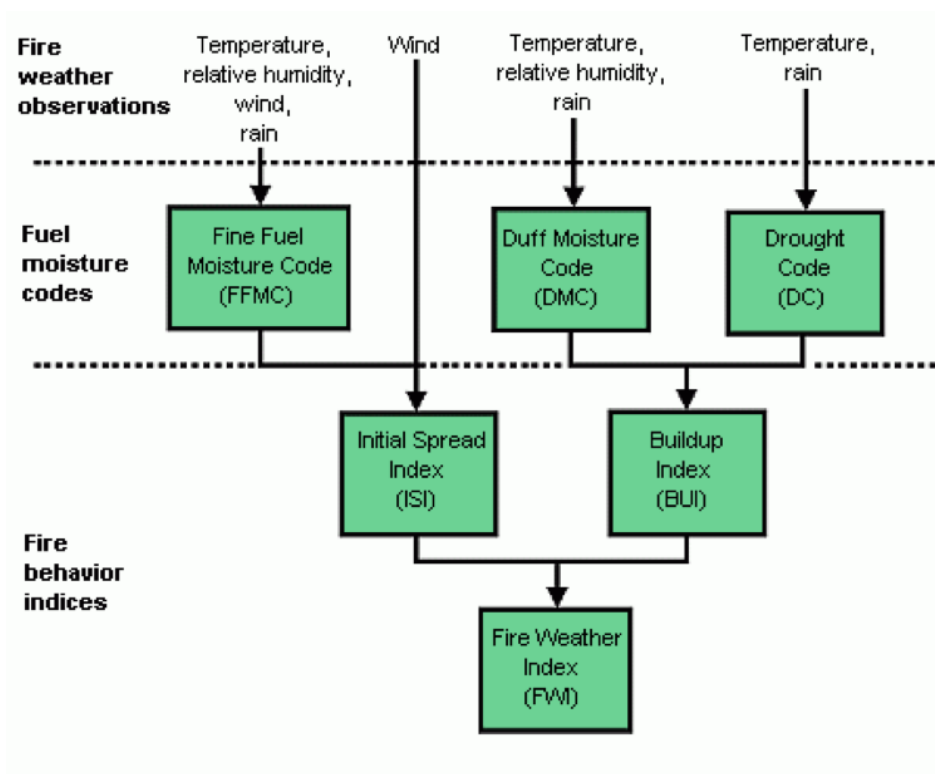


Figura 4: Estructura del FWI.

Fuente: <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi> (Visitado: 2019-06-19)

los aspectos técnicos del modelamiento y distintas zonas de riesgo a lo largo de la nación (ver Figura 5).

Los factores utilizados para crear los índices se basaron en:

- **Ocurrencia de incendios forestales**, de donde se obtenía la localización exacta, fecha y hora de inicio y la causa del incendio.
- **Información meteorológica**, obtenida desde 33 estaciones meteorológicas con datos diarios recolectados a las 14:00 horas. Las variables de interés son la temperatura del aire (°C), humedad relativa del aire (%), precipitación (mm) y velocidad del viento (nudos).
- **Evaluación de sequía**, cuyo propósito es representar la condición de la vegetación en cuanto a su contenido de humedad (susceptibilidad de ignición). Para obtener un factor de sequía el estudio se basó en 94 precipitaciones entre los meses de noviembre y abril en el período 1985-1988. Cada precipitación se relacionó con la ocurrencia de incendios forestales en los días siguientes del respectivo sector. Con la correlación se generó una función (2) que asocia la cantidad de agua caída (mm) con la condición de la vegetación (factor de sequía) en los días posteriores.

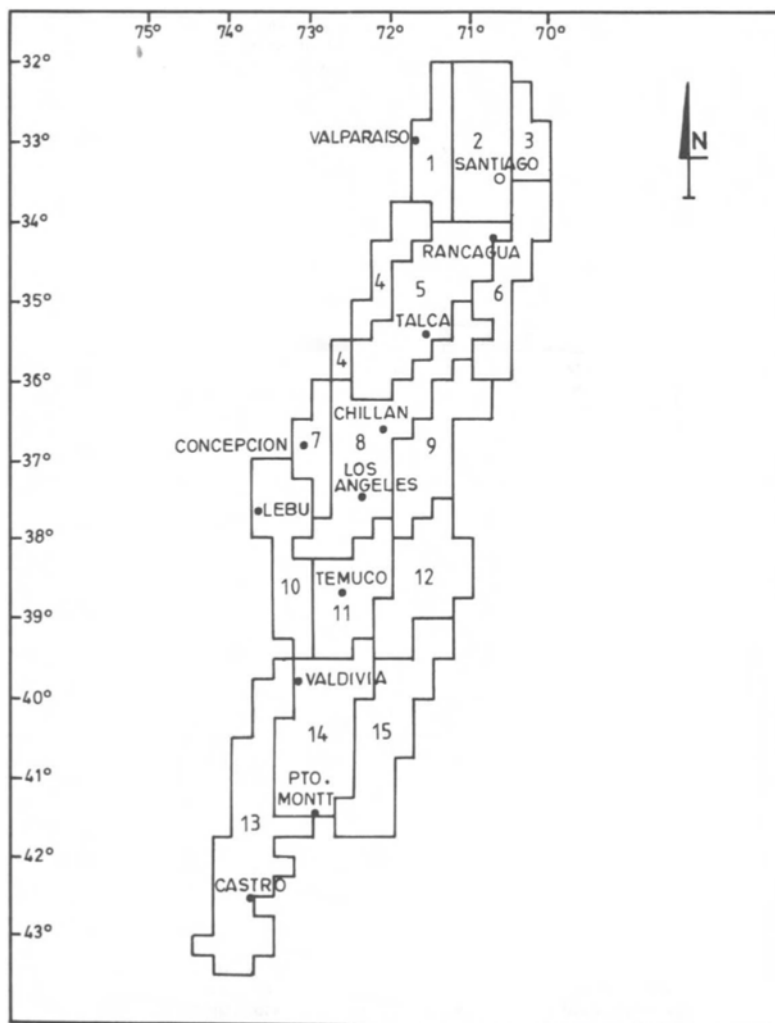


Figura 5: Zonas de riesgo definidas por G. Julio
Fuente: [Julio, 1990]

$$Y = 70 - 12,35545X + 0,52528X^2 \quad (2)$$

En la ecuación (2), Y representa la variable dependiente “factor de sequía” (precipitación acumulada) y X representa la variable independiente “número de días transcurridos desde el término de la lluvia”.

- **Evaluación de la estacionalidad**, que Julio integró como factor basado en el trabajo de otros exponentes, entre ellos, McArthur. Se puede definir como temporadas en las cuales la ocurrencia tiende a presentar una intensidad determinada (factor constante dentro de la temporada). Para obtenerse se tomó en consideración las actividades humanas durante la temporada y la condición esperada de la vegetación. El resultado con los factores ordenados por temporada y zonas de riesgo se puede ver en Tabla 1.

Período	Zonas de Riesgo									
	1	2	4	5	7	8	10	11	13	14
Noviembre										
1-15	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
16-30	2.5	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Diciembre										
1-15	3.0	1.5	1.0	1.0	2.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0
16-31	3.0	2.0	1.0	1.2	2.5	1.2	1.5	1.2	1.0	1.0
Enero										
1-15	3.0	2.0	1.0	1.5	3.0	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0
16-31	3.0	1.5	1.0	1.5	3.0	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2
Febrero										
1-15	3.0	1.5	1.2	1.5	3.0	2.0	2.0	1.5	1.2	1.5
16-29	3.0	1.5	1.2	1.5	3.0	2.0	1.5	1.5	1.2	1.5
Marzo										
1-15	2.5	1.5	1.2	1.2	3.0	1.5	1.5	1.5	1.0	1.5
16-31	2.5	1.5	1.2	1.2	2.5	1.5	1.2	1.0	1.0	1.2
Abril										
1-15	2.0	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
16-30	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tabla 1: Factor de estacionalidad de G. Julio

Fuente: [Julio, 1990]

Finalmente, a partir de la evaluación de diversos modelos matemáticos y pruebas estadísticas se llega a la conclusión que la función que representa con mayor confiabilidad el riesgo de incendios forestales en Chile es una regresión lineal múltiple con cinco variables independientes (3).

$$Y = 17,6653 + 1,1692X_1 - 0,4387X_2 + 0,3473X_3 + 18,6882X_4 - 0,2664X_5 \quad (3)$$

Donde:

- $Y \in [0, 100]$ es el indicador de riesgo de incendios (más significa mayor peligro)
- X_1 es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- X_2 es la humedad relativa del aire (%)
- X_3 es la velocidad del viento (nudos)
- X_4 es el factor de estacionalidad (Tabla 1)
- X_5 es el factor de sequía (2)

Luego, de acuerdo con un análisis de distribución de resultados del índice se definieron las siguientes categorías de riesgo de incendio:

Categorías de riesgo	Rango de valores de índice
Nulo	<25
Bajo	26-40
Medio	41-55
Alto	56-70
Extremo	>70

Tabla 2: Categorías de rangos de índices de riesgo de G. Julio (caso general)

Fuente: [Julio, 1990]

Además Julio definió distintas funciones para cada zona de peligro. Para los efectos de esta investigación, sólo se expondrá la función específica de la zona de peligro 1 (Valparaíso).

$$Y_1 = 39,9622 - 0,6125X_1 - 0,7252X_2 + 0,7459X_3 + 25,7198X_4 \quad (4)$$

Donde Y_1 es el índice específico para la zona de peligro 1 y las variables independientes corresponden con las definiciones entregadas para (3). Nótese que Y_1 no contempla X_5 (factor de sequía); esto es porque las correlaciones mostraron un mayor nivel de significancia al eliminar el factor de sequía para el caso de las zonas 1 y 2.

También se deben considerar distintos rangos para el caso específico:

Categorías de riesgo	Rango de valores de índice
Nulo	0-30
Bajo	31-50
Medio	51-65
Alto	66-80
Extremo	81-100

Tabla 3: Categorías de rangos de índices de riesgo de G. Julio (zona de peligro 1)

Fuente: [Julio, 1990]

2.6. RISCO DO FOGO

Desde mediados de la década de los 80, el Instituto Nacional de Investigación Espacial brasileño (INPE por sus siglas en portugués) desarrolla un sistema de detección de incendios basados en los datos de la banda óptica-térmica de 3.7 a 4µm de imágenes satelitales [Sismanoglu y Setzer, 2004]. En 1998 se idea un modelo de riesgo de incendios preliminar utilizando datos históricos de precipitación de los últimos 90 días con distintos pesos para

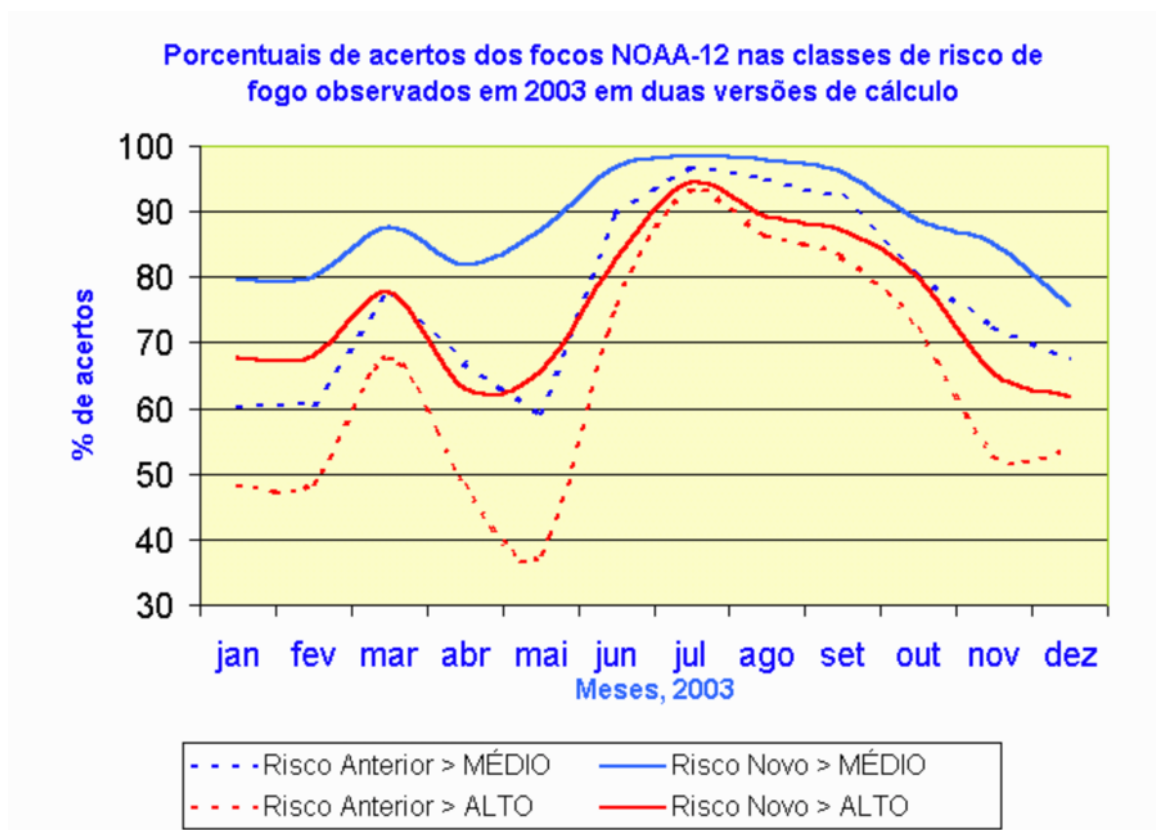


Figura 6: Mejora porcentual del riesgo de incendio revisado (en rojo) con respecto al preliminar (en azul). El gráfico representa el porcentaje resultados, riesgo de incendio sobre alto/medio, en períodos donde se detectaron focos

Fuente: [Sismanoglu y Setzer, 2004]

el período de ocurrencia, el tipo de vegetación (de entre 5 posibles), temperatura máxima y humedad relativa observadas a las 18:00h, por último, la existencia de focos de calor obtenidos mediante análisis satelital [Sismanoglu *et al.*, 2002]. Luego de esta primera versión, que arrojó resultados aceptables variando su efectividad en distintas temporadas se realizan mejoras (ver Figura 6) para el 2002 a partir de relaciones empíricas entre la ocurrencia de focos de incendio detectados por satélite y parámetros meteorológicos [Sismanoglu *et al.*, 2002].

Para el propósito de esta investigación, se analiza la décima versión del cálculo de riesgo de incendios del INPE [Setzer *et al.*, 2016]. El principio del riesgo de incendios (RF por sus siglas en portugués), consiste en que mientras más días seguidos hay sin lluvia en un lugar, mayor es el riesgo de ignición de su vegetación. Adicionalmente son incluidos en el cálculo los efectos del tipo de vegetación (ver Tabla 4) y el ciclo natural de su defoliación, la temperatura máxima y humedad relativa del aire mínima diaria, así como la presencia de fuego en la zona de interés.

El RF se ve afectado principalmente por el concepto de “días de sequía” (desde ahora PSE), que corresponde al número de días seguidos sin precipitaciones durante los últimos 120 días

Clases de vegetación según IGBP	Constante "A" asociada
Water	-x-
Evergreen Needleleaf forest	2.0
Evergreen Broadleaf forest*	1.5
Deciduous Needleleaf forest*	2.0
Deciduous Broadleaf forest*	1.72
Mixed forest	2.0
Closed shrublands	2.4
Open shrublands	3.0
Woody savannas*	2.4
Savannas*	3.0
Grasslands*	6.0
Permanent wetlands	1.5
Croplands	4.0
Urban and built-up	-x-
Cropland/Natural vegetation mosaic*	4.0
Snow and ice	-x-
Barren or sparsely vegetated	-x-

Tabla 4: Clases de vegetación según el International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) con los factores numéricos (A) asociados influyentes en el modelo para calcular RF. El valor -x- indica que no existe una constante A atribuida a ese tipo de vegetación

Fuente: [Setzer *et al.*, 2016]

en relación con los datos de interés. En otras palabras, dado que, en el período analizado se presentan precipitaciones, el PSE calcula un número hipotético que representa la cantidad de días consecutivos sin lluvia. Setzer advierte que hay que considerar que el RF está diseñado para indicar la susceptibilidad de ignición dado el estado de la vegetación desde el punto de vista puramente meteorológico, ya que en la gran mayoría de los casos los incendios son producto humano. Además, la velocidad del viento no se incluye en el cálculo del RF, pues el factor incluye principalmente en la propagación del fuego y no en su ignición. Por último, cabe destacar que, para el caso de múltiples fuentes de información meteorológica, los datos de entrada son interpolados para utilizar en el modelo.

Para el cálculo del RF, se necesita primero calcular una versión básica del riesgo, denominado Rb (ver comportamiento en Figura 7) como se muestra a continuación:

$$Rb_7 = \frac{0,9 \left[1 + \sin \left((A \cdot PSE - 90) \frac{3,14}{180} \right) \right]}{2} \quad (5)$$

Notar que Rb está construida considerando sólo las 7 clasificaciones de vegetación marcadas con un (*) en la Tabla 4. Entonces, la constante A en la ecuación (5) sólo puede tomar uno

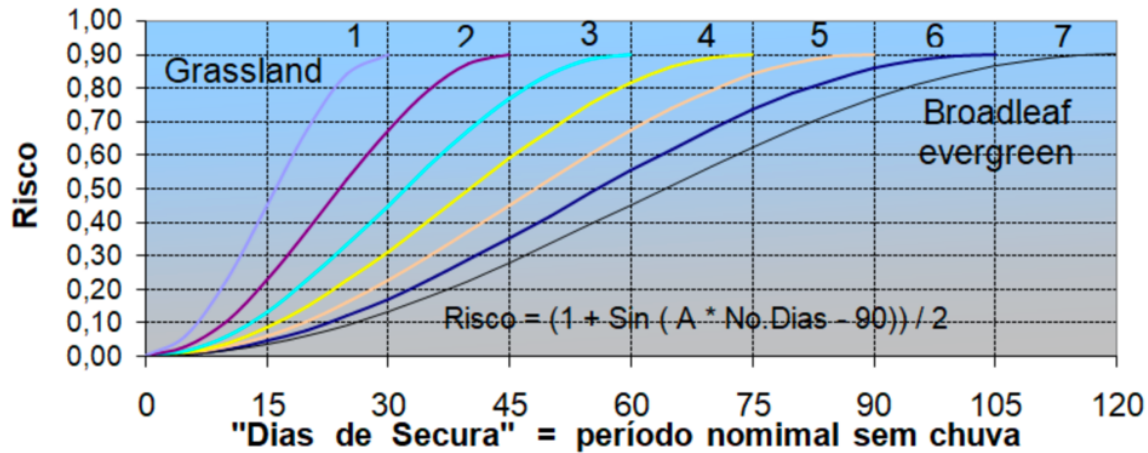


Figura 7: Evolución temporal de Rb_7 respecto a la cantidad de días de sequía (PSE), interesa particularmente el caso para $A=1.5$ *Broadleaf evergreen* como se verá más adelante

Fuente: [Setzer *et al.*, 2016]

de 7 valores dependiendo de la zona de interés analizada.

Por último, el valor de PSE es la multiplicación de factores empíricos de precipitación de 11 períodos diferentes, que a su vez son calculados por una función exponencial específica para cada intervalo. Los propósitos de los factores de precipitación son cuantificar RF en función del volumen de precipitación en eventos próximos al momento de interés y disminuir el efecto de la precipitación en el RF a medida que la precipitación sea más lejana en el pasado. A su vez, cada factor de precipitación es calculado en función de la precipitación acumulada en un intervalo determinado de tiempo. El resultado es que una precipitación de unos pocos milímetros en el día anterior del cálculo tiene efecto reductor en la sequía mucho mayor a que si hubiera ocurrido hace unas semanas. Para mayor detalle sobre el cálculo de los factores de precipitación referirse a [Setzer *et al.*, 2016].

Luego se ajusta el riesgo de incendio para usar la humedad relativa del aire de la localidad en análisis, ya que el riesgo aumenta inversamente respecto a la humedad. Abajo del 40 % el riesgo aumenta y disminuye para valores encima de esa referencia. Se usa el valor diario captado a las 18:00UTC, horario en el cual se asume humedad mínima. Además, se utiliza un ajuste lineal (6) en vez del valor directamente.

$$FU = 0,006H_{\min} + 1,3 \quad (6)$$

También se ajusta el riesgo de incendio para usar un ajuste lineal (7) de la temperatura del aire máxima diaria que es a su vez, proporcional al riesgo; este aumenta para temperaturas sobre 30°C y disminuye en caso contrario. De la misma manera, se usan temperaturas captadas a las 18:00UTC asumiendo valores máximos.

$$FT = 0,02T_{\text{máx}} + 0,4 \quad (7)$$

Finalmente, se define RF como:

$$RF = Rb_7 \cdot FT \cdot FU \quad (8)$$

Riesgo	Valores de RF
Mínimo	$RF < 0.15$
Bajo	$0.15 < RF \leq 0.40$
Medio	$0.40 < RF \leq 0.7$
Alto	$0.7 < RF \leq 0.95$
Crítico	$RF > 0.95$

Tabla 5: Clasificación discreta asignada a 5 rangos de RF

Fuente: [Setzer *et al.*, 2016]

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Debido a que esta área de estudio ha sido ampliamente abordada durante muchos años de investigación, el acercamiento que se intentará en esta instancia es el de basarse fuertemente en una combinación conveniente de conocimientos extraídos de dichas investigaciones.

3.1. FUENTE DE DATOS

3.1.1. DATOS METEOROLÓGICOS

Para poder hacer un análisis localizado, acotado y contemporáneo se utilizarán como fuentes de datos variables meteorológicas obtenidas para la V región de Valparaíso de Chile. Como parte del objetivo de esta investigación es lograr resultados a partir de datos públicamente disponibles se buscan fuentes de información que recopilen datos meteorológicos de la zona. Inicialmente la mayoría de las plataformas presentan datos de pronósticos e información en tiempo real pero no un registro histórico consumible.

Entre las fuentes de datos consideradas se destacan:

- **Agroclima**²: se trata de una red compuesta por varias instituciones/empresas que aportan con sus estaciones meteorológicas. La red es administrada por la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF).

Se *descarta* debido a que la estación meteorológica más cercana a Valparaíso se encuentra en Casablanca.

- **Ceazamet**³: es la plataforma de meteorología del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).

Se *descarta* debido a que las estaciones se concentran en zonas del norte de Chile (como es de esperarse). Además tiene reportes históricos manuales, no hay una manera de extraer datos históricos crudos.

- **Agromet**⁴: es la sección de agrometeorología del Instituto de Investigación Agropecuaria.

Se *descarta* porque (a pesar de tener un mecanismo para descargar los datos históricos), la estación meteorológica más cercana a Valparaíso estaba localizada en La Cruz.

²<http://www.agroclima.cl/ServicioEspecial.aspx>

³<http://www.ceazamet.cl>

⁴<http://agromet.inia.cl/estaciones.php>

- **DMC⁵**: es la Dirección Meteorológica de Chile de la Dirección de Aeronáutica Civil.

Como se puede notar, todas las fuentes exceptuando la DMC fueron descartadas. Esta última tiene datos cercanos a Valparaíso correspondientes a la estación del aeródromo de Rodelillo (ver Figura 8). Además, la plataforma ofrece diversas maneras de recuperar los datos históricos.

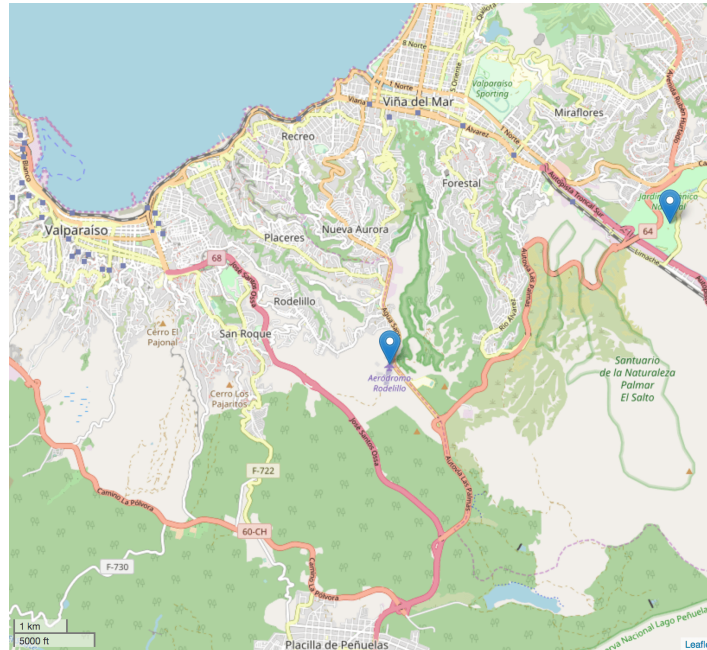


Figura 8: Ubicación estación meteorológica utilizada para extracción de datos.

Fuente: DMC.

Finalmente se usa *web scrapping* para obtener los datos desde la plataforma y almacenarlos en una instancia local de *MongoDB*. A continuación, se ejecuta un *script* hecho en *Python* (*merge-wildfires.py* disponible en <https://github.com/rcastill/recursos-memoria>) para combinar los datos de los distintos sensores (humedad, precipitación, temperatura, viento) por hora. De esta manera, el *schema* de cada documento presenta los siguientes campos:

```
{
  _id: <id documento>,
  ts: <timestamp documento>,
  dev: <id estación>,
  hum: <% humedad>,
  hum_ts: <timestamp humedad>,
  prc: <mm precipitación>,
```

⁵<https://climatologia.meteochile.gob.cl>

```
prc_ts: <timestamp precipitación>,  
tmp: <°C temperatura>,  
tmp_ts: <timestamp temperatura>,  
wnd: <nudos viento>,  
wnd_ts: <timestamp viento>  
}
```

La base de datos está poblada con un documento por hora entre los años 2013-2017 lo que se traduce en 43 800 documentos en total.

Cabe destacar que no todos los sensores tienen datos por hora, por lo que se agrega el campo que indica el momento en que el dato de cada sensor fue tomado (*hum_ts*, *prc_ts*, *tmp_ts*, *wnd_ts*), si ese momento, es menor al momento (*ts*) asociado al documento en donde están, entonces se trata del valor más actualizado para ese sensor.

3.1.2. DATOS DE OCURRENCIAS DE INCENDIOS

Para obtener los datos de ocurrencia de incendios se genera una solicitud de transparencia en la plataforma web oficial de CONAF⁶. Como resultado se obtiene un archivo EXCEL con 26 473 filas (una por instancia de incendio) y 44 columnas indicando distintas variables asociadas a cada instancia. Para el propósito de esta investigación nos enfocaremos únicamente en las columnas:

- **Latitud y longitud**, detallando la ubicación donde se inició el incendio.
- **Inicio**, que documenta la fecha y hora del inicio del incendio.
- **Duración**, que indica el tiempo (en horas) que duró el incendio. Nótese que no todas las filas tienen esta columna con un valor, por lo que para todas aquellas instancias con este campo vacío, son consideradas como duración de 1 hora.
- **Causa**, que describe la causa por la que el incendio fue producido. Cabe destacar que las posibles causas (el subconjunto de las ocurridas entre 2013-2017) están categorizadas de la siguiente manera (ver Figura 9):
 1. [1.1.2] Quema ilegal de desechos de cosecha forestal (quema para reforestación) (1 ocurrencia)
 2. [1.1.5] Quema legal de habilitación de terreno forestal (quema para forestación) (1 ocurrencia)
 3. [1.1.19] Chispa maquinaria en faena forestal (skidder tractor vehículo liviano y pesado) (1 ocurrencia)

⁶<http://oirs.conaf.cl/respuesta.php?id=70258327&cod=4d7ac99947>

4. [1.4.1] Uso de fuego para actividades recreativas en áreas no habilitadas (excursionistas paseantes asados) (2 ocurrencias)
5. [1.4.5] Niños jugando con fuego (23 ocurrencias)
6. [1.6.3] Incendio estructural (campamento forestal casa habitación u otras edificaciones) (5 ocurrencias)
7. [1.7.1] Uso de fuego por transeúntes (304 ocurrencias)
8. [1.7.3] Accidente o incendio de vehículo en tránsito (1 ocurrencia)
9. [1.8.1] Quema de basuras desechos vegetales u otros no clasificados (distintos de vertederos o basurales autorizados) (5 ocurrencias)
10. [1.8.2] Quema legal de aserrín o aserrín encendido (1 ocurrencia)
11. [1.8.14] Encendido de vertederos o basurales autorizados (1 ocurrencia)
12. [1.9.3] Corte de cable por caída de tendido eléctrico o postación (2 ocurrencias)
13. [1.9.4] Corte de cable por otro accidente o acción no clasificada (1 ocurrencia)
14. [1.10.5] Soldadura y montaje de estructuras varias (torres de alta tensión oleoductos etc.) (1 ocurrencia)
15. [2.1.1] Pirómano (insano mental que disfruta del fuego) (76 ocurrencias)
16. [2.1.11] Otros intencionales no clasificados (9 ocurrencias)
17. [3.1.1] Caída de rayo (1 ocurrencia)
18. [4.1.1] Desconocida (se investiga pero no es posible establecer la causa origen) (1 ocurrencia)

Zonas de Incendios

La base de datos comprende ocurrencia de incendios (2013-2017) a lo largo de todo el país, pero para el análisis, nos importan los incendios cercanos a la fuente de datos meteorológicos (Aeródromo Rodelillo). Para esto se definen 3 zonas de distinto tamaño (ver Figura 10):

El primero de dos métodos que se verán en profundidad es el propuesto por Guillermo Julio [Julio, 1990] debido a que su aplicación fue pensada específicamente para Chile, convirtiéndolo en un punto de partida lógico.

3.2. ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE JULIO

Se pretende aplicar el cálculo del índice tal como fue planteado por G. Julio [Julio, 1990] originalmente, para lo cual se asumirá que el clima no ha variado significativamente de manera que las regresiones lineales múltiples no sufran una modificación en sus factores. Esto con

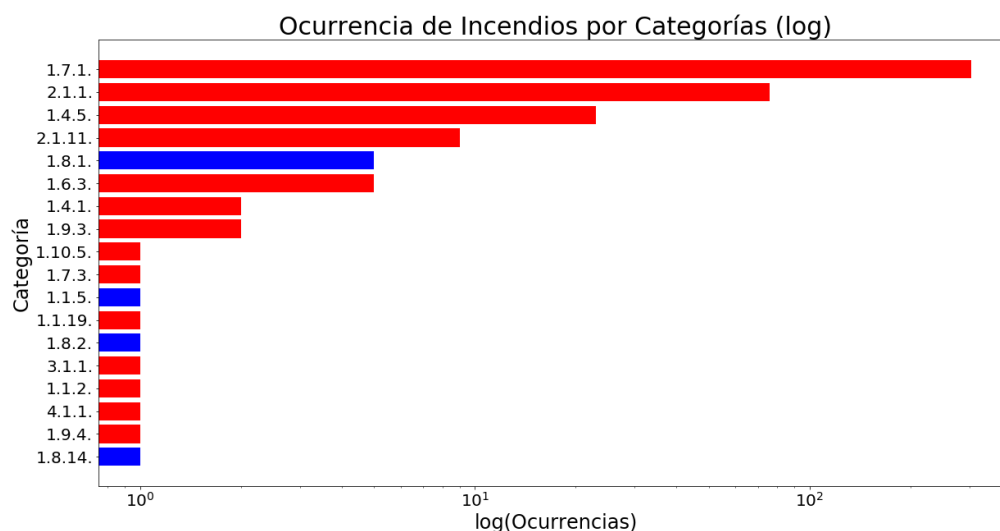


Figura 9: Categoría de incendios ocurridos entre 2013-2017 v/s cantidad de ocurrencias. Las categorías marcadas en azul corresponden a **quemadas controladas**.

Fuente: Elaboración propia

	Delimitación		Cantidad de Incendios
Zona 1	-33.057023,-71.572068	-33.057023,-71.543481	20
	-33.074320,-71.572068	-33.074320,-71.543481	
Zona 2	-33.05189,-71.57894	-33.05189,-71.53276	85
	-33.10914,-71.57894	-33.10914,-71.53276	
Zona 3	-33.01781,-71.67128	-33.01781,-71.50683	436
	-33.12369,-71.67128	-33.12369,-71.50683	

Tabla 6: Definición de límites: 4 coordenadas representando cada esquina de un área (están ordenadas de manera que coincidan visualmente con su posición en el mapa) y cantidad de incendios (2013-2017) ocurridos dentro de dichos límites por cada zona.

Fuente: Elaboración propia

el fin de simplificar el modelamiento y adicionalmente porque no se encuentra registro de cómo fue realizada la correlación en primer lugar (se hace referencia a la investigación vinculada muy brevemente). De la misma manera, se asumirá que el factor de estacionalidad, en otras palabras, el comportamiento humano, no ha sufrido cambios que puedan afectar significativamente la definición de los valores de la Tabla 1. Tomando estas consideraciones, las variables meteorológicas y el factor de estacionalidad no necesitarán un cambio respecto al modelo original. Sin embargo, el factor de sequía, cuya definición se encuentra documentada y especifica que el resultado fue obtenido correlacionando lluvia caída contra ocurrencia de incendios, utilizando datos de (1985-1988), por lo que a continuación se presenta un cálculo actualizado del factor de sequía, para el uso en conjunto con la fórmula general del índice de riesgo, ya que la localizada (V región), no considera el factor de sequía como fue detallado

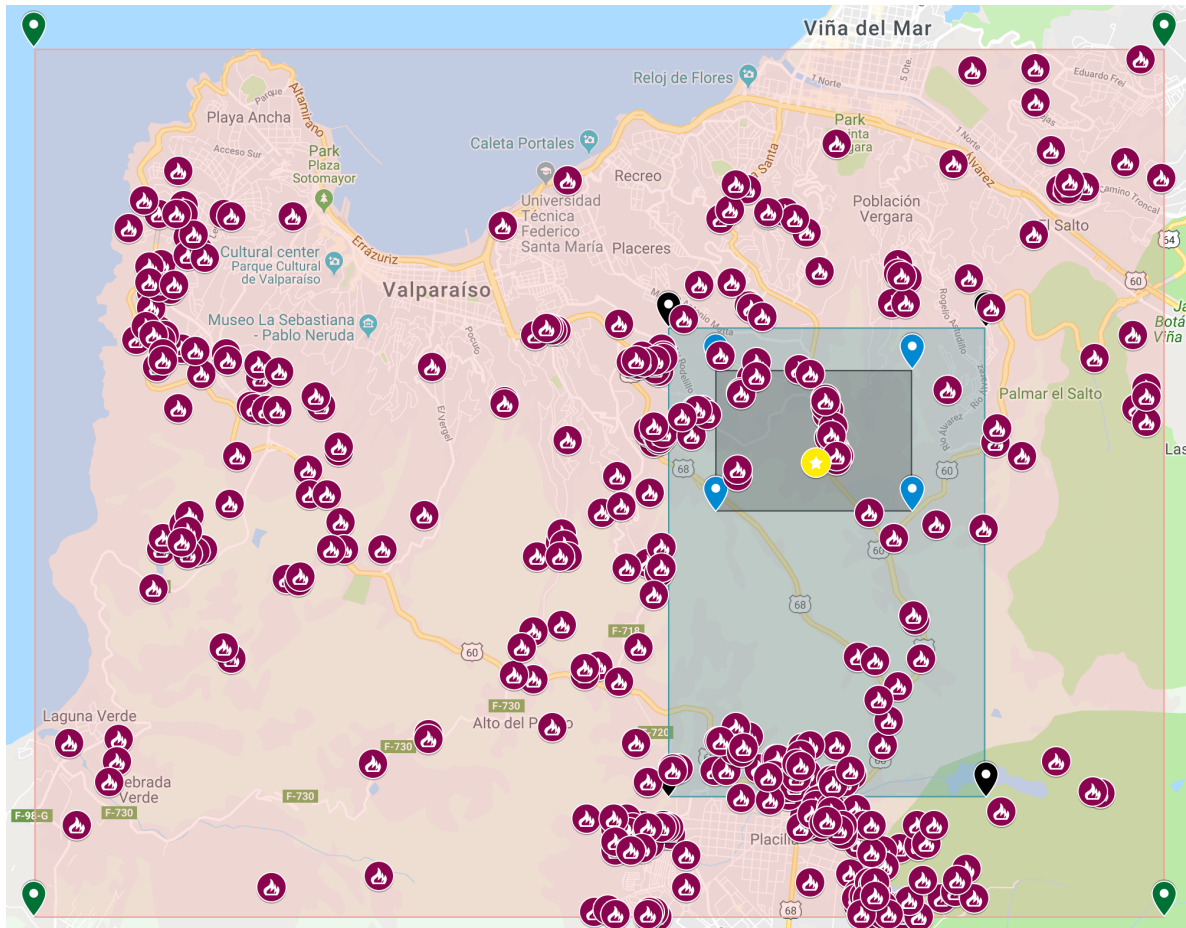


Figura 10: Delimitación de zonas de incendios: Zona 1 (la más pequeña) a Zona 3 (la más grande). El símbolo amarillo con una estrella al centro representa la ubicación de la estación meteorológica del Aeródromo de Rodelillo.

Fuente: Elaboración propia

en el marco conceptual.

3.2.1. FACTOR DE SEQUÍA ACTUALIZADO

Para realizar una correlación con datos actualizados, se usa un registro de ocurrencia de incendios entre los años 2013-2017 (inclusive, ver sección 3.1.2).

Primero se implementa una interpretación directa de lo documentado [Julio, 1990], en otras palabras, se hace una correlación entre la cantidad de días que hay entre el término de una lluvia y el inicio de un incendio, y la cantidad de agua caída en esa lluvia. La hipótesis planteada originalmente es que mientras más tiempo lleve sin llover (se producirá sequía), el ambiente será más propicio para que exista ignición. Lo único que no se ejecuta de la misma manera que en el procedimiento original, es que no se considera el tercer incendio luego de

una lluvia, ya que el razonamiento detrás de esto era:

«eliminar el efecto de las quemas controladas que, por lo general se ejecutan aprovechando condiciones desfavorables de tiempo atmosférico, normalmente en un breve lapso después de la lluvia» [Julio, 1990]

mientras que en este caso de estudio, se cuenta con información que permite discernir si un incendio es catalogable como quema controlada o causa ilegal (ver Figura 9).

Para recalcular una correlación entre lluvia e incendios se deben definir ambos conceptos a partir de los datos disponibles:

- **Lluvia:** Se tienen series de tiempo con datos de precipitación correspondientes a la estación meteorológica. Estos representan la cantidad de agua caída (mm) en un período de tiempo. Se define entonces una *Lluvia* como la cantidad de milímetros caídos ininterrumpidos en un intervalo determinado. Esto implica que una lluvia es la suma (acumulación) de una o más lecturas de precipitación continuas distintas a cero en la estación meteorológica.
- **Incendio:** Se define uno por cada fila en la base de datos de incendio, importando su fecha/hora de inicio y causa (si es quema legal no se considera en el conjunto de datos).

Con esta definición, las variables de la correlación se definen como:

- **Lluvia caída:** Milímetros de agua caída.
- **Días hasta el siguiente incendio:** Cantidad de días entre el término de una lluvia y el inicio de un incendio.

Correlación Lluvia-Incendio: 1ra Iteración

En la primera iteración, cada lluvia es relacionada con el incendio que le sigue en la línea temporal. Esto implica que pueden existir varias lluvias asociadas a un mismo incendio.

Como se puede ver en Figura 11, existe cierta variabilidad en los resultados pero se puede notar una mayor concentración en el centro del gráfico, donde se ven puntos esparcidos sin algún patrón que corrobore la hipótesis de G. Julio. Cabe destacar que hay muchos puntos en la base del gráfico casi formando una constante; esto es interesante porque se puede interpretar que para lluvias poco significativas (con pocos milímetros caídos) no existe gran diferencia en la cantidad de días pasados hasta que ocurra un incendio. Sin embargo el resultado puede tener muchos datos duplicados debido a la posibilidad de existir lluvias asociadas a varios puntos en la correlación. Este acercamiento tiene la ventaja de considerar todas las lluvias.

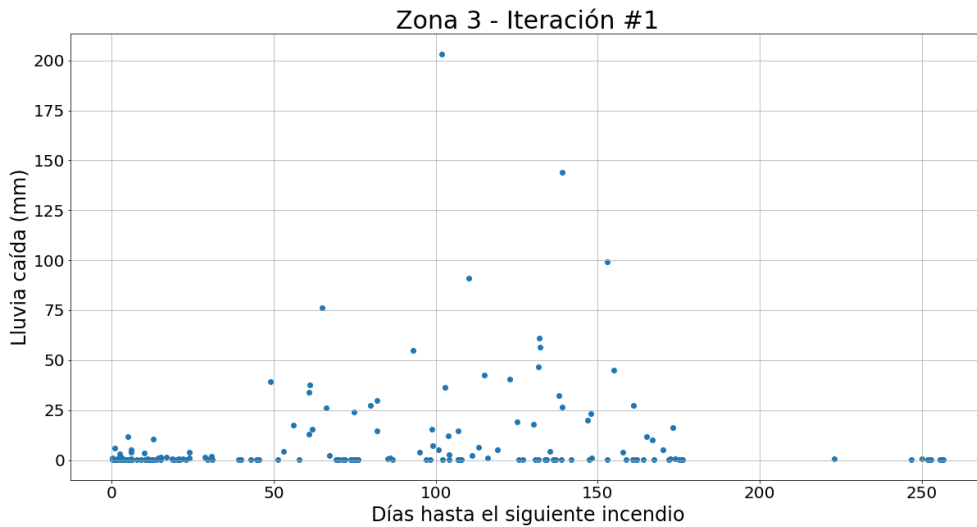


Figura 11: Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 1era Iteración.

Fuente: Elaboración propia

Correlación Lluvia-Incendio: 2da Iteración

En la segunda iteración, cada incendio es relacionado con la lluvia que le antecede en la línea temporal. Esto implica que pueden existir varios incendios asociados a una misma lluvia.

En la Figura 12 es notorio que no se puede llegar a ningún resultado tangible, es más, da la impresión inmediata que este acercamiento no es correcto. Sin embargo, el gráfico permite vislumbrar que existen muchos casos en los datos disponibles, en los que no existen lluvias previas a un incendio, o más bien, entre la lluvia directamente previa al incendio y el incendio mismo, hay uno o más incendios intermedios.

Correlación Lluvia-Incendio: 3ra Iteración

En la tercera y última iteración se consideran una o más lluvias asociadas a un incendio dependiendo de un parámetro de tolerancia T (días); si hay varias lluvias previas a un incendio, T define la cantidad de tiempo máximo entre el final de una lluvia y el comienzo de la otra, si la diferencia temporal entre 2 lluvias consecutivas es menor a T , estas son combinadas y así sucesivamente para todas las lluvias contiguas que cumplan la restricción. Además, una secuencia de una o más lluvias jamás se repetirá por incendio puesto que en esta iteración se eliminan todos los incendios que no sean precedidos por lluvias, en otras palabras, que sean precedidos por otro incendio antes que una lluvia.

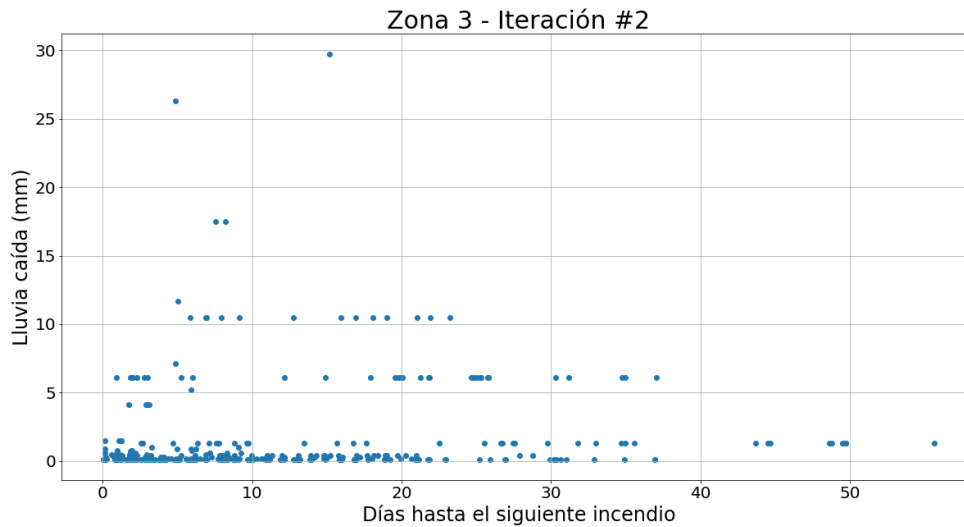


Figura 12: Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 2da Iteración.

Fuente: Elaboración propia

Se presentan las Figuras 13, 14, y 15, con valores T iguales a 0, 3, y 7 respectivamente. La lógica tras agregar el factor T se basa en que una lluvia puede potencialmente (dependiendo de su magnitud) mantener condiciones desfavorables para la ignición por una cantidad de tiempo indeterminado; T se agrega entonces como una medida para entregar mayor información al respecto. De las figuras mencionadas se puede ver una gran reducción en los puntos graficados respecto a la Iteración 1 y 2, esto se debe a que la selección de valores es más estricta. En ninguna instancia se puede encontrar un patrón visual satisfactorio, sin embargo, se confirma lo encontrado en la 1era Iteración; lluvias de baja magnitud no parecen ser realmente relevantes. Si se filtrara las lluvias de modo que el mínimo de agua caída fuera 0.5mm (ver Figura 16), se puede apreciar un comportamiento más esperable, en donde, a mayor magnitud de la lluvia, mayor es el tiempo transcurrido hasta la ocurrencia del incendio. Sin embargo, la cantidad de puntos (relaciones Lluvia-Incendio) se reduce considerablemente, al nivel de no poder generar una función que defina la correlación con un nivel de significancia aceptable y corresponde recordar que son datos transcurridos en el período 2013-2017.

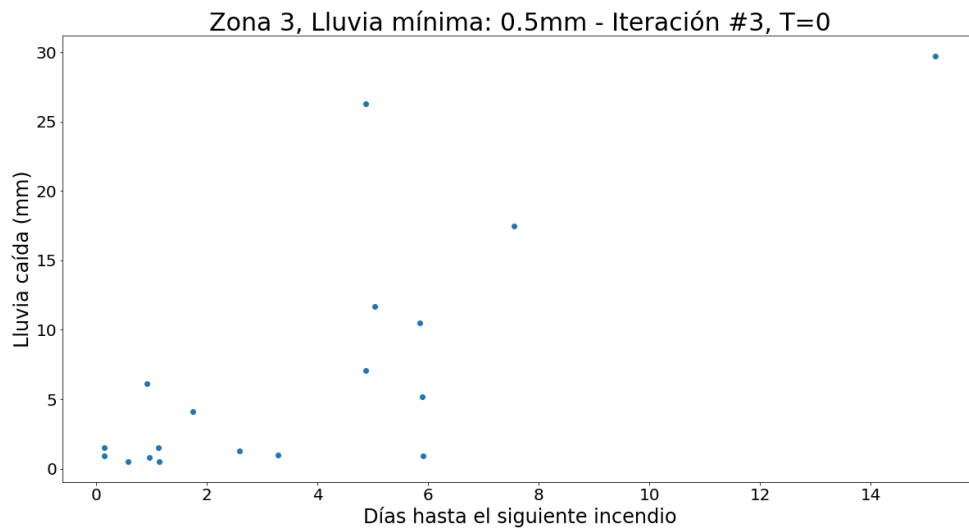


Figura 13: Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con T=0 días, esto es, cada incendio está garantizado a ser asociado con una lluvia.

Fuente: Elaboración propia

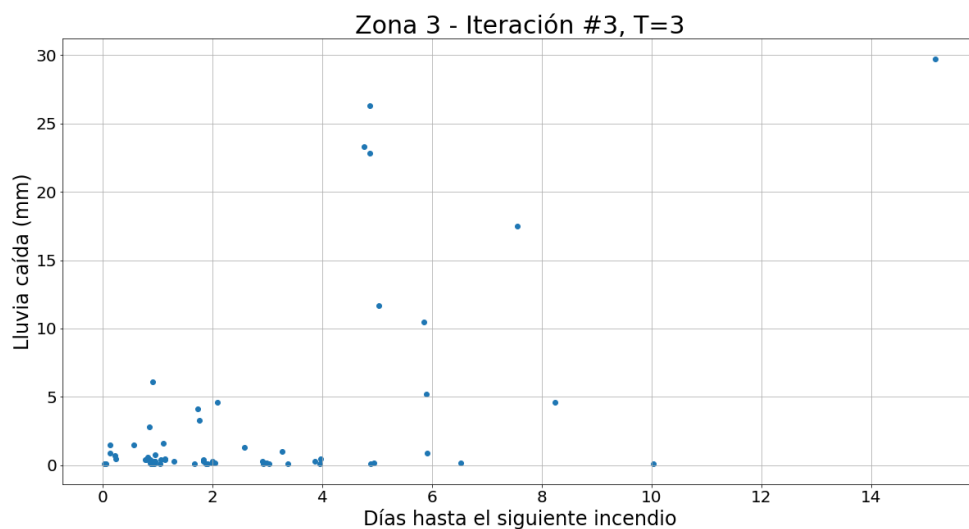


Figura 14: Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con T=3 días.

Fuente: Elaboración propia

Correlación Lluvia-Incendio: Alternativa

Debido a los resultados anteriores, la situación actual es la siguiente:

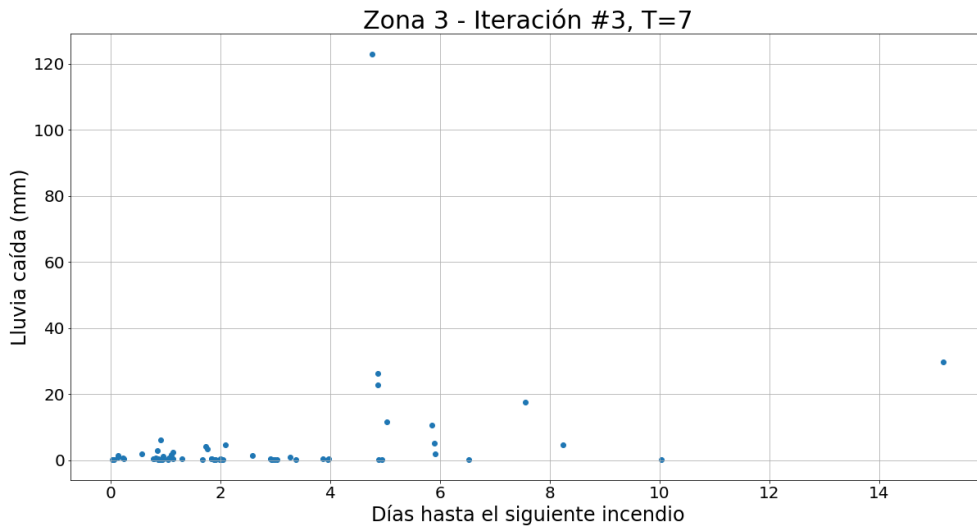


Figura 15: Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con T=7 días.

Fuente: Elaboración propia

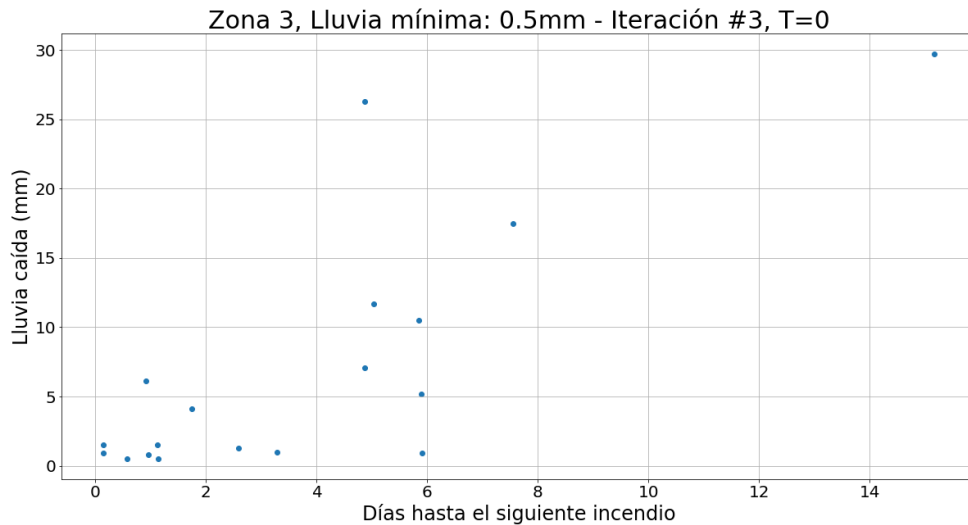


Figura 16: Gráfico de dispersión con variables asociadas según descripción de correlación Lluvia-Incendio 3ra Iteración, con T=0 días y precipitación acumulada mínima de 0.5mm.

Fuente: Elaboración propia

- No se puede usar la correlación original de Julio puesto que los datos están muy desactualizados.
- No se pudo crear un nuevo índice de sequía con las mismas especificaciones de Julio,

principalmente por falta de datos.

- No debe ser despreciado; en otros métodos de la literatura, la sequía, o bien, un factor que relacione las precipitaciones con la facilidad de ignición, es una variable importante en el cálculo de un índice de riesgo.

Lo que se propone entonces, a modo de experimentación, es adaptar un factor con el mismo propósito, de otro índice de la literatura y reemplazarlo de manera sencilla en el modelo original de G. Julio, para posteriormente hacer una comparación entre el índice general de Julio, con el factor de sequía original, con el reemplazado y el índice específico de Julio para la zona 1 (que no incluye el factor de sequía).

Entre los índices estudiados, el segundo caso de estudio, es *Risco do Fogo* (RDF desde ahora), el cual posee en su definición un índice de sequía (PSE), definido justamente como la susceptibilidad de ignición en función de la cantidad de agua caída en días previos al momento analizado. Es el factor que más influencia el cálculo del RDF como se ve en la Figura 7. Tiene además la ventaja de ser el índice diseñado más cercano geográficamente a Chile, considerando la biosfera de América del Sur [Setzer *et al.*, 2016].

Por esta razón se decide usar una adaptación sencilla de PSE para hacer el reemplazo del índice de sequía de G. Julio en su fórmula general (3). El factor de sequía de Julio (desde ahora S) (2) representa precipitación acumulada (mm) en función de los días transcurridos desde el término de una lluvia (d), mientras que el PSE representa los días de sequía (d) en función de la precipitación acumulada (mm). Entonces, se podría adaptar un valor de PSE de modo que al evaluarlo en S , el resultado se encuentre en el rango propuesto por Julio; entre 0.5mm y 70mm. Para lograrlo, basta con generar una función lineal $F(PSE)$ (9) que resulte en un número tal que al ser evaluado en S , el valor se encuentre dentro del rango.

$$F(PSE) = \frac{f}{PSE_{\max}} PSE; S(F(PSE_{\max})) = 0,5 \text{ y } S(F(PSE_{\min})) = 70 \quad (9)$$

Como se puede notar en (9), la relación es inversa, puesto que a mayor valor de PSE (días de sequía) mayor es el riesgo de ignición, mientras que a mayor valor de S (precipitación acumulada) menor es el riesgo de ignición. De esta manera se establece el método para generar el factor de sequía actualizado.

El resultado es satisfactorio, en la Figura 17 se puede ver una ventana de tiempo entre mayo 28, 2013 y junio 4, 2013 donde se muestran los índices de riesgo de Julio utilizando respectivamente, su factor de sequía original y el basado en el PSE. También se muestra la precipitación (mm) para poder apreciar como varía el comportamiento de los índices en función de esta última. El gráfico demuestra un comportamiento muy similar, sin embargo, los valores obtenidos utilizando PSE, tienden a ser más bajos, porque reaccionan exponencialmente respecto a la precipitación.

Índices de Julio y Precipitación en el Tiempo

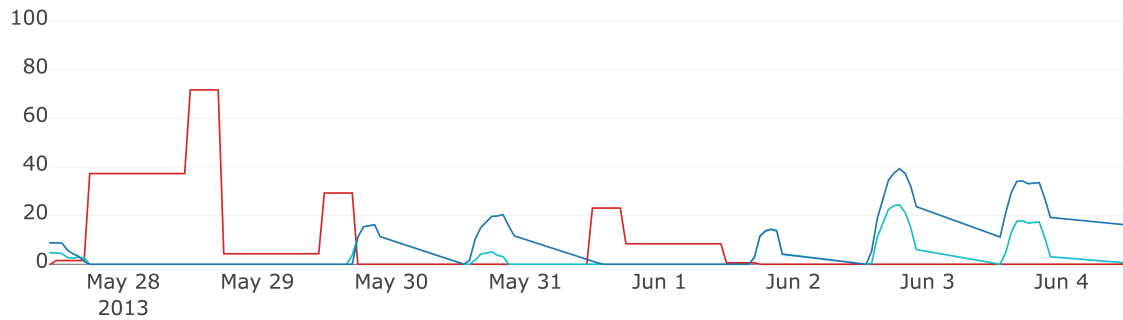


Figura 17: Series de tiempo comparando precipitación (mm, en rojo), Índice de Julio con factor de sequía original (% , en azul oscuro) e Índice de Julio con factor de sequía basado en PSE (% , en azul claro). Muestra desde mayo 28, 2013 hasta junio 4, 2013.

Fuente: Elaboración propia

Más adelante en las figuras 18 y 19 se muestra el cálculo del índice de julio desde 2013 a 2017 empleando el factor de sequía original y el basado en el PSE respectivamente. De la misma manera como se ve en la Figura 17, el patrón es idéntico, asemejándose a una sinusoide en ambos casos; esto se debe al cambio de las estaciones a lo largo del tiempo.

Índice de Julio Original, 2013-2017

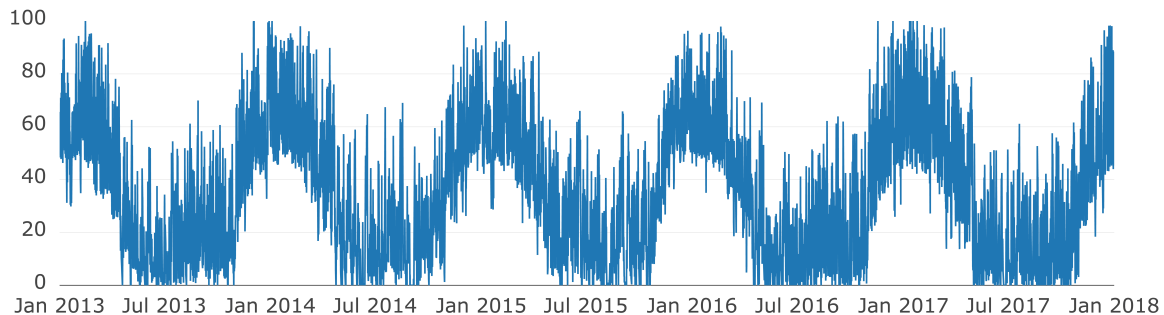


Figura 18: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Índice de Julio con factor de sequía original. Útil para percibir patrón de comportamiento.

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior permite concluir que la adaptación del factor de sequía foráneo, al no alterar disruptivamente los resultados originales, es una opción viable para utilizar datos actualizados en el cálculo de índice de riesgo de incendio de G. Julio.

Índice de Julio Basado en PSE, 2013-2017

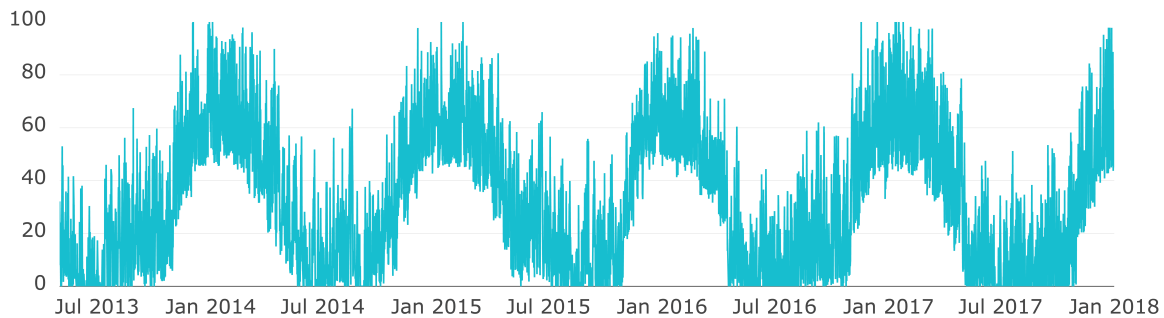


Figura 19: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Índice de Julio con factor de sequía basado en PSE. Útil para percibir patrón de comportamiento. Comparado con la Figura 18, los valores comienzan 4 meses después (mayo) debido a que el PSE necesita precipitaciones acumuladas de hasta 120 días en el pasado.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. ANÁLISIS FÓRMULA GENERAL V/S ESPECÍFICA

Como fue mencionado en la Sección 2.4, G. Julio definió una fórmula para Chile (ver (3)) y una por cada zona definida. Ninguna de las fórmulas específicas, incluida la de interés representando a la zona 1, Valparaíso (4) es afectada por el factor de sequía ya que sólo aplica a la fórmula general.

En la Figura 20, se muestra un caso análogo a la Figura 17, en donde se compara la fórmula general (basada en PSE) contra la específica. En detalle se ve que se asemejan en comportamiento, sin embargo, la específica es más errática y sensible con el cambio de las variables.

Más aún, en la Figura 21, donde se encuentra un barrido del cálculo de la fórmula específica entre 2013-2017, se puede notar que lo explicado en el párrafo anterior se manifestó en escapar significativamente de los límites. Lo que deja como conclusión que la mejor opción a tomar en el caso de estudio, son los resultados de la fórmula general de G. Julio, con la integración del factor de sequía actualizado basado en el PSE.

A continuación, el segundo y último método que se verá en profundidad es el Risco do Fogo (RDF), que es la alternativa brasileña basado fuertemente en los días de sequía (PSE) incluidos en 3.2.

Índices de Julio (Zona 1) y Precipitación en el Tiempo

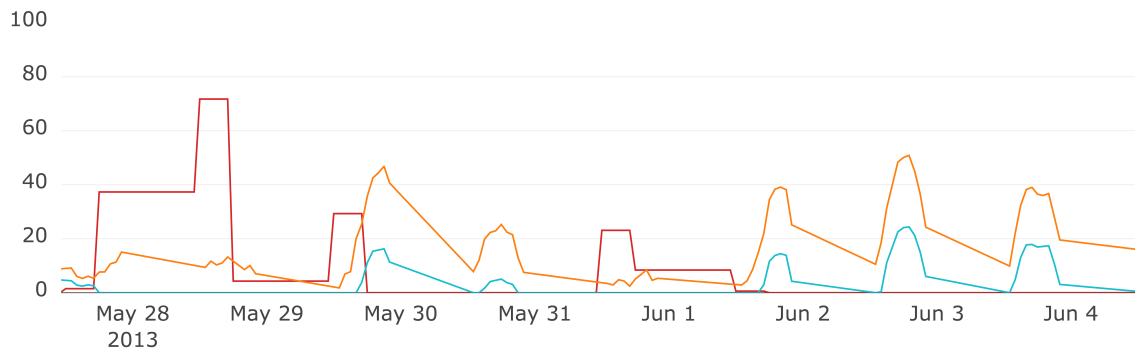


Figura 20: Series de tiempo comparando precipitación (mm, en rojo), Índice de Julio general con factor de sequía basado en PSE (% , en azul claro) e Índice de Julio específico zona 1 (% , en naranja). Muestra desde mayo 28, 2013 hasta junio 4, 2013.

Fuente: Elaboración propia

Índice de Julio Zona 1, 2013-2017

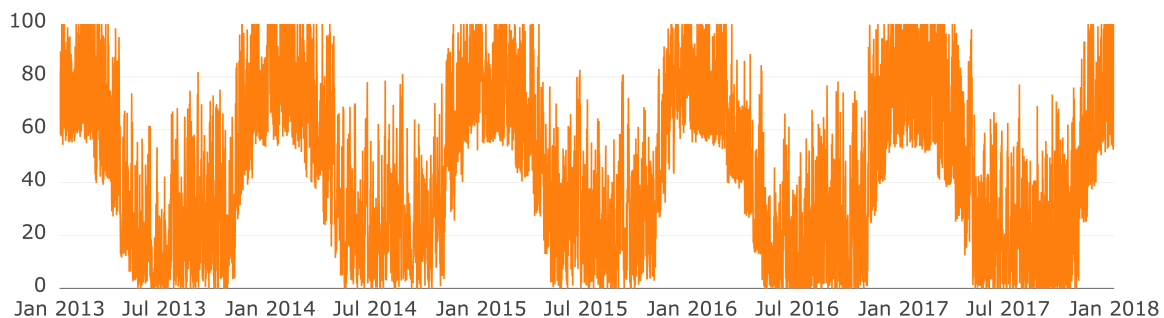


Figura 21: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Índice de Julio específico zona 1. Útil para percibir patrón de comportamiento. La forma es nuevamente semejante, pero esta instancia genera valores fuera de límite con los mismos datos de entrada, lo que sugiere que la fórmula general es de mayor utilidad para este caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia

3.3. ANÁLISIS DEL RIESGO DE FOGO

Como una alternativa más reciente, se propone trabajar con la revisión de 2016 del RDF [Setzer *et al.*, 2016]. El objetivo es poder comparar directamente con el índice de Julio, por lo que se ejecuta el cálculo con los mismos valores de variables meteorológicas. Al igual que en el caso del índice de Julio, parte de las variables de entrada, se tratan de un valor resumido de datos diarios, ya sea el mínimo, máximo o suma. Uno de los valores entregados en esta investigación es que se trabaja con datos horarios (no diarios). Para que no se trate

de un cálculo sobre el valor instantáneo, por cada hora en la que se calcula el índice, se hace un resumen de las últimas 24 horas hasta este momento. El resultado es que se tiene mayor resolución en los índices calculados.

La Figura 22, se visualiza la clasificación de la vegetación (ver Tabla 4) utilizando datos satelitales. Un recuadro naranja transparente se dibuja por sobre el área delimitada por la zona de estudio 3 (ver Tabla 6). Esto permite aislar las 2 vegetaciones de interés para el cálculo y análisis del RDF.

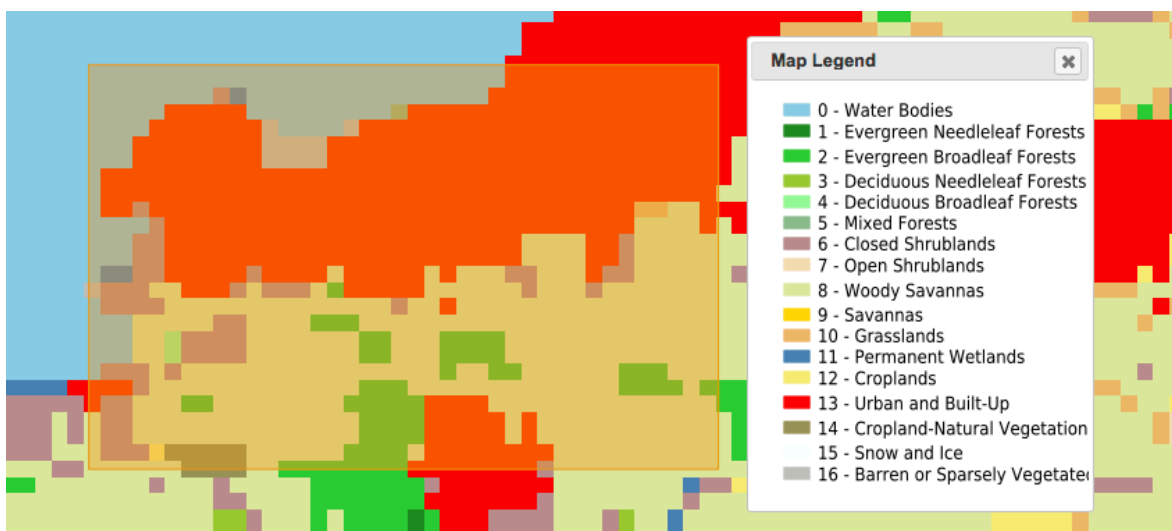


Figura 22: Clasificación de la vegetación en la zona de estudio 3 (ver Tabla 6). Se ve que gran parte de la zona está urbanizada (ciudad de Valparaíso), otra parte está cubierta con vegetación tipo *Evergreen Broadleaf forest* con factor $A = 1,5$ (ver Tabla 4) y una tercera parte de *Woody savannas* con factor $A = 2,4$ (ver Tabla 4).

Fuente: *Spatial Data Access Tool (SDAT)* de la NASA. Misma herramienta utilizada por RDF [Setzer *et al.*, 2016].

En la Figura 23 se ve el cálculo final del RDF realizado sobre todo el período 2013-2017. Al igual que en el índice de Julio, se nota el carácter oscilatorio de los resultados. En el ámbito global, se debe a las características percibidas en distintas épocas del año, desde la cantidad de lluvias registradas y variaciones en la humedad y temperatura media. En el ámbito local (horas en el día), las variaciones se deben al ciclo día/noche. Cabe destacar que se muestran los resultados para ambos tipos de vegetación en la zona.

En la Figura 24 se puede percibir el comportamiento del riesgo básico utilizado en el cálculo final del RDF. Sus valores están definidos por (5), considerando la constante de vegetación $A = 1,5$ y $A = 2,4$ respectivamente. Este factor representa el carácter sinusoidal del índice e integra los valores de precipitación en forma de días de sequía (PSE). Como se puede corroborar en el gráfico, el máximo alcanzado por el riesgo básico es de 90 %.

Finalmente en la Figura 25 se ve en el período de ejemplo (mayo 28 hasta junio 4, 2013), cuál es el comportamiento en esencia de los días de sequía (PSE). El factor disminuye ex-

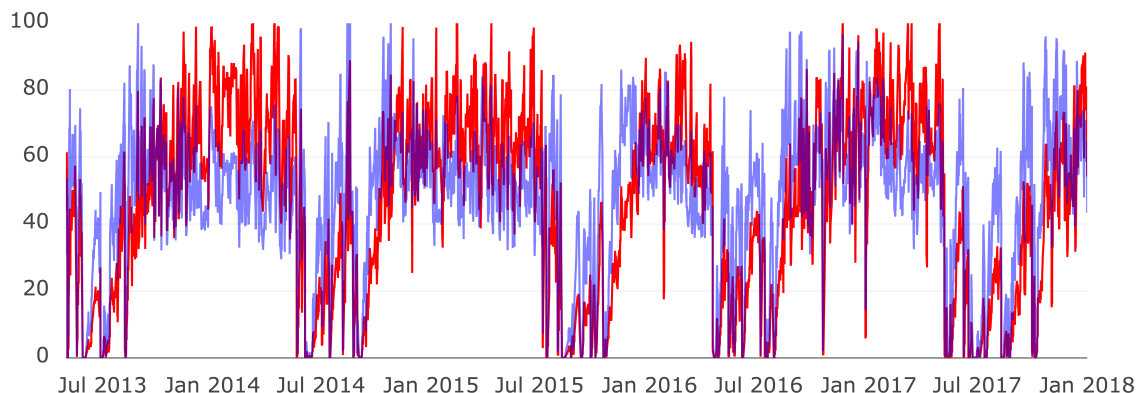
Risco do Fogo, 2013-2017

Figura 23: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Risco do Fogo. RDF con $A = 1,5$ en rojo, RDF con $A = 2,4$ en morado pastel. La intersección de las curvas se ve en morado oscuro. Útil para percibir patrón de comportamiento.

Fuente: Elaboración propia

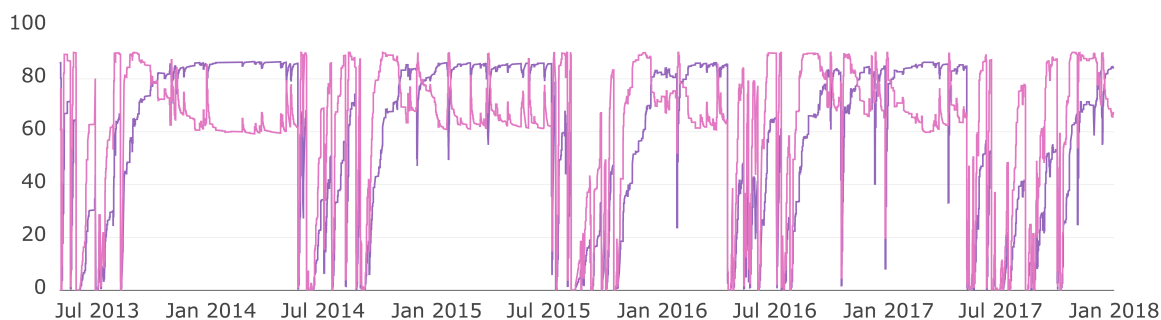
Risco Básico (Rb), 2013-2017

Figura 24: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de Riesgo básico (5). RB con $A = 1,5$ en morado oscuro, RB con $A = 2,4$ en rosado. Útil para percibir patrón de comportamiento. Recordar que esto conforma la base del RDF 23 en conjunto con un factor de temperatura y otro de humedad.

Fuente: Elaboración propia

ponencialmente respecto a la cantidad de agua caída en una precipitación; en el caso del ejemplo se se percibe que al comienzo existía una cantidad considerable de sequía acumulada, pero pronto inicia una lluvia de alta magnitud, lo que restaura el valor del PSE a 0 y por consiguiente, disminuye considerablemente el riesgo de ignición (reflejado en el RDF). Terminando las precipitaciones el valor del PSE empieza a aumentar gradualmente de manera que el resultado final (RDF) aumenta conforme pasen días sin precipitaciones.

Precipitación y PSE en el Tiempo

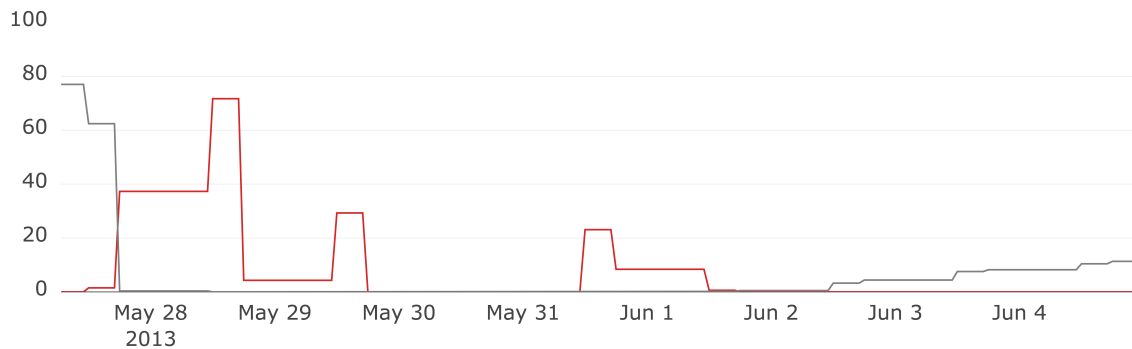


Figura 25: Series de tiempo comparando precipitación (mm, en rojo) y PSE (en gris). Muestra desde mayo 28, 2013 hasta junio 4, 2013.

Fuente: Elaboración propia

3.4. EXPERIMENTACIÓN

Tomando como base ambos exponentes estudiados, se incurre en experimentos utilizando el *framework* pyTorch⁷ para relacionar las variables meteorológicas con ocurrencias de incendios y aportar con un nuevo acercamiento al tópico. La estrategia general es diseñar resultados esperados bajo una combinación específica de condiciones, con el objetivo de representar si un momento específico presenta circunstancias ideales para que se produzca ignición.

3.4.1. 1RA ITERACIÓN

En la primera iteración se prepara un *dataset* conteniendo registros por cada lectura de sensores meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación y velocidad del viento), el resultado del Risco do Fogo para ese momento y datos acordes, tales como precipitación acumulada en la última semana y último mes respectivamente. Adicionalmente se agrega una variable por cada registro indicando si ocurrió un incendio durante la lectura o no. En este caso, se asigna la ocurrencia de un incendio a una única entrada.

Las condiciones son aplicadas por cada registro de la siguiente manera (ver Algoritmo 1):

1. Si existe un incendio; se asigna un riesgo de 100 %.
2. Si el RDF calculado es mayor o igual al 40 %; se asigna un riesgo de 100 %.

⁷<https://pytorch.org/>

Este criterio fue basado inicialmente en un análisis inicial representado en la Figura 26, donde se puede estimar que la mayoría de los incendios ocurridos, generaron un valor de RDF mayor al 40 %. La razón de asignar al 100 % en este caso, es para generar más casos que representen situaciones favorables para la ignición.

3. De lo contrario; el riesgo asignado a una conversión lineal del PSE, de modo que se pueda alcanzar a lo más un 80 %.

El cálculo de el riesgo en este caso es completamente arbitrario, ya que se trata de una experimentación. Sin embargo, la elección del PSE se basa en que durante la investigación se encuentra que los factores de sequía/precipitación, pueden ser explotados como índices de riesgo por sí solos.

$$\text{riesgo}(pse) = 0,8 \frac{pse - PSE_{\min}}{PSE_{\max} - PSE_{\min}} \quad (10)$$

Entrada: Fecha/hora asociada al valor esperado t , RDF rdf en el momento t , Registro de incendios i ocurridos en el momento t , PSE pse en el momento t

Salida: Valor esperado

```

1 si  $len(i) > 0$  entonces
2   | devolver 1.0
3 si no, si  $rdf > 0,4$  entonces
4   | devolver 1.0
5 en otro caso
6   | devolver  $\text{riesgo}(pse)$ 
7 fin
```

Algoritmo 1: Asignación de valor esperado para la 1ra iteración.

Se entrena linealmente un modelo utilizando como variables de entrada:

- x_1 : Mes (1 - 12)
- x_2 : Temperatura (°C)
- x_3 : Humedad (%)
- x_4 : Precipitación (mm)
- x_5 : Precipitación acumulada semanal (mm)
- x_6 : Precipitación acumulada mensual (mm)
- x_7 : Velocidad del viento (kt)

El resultado se puede visualizar en la Figura 27 y está definido por la siguiente regresión múltiple:

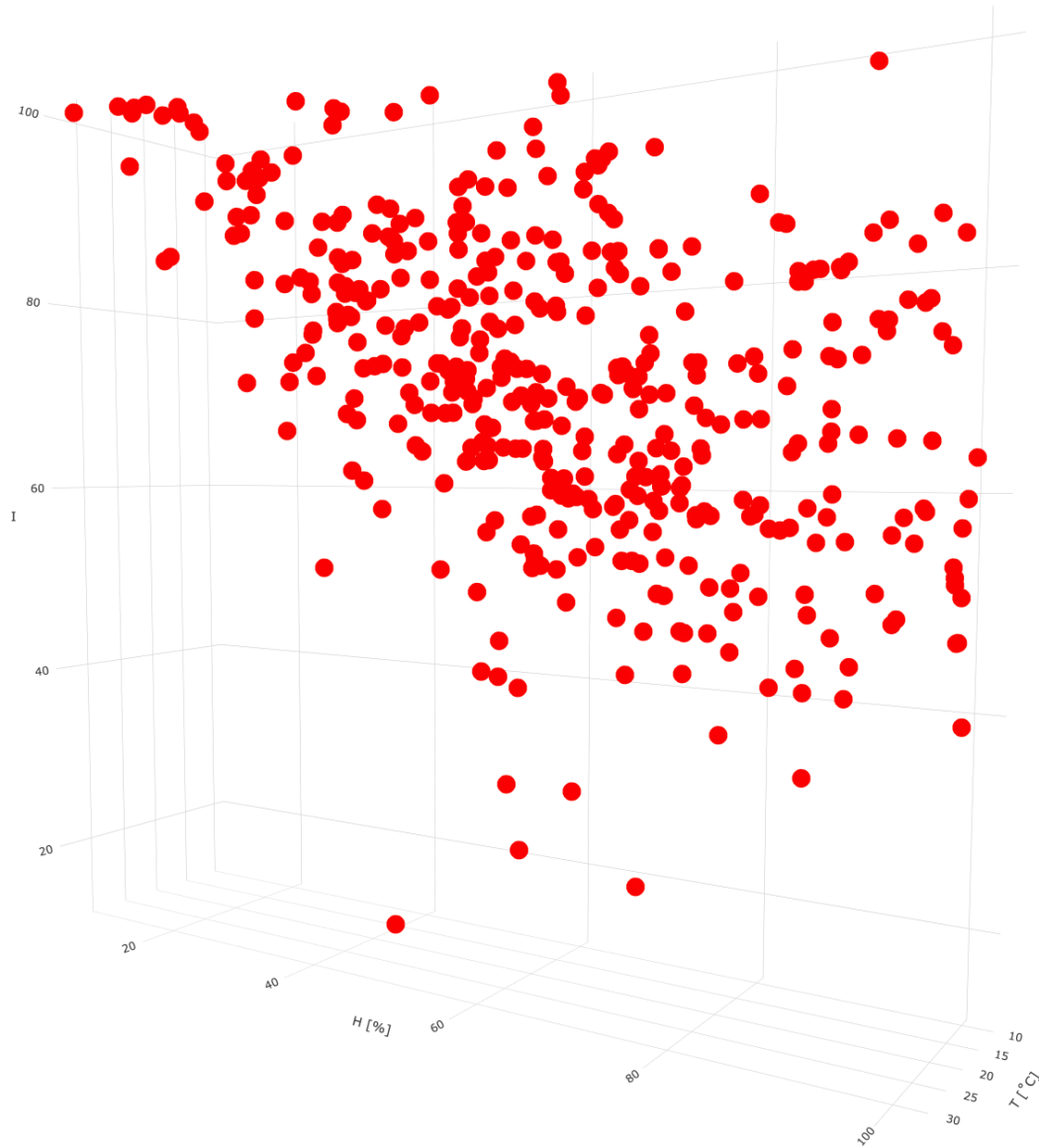


Figura 26: Gráfico de dispersión en 3D. Los ejes comparan humedad relativa (%), con temperatura (°C) y el valor de RDF calculado. Este gráfico muestra sólo instancias donde haya existido un incendio en el período 2013-2017.

Fuente: Elaboración propia

$$\text{riesgo} = 0,7255 - 0,0074x_1 + 0,0478x_2 - 0,0110x_3 - 0,0455x_4 - 0,0545x_5 - 0,2421x_6 - 0,0140x_7 \quad (11)$$

Nótese que las variables de entrada deben estar estandarizadas (STD) al evaluarlas en la función (entrenamiento realizado con valores estandarizados).

Iteración 1, RDF y PSE, 2013-2017

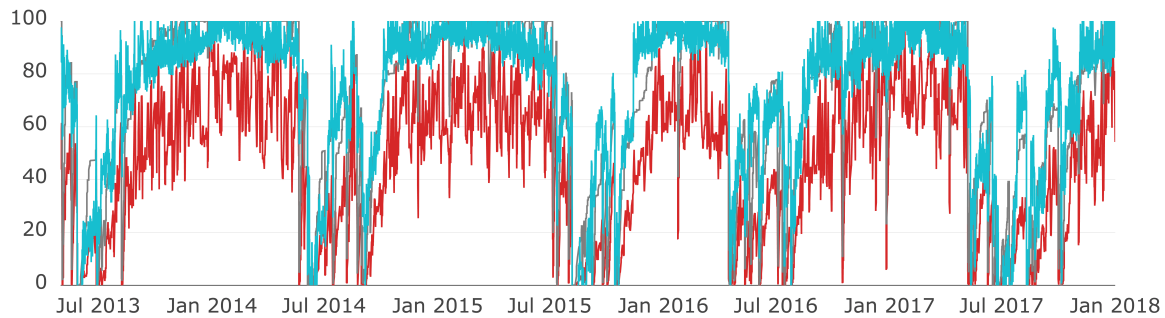


Figura 27: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 1. Índice (% , celeste), RDF (% , rojo), PSE (% , gris). Útil para percibir patrón de comportamiento. Los resultados presentados en la imagen son el resultado del entrenamiento utilizando incendios ocurridos dentro de la zona 1.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. 2DA ITERACIÓN

Para trabajar, tanto en la segunda como tercera iteración, se preparan nuevos *datasets* correspondientes a cada una de las zonas de estudio (ver Tabla 6), donde se combinan datos meteorológicos, los resultados del índice de Julio y RDF en conjunto con ocurrencia de incendios por cada hora registrada, que a su vez incluyen la ubicación, inicio, término y distancia del foco hasta la estación meteorológica. Cabe destacar, que cada registro horario puede estar asociado a varios incendios transcurridos en esa hora, así como también, varios registros pueden tener referencia al mismo incendio, si este se prolonga lo suficiente. Es importante añadir que si el incendio dura menos de 1 hora o bien, no hay datos de la duración del incendio, por defecto es considerado con extensión de 1 hora.

Para simplificar el proceso se mostrará los resultados obtenidos trabajando con los datos de la zona 3. En esta iteración se introducen datos estadísticos que se usarán más adelante.

Análisis de Distribución de Distancias

En la Figura 28 se muestra un gráfico de ocurrencias por distancias. En este caso, el promedio es el valor que se tomará como referencia más adelante.

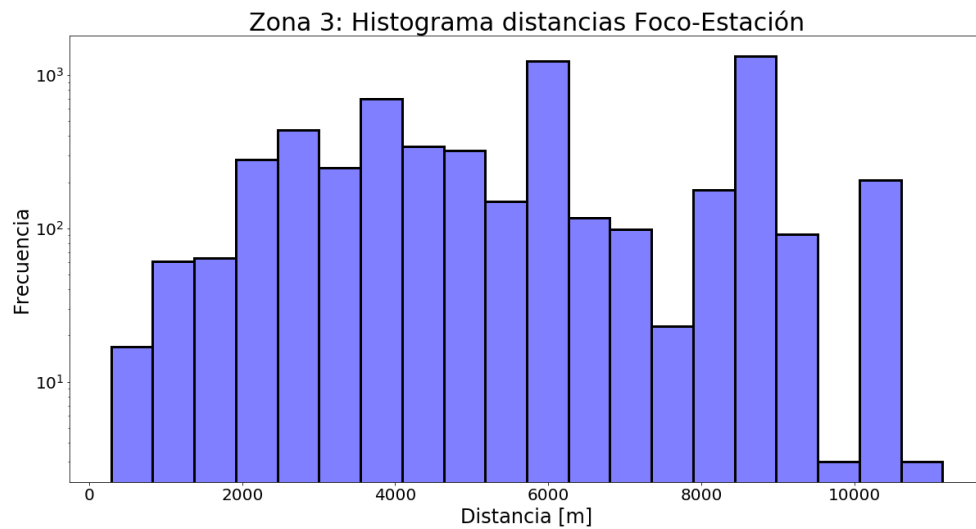


Figura 28: Histograma mostrando ocurrencias de distancias entre el foco de un incendio y la estación meteorológica. El promedio es de 5822.16m.

Análisis de Ocurrencia de Incendios

Cabe destacar que la mayoría de los incendios ocurren en el período de Mayo-Noviembre como se puede ver en la Figura 29.

Incendios Zona 3, 2013-2017

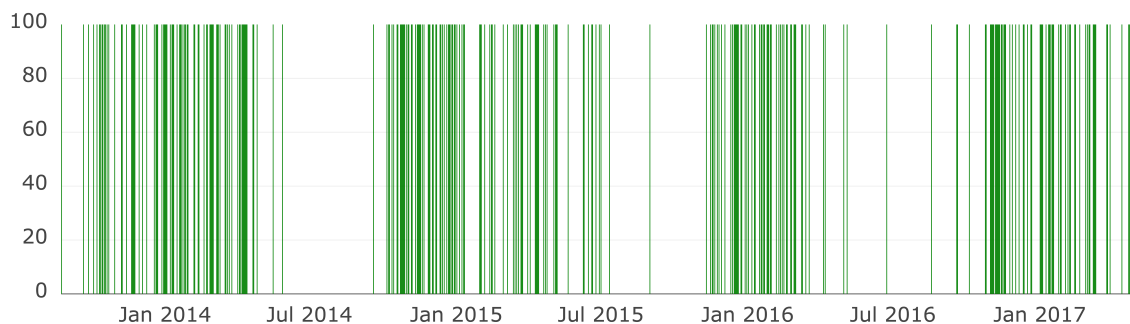


Figura 29: Series de tiempo mostrando las horas de inicio de los incendios registrados entre 2013-2017.

Otro factor a considerar es la cantidad promedio de incendios por registro (que contienen al menos 1 incendio). Como no es práctico trabajar con “fracciones de incendios” por registro, se toma como referencia el resultado de la función techo (ceil) del promedio (ver Figura 30).

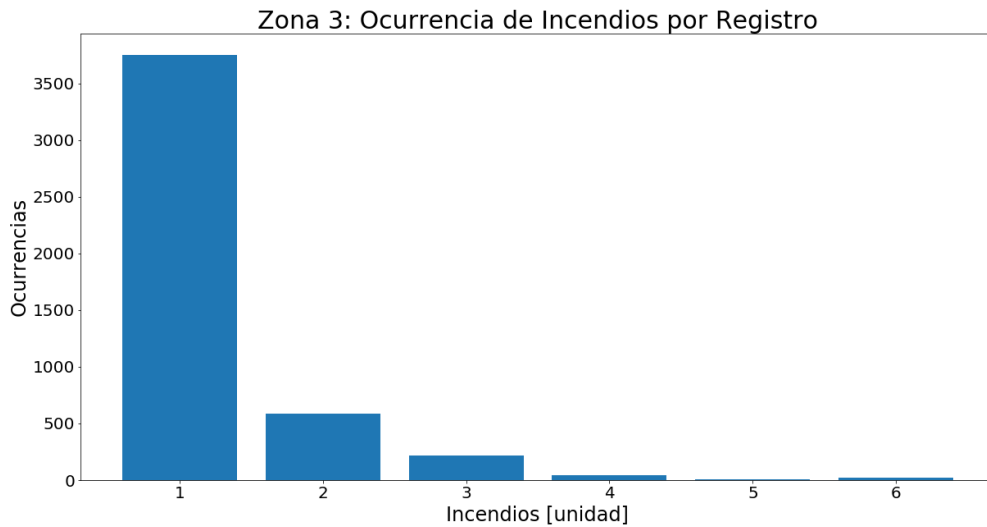


Figura 30: Gráfico de barras mostrando cantidad de incendios por registro. El universo sólo contempla registros que tienen al menos 1 incendio asociado. El ceil(promedio) es 2 (válido también para el subconjunto de quemas ilegales).

Otro de los factores tomados en cuenta es la hora, ya que el análisis permite discernir un intervalo de horas del día en los que una ignición es poco probable. La hipótesis es que durante la noche, las condiciones sean desfavorables para el inicio de un incendio. Los resultados muestran que en efecto existen horarios con menos actividad, pero no necesariamente durante la noche (ver Figura 31). Cabe destacar que además se hace un análisis utilizando sólo incendios ilegales en el cálculo, pero estos sólo representan un 7.15 % del total y no hace una diferencia significativa.

Considerando lo anterior como base, las condiciones son aplicadas por cada registro de la siguiente manera (ver Algoritmo 2):

1. Si la quema más cercana (distancia) es legal; se asigna un riesgo de 0 %.
Los casos en que esto ocurre son muy pocos, por lo que asignar 0 % es razonable.
2. Si se está en horario “nocturno”; se asigna un riesgo de 0 %.
El horario variará dependiendo de la zona estudiada. En este caso (zona 3), el horario utilizado es de 01:00 a 10:00.
3. Si hay más incendios que ceil(promedio) (en este caso, 2); se asigna un riesgo de 100 %.
4. Si la distancia entre el incendio más cercano y la estación es menor que la distancia promedio (en este caso, 5822.16m); se asigna un riesgo de 100 %.
5. Si hay incendios y ninguno de los 2 puntos anteriores se cumple; se asigna un riesgo entre 90 % y 99 % con comportamiento lineal en función de la distancia.

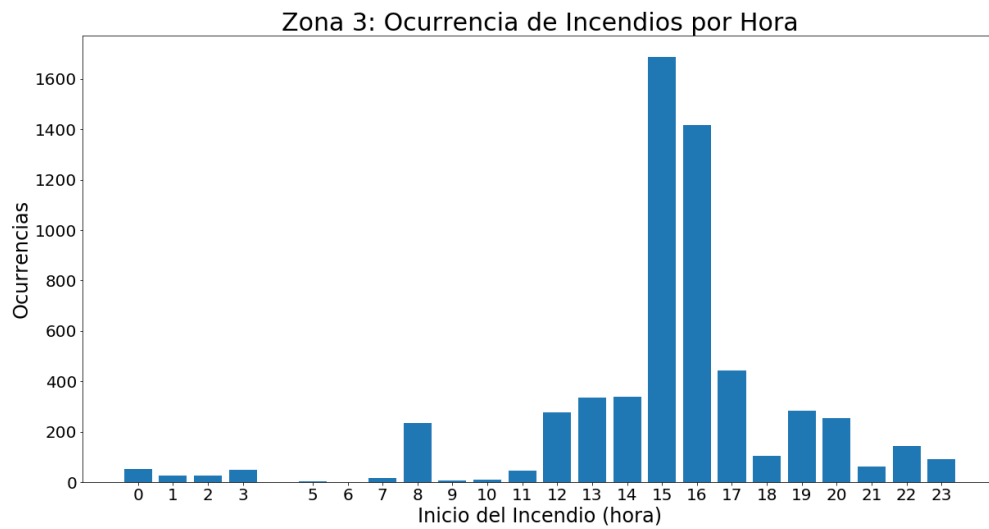


Figura 31: Gráfico de barras mostrando cantidad de incendios por hora. La hora promedio es a las 15:12.

6. Si no hay incendios; se hace una ponderación de los índices de incendio y se asigna el resultado (0 % - 90 %) como riesgo.

$$\text{riesgo} = 0,9(0,8R + 0,2J) \quad (12)$$

Donde R es el valor del RDF y J el valor del índice de Julio.

Entrada: Fecha/hora asociada al valor esperado t , Promedio de incendios por registro $promedioIncendios$, Promedio de distancia de foco de incendio a estación meteorológica $distanciaPromedio$, RDF rdf en momento t , Índice de Riesgo de Julio j en momento t

Salida: Valor esperado

```
1  $maxIlegales \leftarrow ceil(promedioIncendios)$ 
2
3 si  $esLegal(masCercano(i))$  entonces
4 |   devolver 0,0
5 si no, si  $deNoche(t)$  entonces
6 |   devolver 0,0
7 si no, si  $ilegales(i) > maxIlegales$  entonces
8 |   devolver 1,0
9 si no, si  $distancia(masCercano(i)) < distanciaPromedio$  entonces
10 |  devolver 1,0
11 si no, si  $len(ilegales(i)) > 0$  entonces
12 |  devolver  $inverseLinearIndexOverDistance(distancia(masCercano(ilegales(i))))$ 
13 en otro caso
14 |  devolver  $riesgo(rdf, j)$ 
15 fin
```

Algoritmo 2: Asignación de valor esperado para la 2da iteración. Para mayores detalles revisar función `mark()` del archivo “Iteración 2” del repositorio Git <https://github.com/rcastill/recursos-memoria>.

Se entrena linealmente un modelo utilizando como variables de entrada:

- x_1 : Mes (1 - 12)
- x_2 : Temperatura (°C)
- x_3 : Humedad (%)
- x_4 : Precipitación acumulada semanal (mm)
- x_5 : Velocidad del viento (kt)

El resultado se puede visualizar en la Figura 32 y está definido por la siguiente regresión múltiple:

$$riesgo = 0,2503 - 0,0074x_1 + 0,1216x_2 - 0,0433x_3 - 0,0460x_4 + 0,0065x_5 \quad (13)$$

Nótese que las variables de entrada deben estar estandarizadas (STD) al evaluarlas en la función (entrenamiento realizado con valores estandarizados).

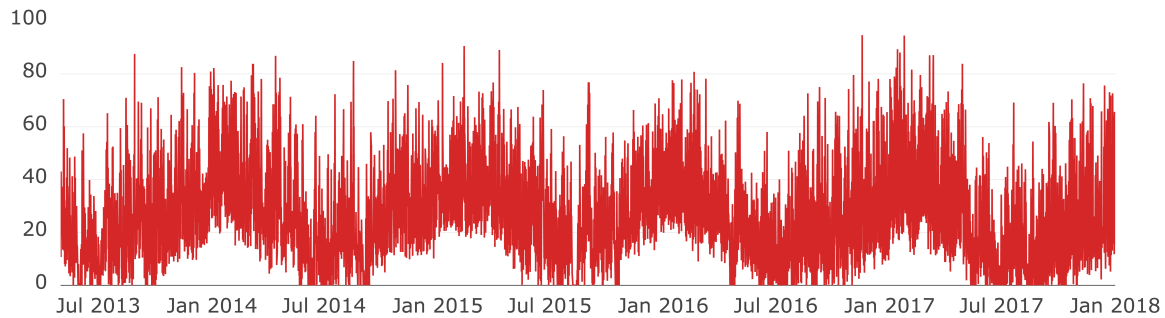
Iteración 2, 2013-2017

Figura 32: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 2 (lineal). Los resultados presentados en la imagen son el resultado del entrenamiento utilizando incendios ocurridos dentro de la zona 3.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se ejecutó una prueba agregando una capa intermedia al entrenamiento. Sin embargo, no se obtuvo resultados satisfactorios como puede visualizarse en la Figura 33.

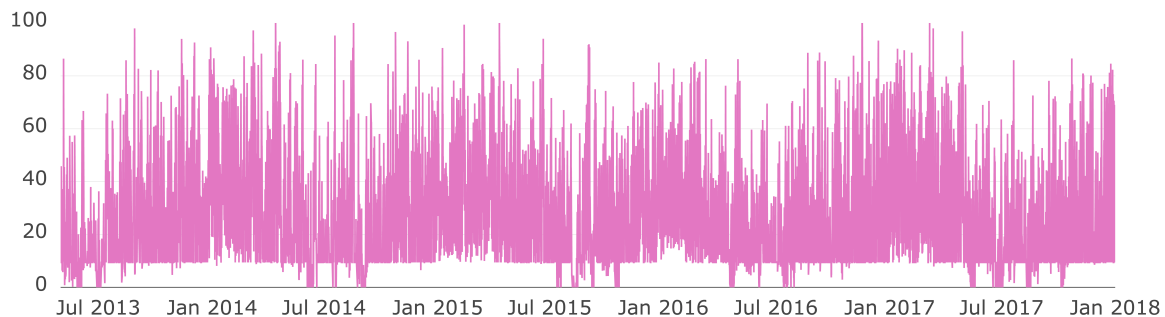
Iteración 2 (capa intermedia), 2013-2017

Figura 33: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 2 (capa intermedia). Los resultados presentados en la imagen son el resultado del entrenamiento utilizando incendios ocurridos dentro de la zona 3.

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. 3RA ITERACIÓN

Como fue mencionado, en esta instancia se utilizan los mismos *datasets* preparados en la segunda iteración. Cabe destacar que en este caso se trabajará con un subconjunto de los datos asociados a la zona 3; solo se usan datos de 2013 a 2016, entre los meses de noviem-

bre y mayo. El objetivo de esta iteración es normalizar la cantidad de valores esperados, de manera que no haya un exceso en ningún extremo. A continuación se introducen análisis adicionales necesarios para el cálculo.

Análisis de Precipitaciones

En la Figura 34 se muestra la distribución de agua caída por lluvia den el período 2013-2017. En particular importa el promedio como valor de referencia para el cálculo.

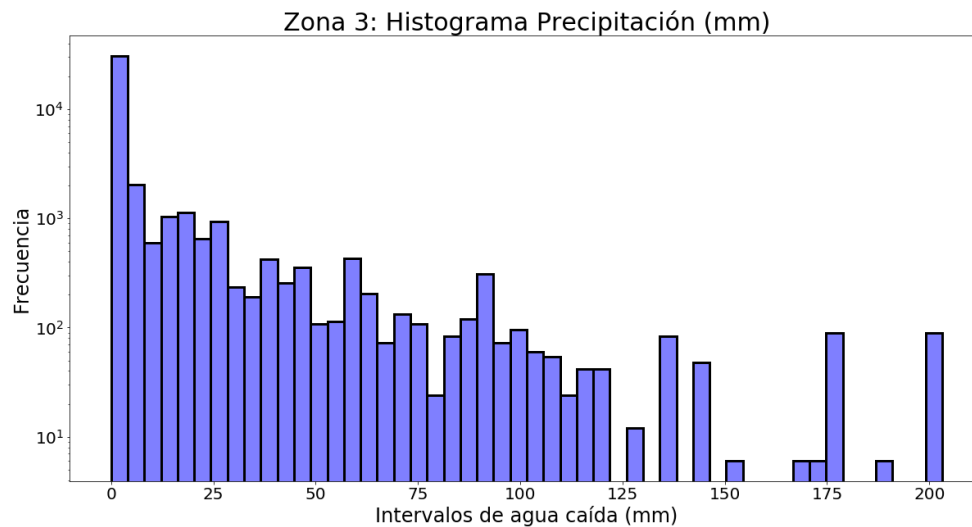


Figura 34: Histograma de cantidad de agua caída en el período 2013-2017. Promedio: 9.24mm.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Asignación de Valores Esperados

En la Figura 35 se puede visualizar los valores esperados asignados usando los criterios de la segunda iteración (utilizando el subconjunto de datos definidos para la tercera iteración en vez de todo el espectro) y se nota que hay una desproporción entre la repetición de los valores extremos. En particular existen muchos registros marcados con ceros. Se propone aplicar *undersampling* y remover suficientes valores marcados con cero hasta que los extremos tengan una cantidad similar de instancias.

Luego de remover secuencialmente el exceso de ceros, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 36.

Considerando el análisis de precipitaciones se agrega un nuevo conjunto de condiciones para determinar el valor esperado del índice por cada registro (ver Algoritmo 3):

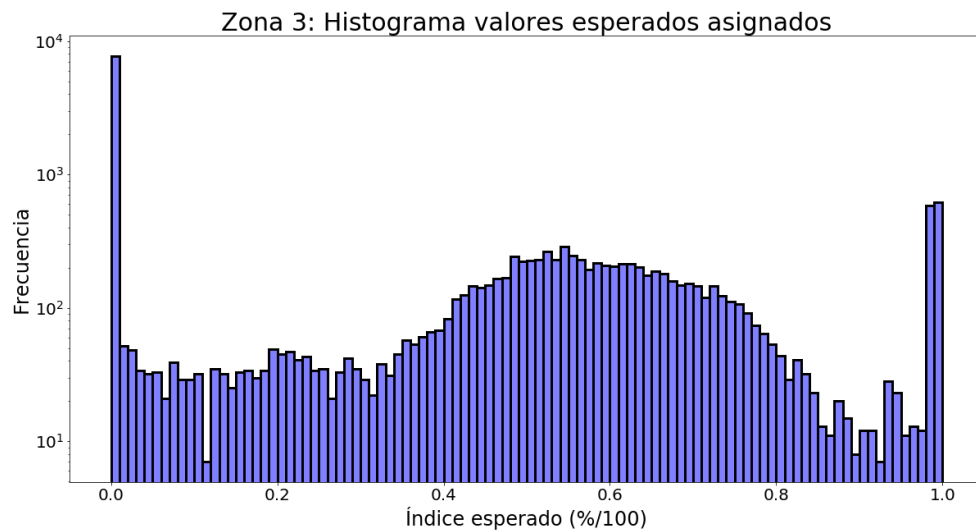


Figura 35: Histograma de valores esperados asignados según los criterios de la segunda iteración.
Fuente: Elaboración propia

Iteración 2 e Iteración 3A (Iteración 2 con Reducción de Ceros), 2013-2017

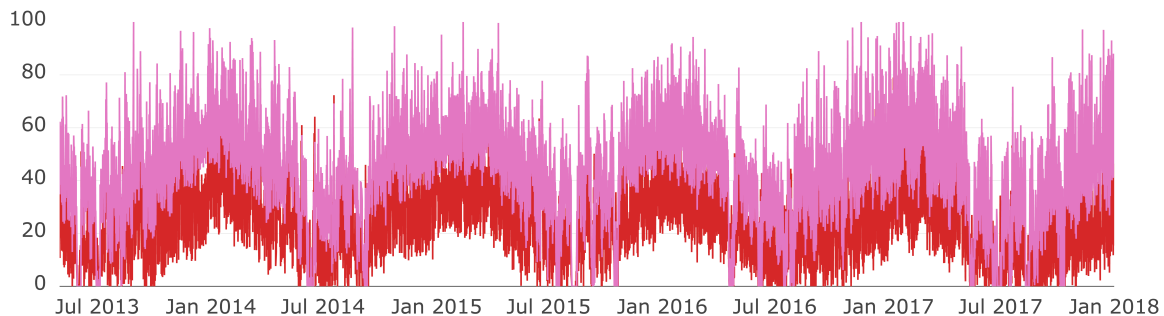


Figura 36: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 2 (lineal). Se utiliza un subconjunto de los datos de entrenamiento como es definido en la descripción de la tercera iteración. Los resultados originales se muestran en rojo y los obtenidos luego del *undersampling* en rosado.

Fuente: Elaboración propia

1. Si la precipitación acumulada semanal es mayor al promedio (en este caso, 9.24mm); se asigna un riesgo del 0 %.
2. Si la precipitación acumulada semanal es mayor a 0; se asigna un riesgo del 50 %.
3. Si hay incendios el registro; se asigna un riesgo del 100 %.

Entrada: Fecha/hora asociada al valor esperado t , Precipitaciones prc , Registro de incendios i ocurridos en el momento t

Salida: Valor esperado o 'false' si el dato debe ser excluido

```

1  $precSemanal \leftarrow precipitacionAcumulada(prc, desde=t-dias(7), hasta=t)$ 
2  $prom \leftarrow promedio(prc)$ 
3
4 si  $precSemanal > prom$  entonces
5 |   devolver 0,0
6 si no, si  $precSemanal > 0$  entonces
7 |   devolver 0,5
8 si no, si  $len(i) > 0$  entonces
9 |   devolver 1,0
10 en otro caso
11 |   devolver false
12 fin

```

Algoritmo 3: Asignación de valor esperado para la 3ra iteración.

Se entrena linealmente un modelo utilizando las mismas variables de entrada que en la segunda iteración. El resultado se puede visualizar en la Figura 37 y está definido por la siguiente regresión múltiple:

$$riesgo = 0,5003 - 0,0405x_1 - 0,0864x_2 - 0,1261x_3 - 0,1160x_4 + 0,0040x_5 \quad (14)$$

Nótese que las variables de entrada deben estar estandarizadas (STD) al evaluarlas en la función (entrenamiento realizado con valores estandarizados).

Iteración 3B, 2013-2017

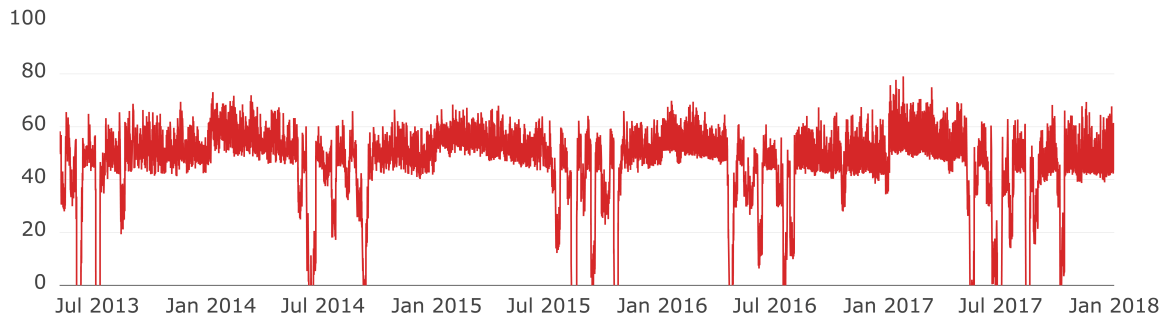


Figura 37: Series de tiempo mostrando vista completa (2013-2017) de cálculo de la iteración 3 (lineal). Se utiliza un subconjunto de los datos de entrenamiento como es definido en la descripción de la tercera iteración. Los datos de entrenamientos pasaron por un proceso de *undersampling*, efectivamente eliminando exceso de ceros.

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. 30/30/30

En ocasiones, la prensa ha hecho referencia a una configuración climática que ayuda a la propagación rápida del fuego [EMOL, 2016], citando a altos cargos de la CONAF. La experiencia indica que más de 30°C, menos de 30 % de humedad y más de 30kt de viento, fomentan la propagación de los incendios.

En el caso de esta investigación, se enfoca mayormente en las condiciones que generen riesgo de ignición (no propagación), sin embargo, se hace un análisis básico sobre los datos obtenidos para corroborar la información y evaluar la factibilidad de incluir el comportamiento como un factor importante en el cálculo de riesgo.

Desgraciadamente, en todo el período 2013-2017, no existe una instancia en la que se cumplan los 3 criterios; en los 5 años, no hay un registro que sobrepase los 30 nudos.

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES Y RESULTADOS

A continuación, se contrastarán las soluciones propuestas en la sección anterior y la ocurrencia de incendios. La idea general es tener una noción de la eficacia de los índices de riesgo de incendio estudiados.

4.1.1. ÍNDICE DE JULIO

El índice de riesgo de incendios de G. Julio, se plantea como un índice que indica la probabilidad de ocurrencia de incendios a partir de variables meteorológicas y factores varios (ver Sección 2.4). En la Figura 38 se contrasta el índice de Julio calculado, tanto el original como el modificado (utilizando índice de sequía basado en PSE), con las ocurrencias de incendios. Se pueden rescatar 2 cosas de el gráfico:

- El comportamiento sinusoidal refleja en sus altos las zonas con densidad de ocurrencia de incendios más alta, así como en temporadas con menos ocurrencias se ve claramente un valle.
- En la vista general no se percibe mayor diferencia entre el índice modificado y el original; esto permite inferir que en el modelamiento no se da mucha importancia al factor de sequía.

4.1.2. RISCO DO FOGO

El Risco do Fogo es definido conceptualmente desde la base que afirma que, cuanto más días seguidos haya sin lluvia, mayor es el riesgo de ignición en su vegetación. En esto difiere principalmente con el índice de riesgo de Julio. RDF además agrega factores dependiendo del tipo de vegetación y agrega temperatura y humedad relativa como factores de menos importancia en comparación con sequía. En la Figura 39 se contrasta los índices calculados con distintos valores de A . A simple vista parece más caótico que la representación de Julio en la Figura 38, sin embargo, el comportamiento en ventanas más cortas de tiempo es más estable para el RDF como se puede ver en la Figura 40.

Al igual que el índice de Julio, tiene un comportamiento que permite definir períodos de tiempo en los que la ignición es más probable.

Índices de Julio y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

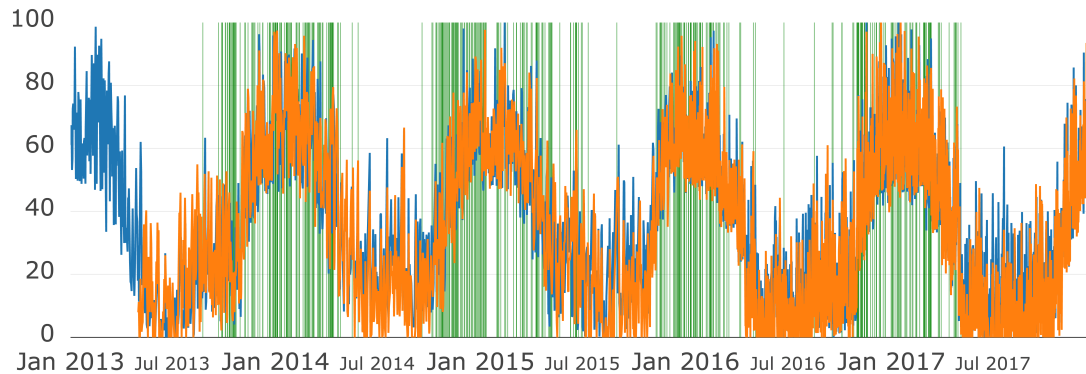


Figura 38: Series de tiempo mostrando una muestra correspondiente al 10 % de los valores calculados para el índice de Julio original (en azul) y modificado (basado en PSE, en naranja). Cada barra verde en la línea de tiempo es un incendio. Cabe destacar que los datos del índice modificado comienzan luego de 6 meses requeridos para tener datos iniciales.

Fuente: Elaboración propia

Risco do Fogo y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

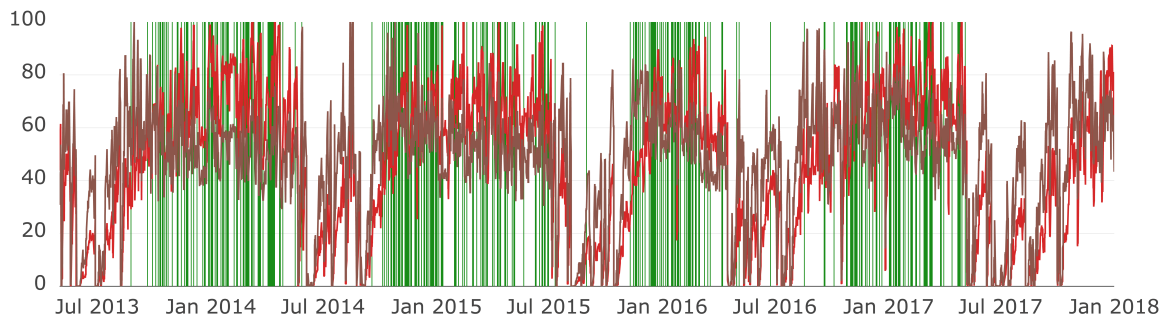


Figura 39: Series de tiempo mostrando valor calculado del índice del RDF, con $A = 1,5$ (rojo) y $A = 2,4$ (café). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. EXPERIMENTOS

Por completitud y aprovechando las herramientas disponibles se crean reglas arbitrarias basadas en la observación de los métodos investigados para asignar valores esperados por registro de datos. Con estos valores se generan modelos utilizando nada más que variables meteorológicas de entrada obteniendo un índice de riesgo de salida.

Muestra Risco do Fogo e Índice de Julio Modificado, 2013-2017

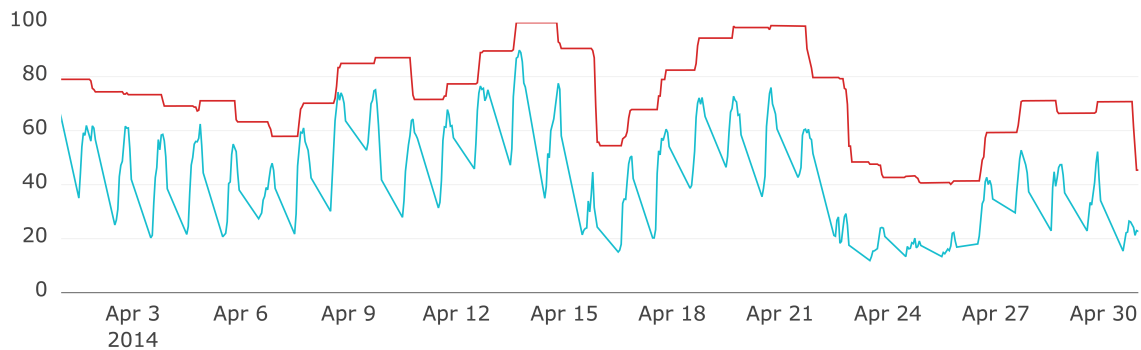


Figura 40: Series de tiempo mostrando valor calculado del índice del RDF, con $A = 1,5$ (rojo) y el valor calculado para el índice de Julio modificado (celeste). La ventana temporal corresponde a abril, 2014.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la primera iteración se pueden ver contrastados con las ocurrencias de incendios en la Figura 41. Los resultados son interesantes en los períodos donde abundan incendios, indicando siempre valores altos, al coste de existir inestabilidad en los períodos donde hay poca ocurrencia.

Iteración 1 y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017



Figura 41: Series de tiempo mostrando valor calculado de la primera iteración de los experimentos. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la segunda iteración, se logra generar un comportamiento oscilatorio, sin embargo, los valores tienden a agruparse en una franja horizontal angosta (ver Figura 42), lo que no permite establecer intervalos de riesgo bien definidos. Por otro lado, el acercamiento secundario de la segunda iteración (ver Figura 33) se descarta de inmediato por no demostrar ningún patrón reconocible.

En la tercera iteración se introduce una variación (con *undersampling*) de la segunda itera-

Iteración 2 y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

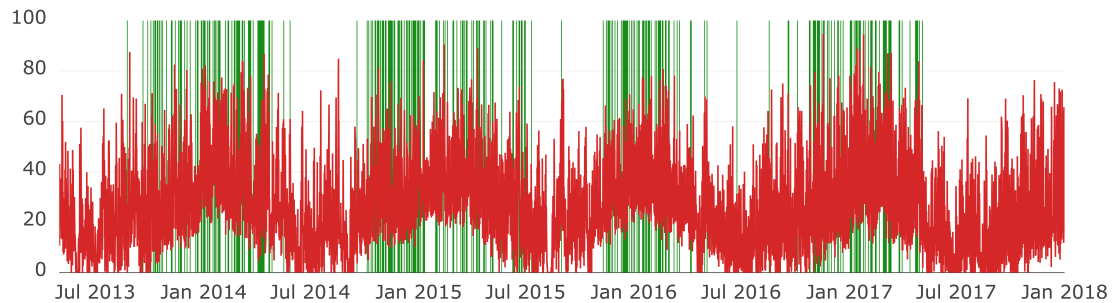


Figura 42: Series de tiempo mostrando valor calculado de la segunda iteración de los experimentos. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

ción. Al contrastarla con la ocurrencia de incendios y RDF se muestra que no aporta valor adicional a este último (ver Figura 43).

Iteración 2, Iteración 3A y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

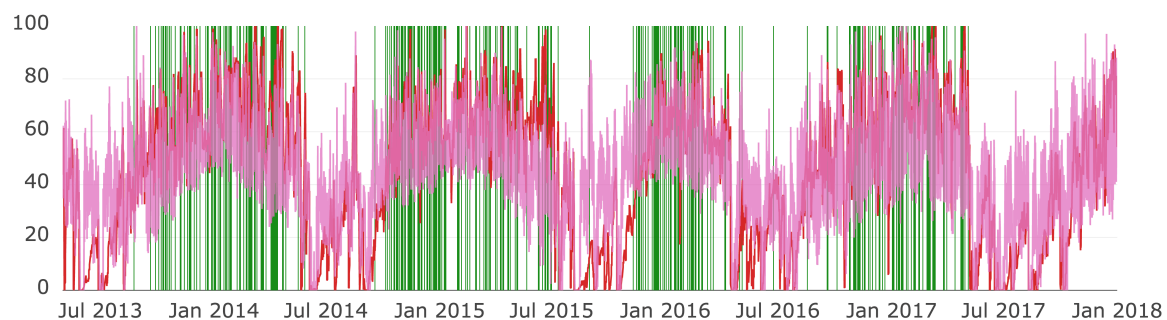


Figura 43: Series de tiempo mostrando valor calculado de la variación de la segunda iteración (rosado) de los experimentos y RDF (rojo). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

Además, la tercera iteración se intenta utilizar únicamente precipitación acumulada de la última semana como criterio de valor esperado. Las condiciones definidas generaron muchos valores esperados intermedios, lo que llevó a que el resultado fuera muy plano alrededor del 50 % (ver Figura 44).

Iteración 3B y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017



Figura 44: Series de tiempo mostrando valor calculado de la variación de la tercera iteración (rojo) de los experimentos. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. PRECIPITACIÓN Y SEQUÍA

Si hay algo que se ha comprobado es que la ocurrencia de incendios tiende a concentrarse en ciertos períodos del año. Entonces es válido preguntarse; dadas las variables trabajadas, ¿cuál es la que más tiene influencia en este comportamiento?; si se comparan visualmente todas variables contra la ocurrencia de incendios, la que por lejos tiene más correlación es la precipitación. Esto se puede ver en la Figura 45.

Precipitación y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

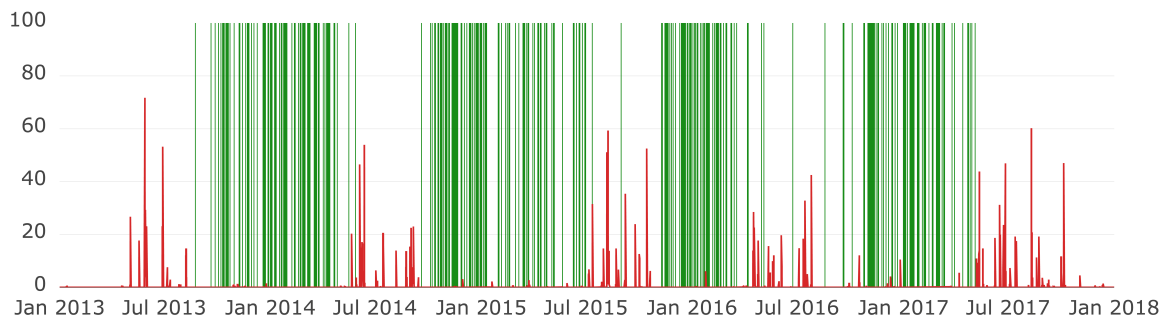


Figura 45: Series de tiempo mostrando valor de la precipitación para un registro de la estación (rojo). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

Considerando esto, y dado el alcance de esta investigación, los factores de sequía/precipitación estudiados podrían servir como índices de riesgo por sí solos. Si se contrastan los datos se obtienen diferentes perspectivas:

- La Figura 46 muestra el factor original de precipitación acumulada de Julio, es decir, con datos desactualizados. El resultado es esperable y poco útil.
- La Figura 47 muestra el factor modificado (basado en PSE) de precipitación acumulada de Julio. La diferencia es notoria inmediatamente. Recordar que al ser un factor de precipitación acumulada, sugiere que mientras más bajo sea el valor, mayor probabilidad de ignición habrá.
- La Figura 48 muestra el factor de sequía (PSE) del Risco do Fogo. En este caso también se nota una fuerte correlación. A diferencia del factor de precipitación acumulada, mientras más alto el valor, más probabilidad de ignición existe, debido a que se trata de representar la cantidad de tiempo que ha pasado sin lluvias.

Factor de Sequía de Julio Original y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

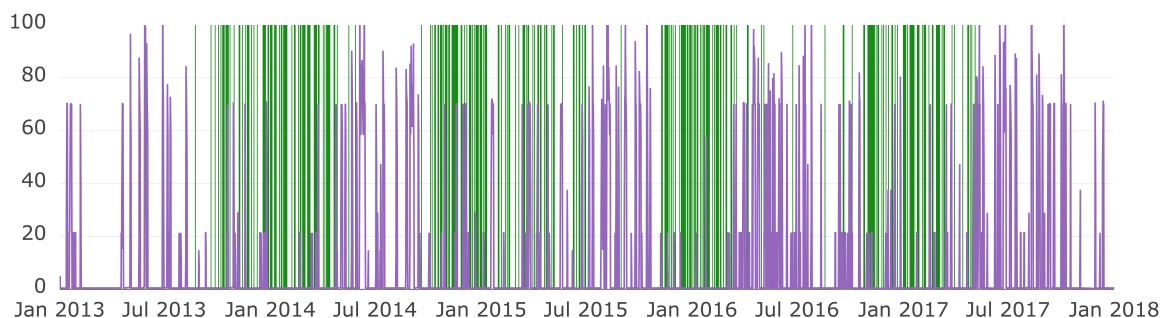


Figura 46: Series de tiempo mostrando valor del factor de precipitación acumulada original de G. Julio. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

Como es de esperarse, se genera un leve efecto espejo entre el factor modificado de precipitación acumulada y el factor de sequía, ya que el primero está basado en los valores del segundo. Sin embargo existen variaciones sutiles. La más importante de ellas, es que el factor de precipitación acumulada es más estable cuando se trata de la ocurrencia de un incendio. En la Figura 49, se ve como el factor de precipitación acumulada es más plano en las instancias en las que ocurre un incendio que el PSE. Este último en cambio, presenta mayor variación en los valores calculados.

4.1.5. CASO DE ESTUDIO: GRAN INCENDIO DE VALPARAÍSO

En abril 12, 2014 a las 16:14 hora local, un evento catastrófico azotó la ciudad de Valparaíso. Un incendio comenzó a propagarse desde un cerro y generó severas consecuencias, entre ellas la destrucción de al menos 2500 casas, más de 11 000 personas damnificadas, 15 víctimas fatales [SOYCHILE, 2014] y más de 500 [24HORAS, 2014] heridos.

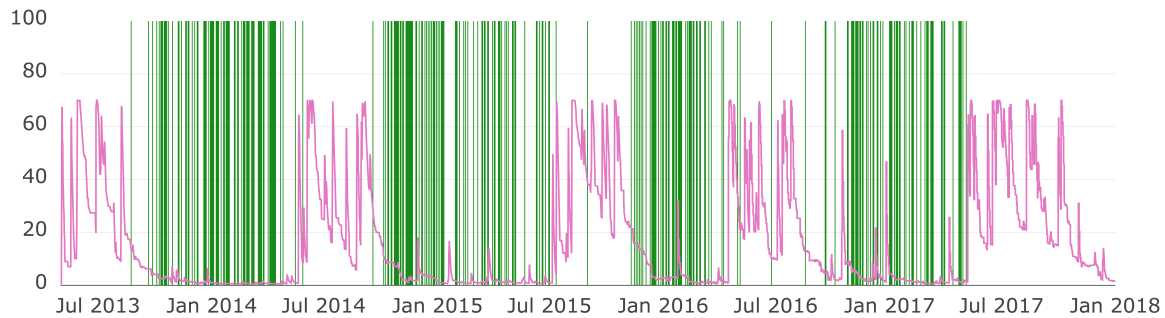
Factor de Sequía Modificado y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

Figura 47: Series de tiempo mostrando valor del factor de precipitación acumulada modificado de G. Julio (basado en valores actuales del PSE). Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

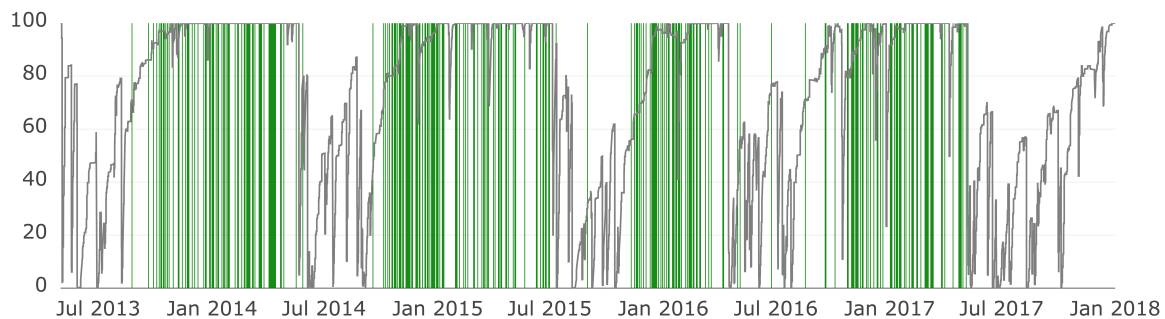
PSE y Ocurrencia de Incendios, 2013-2017

Figura 48: Series de tiempo mostrando valor del PSE. Cada barra en la línea de tiempo es un incendio

Fuente: Elaboración propia

Dicho suceso se encuentra entre el registro de incendios a disposición. No tiene mucho sentido revisar qué pasó las horas antes de que ocurriera el incendio, debido a que las fluctuaciones en los índices son tales, que las mismas condiciones se repiten en ocasiones en las que no se producen incendios. Después de todo, es normal que suceda, ya que lo que se busca no es tratar de predecir la ocurrencia de un incendio, sino las condiciones meteorológicas que crean un ambiente apto para que suceda.

Habiendo mencionado lo anterior, y considerando que los mejores resultados provienen de los índices de sequía/precipitación acumulada, se hace un experimento. Se toma el PSE como referencia, y se escanea en búsqueda de períodos prolongados con el valor máximo de factor de sequía. En la Figura 50 se puede ver la representación de dicho experimento.

Casualmente, el inicio del Gran Incendio, se encuentra dentro del intervalo con sequía más

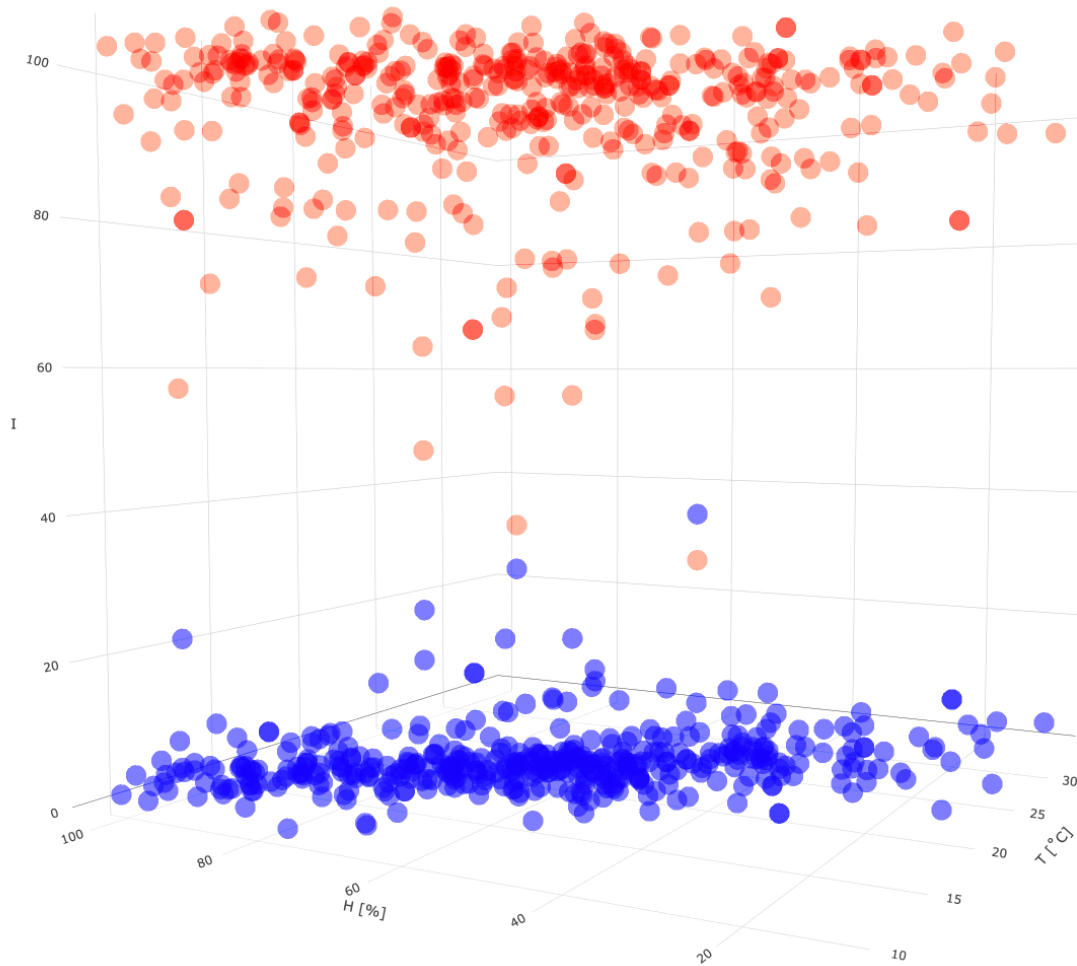


Figura 49: Gráfico de dispersión en 3d mostrando valores de factor de sequía/precipitación acumulada sólo en instancias donde ocurrió un incendio. Factor de sequía PSE (rojo). Factor modificado de precipitación acumulada de Julio (azul).

Fuente: Elaboración propia

prolongada entre 2013 y 2017. El valor de sequía se mantuvo al máximo (no hubo lluvias significativas entre medio) por un total de 3000 horas (125 días). Cuando inició el incendio, habían transcurrido 2524.23 horas (al rededor de 105 días). Esta es información de gran utilidad ya que presenta un punto de vista analítico que fundamenta que el factor más importante en el riesgo de ignición es la precipitación.

4.2. RESOLUCIÓN DE LOS DATOS

Como se dijo en un comienzo, un objetivo de esta investigación es verificar la posibilidad de usar datos de campo recientes para hacer cálculos en el corto plazo. Para poder hacer la eva-

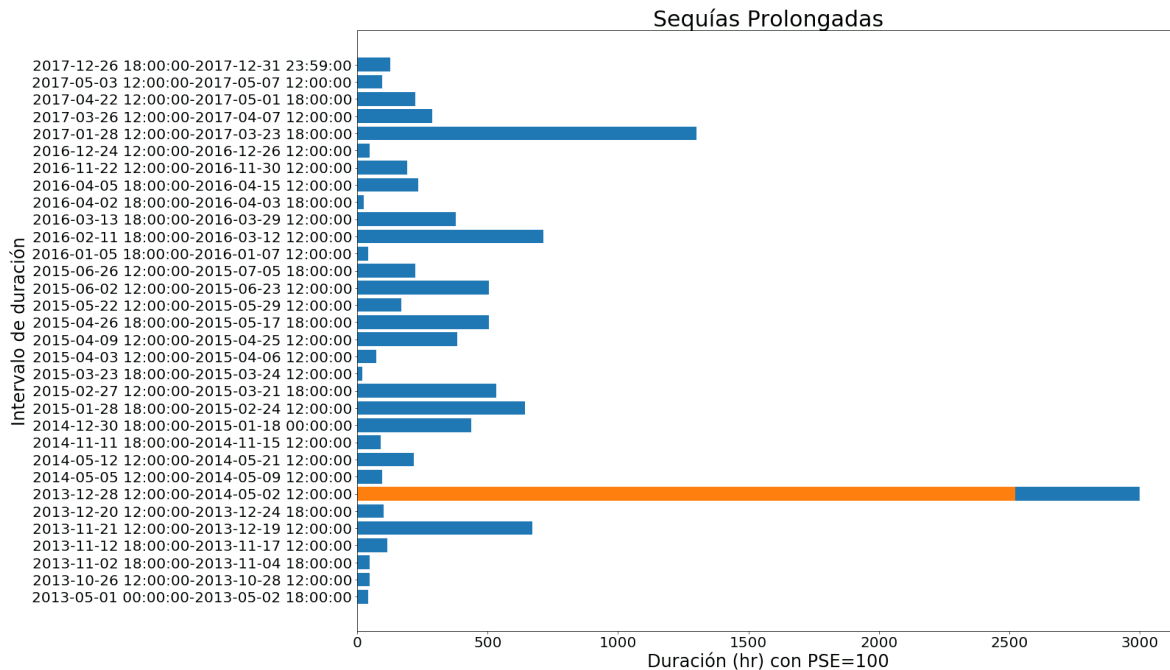


Figura 50: En el eje y, se muestran los períodos donde se produce el valor máximo de sequía de manera continua, es decir, desde inicio a fin del período, el único valor de PSE calculado es el máximo. En el eje x se grafica la duración en horas del período para poder visualizar más fácilmente. La porción naranja representa la duración hasta el inicio del Gran Incendio.

Fuente: Elaboración propia

luación era necesario aumentar la resolución de los datos de entrada, es decir, en vez de usar datos diarios, usar datos horarios. Todos los gráficos y análisis realizados hasta ahora, han sido con datos horarios, sin embargo su uso no era directamente visible porque se mostraba en escala mensual o anual. A continuación (ver Figura 51) se mostrará el comportamiento de los índices trabajados durante el día 12 de abril de 2014 (Gran Incendio de Valparaíso).

Muestras Horarias, 12 de Abril, 2014

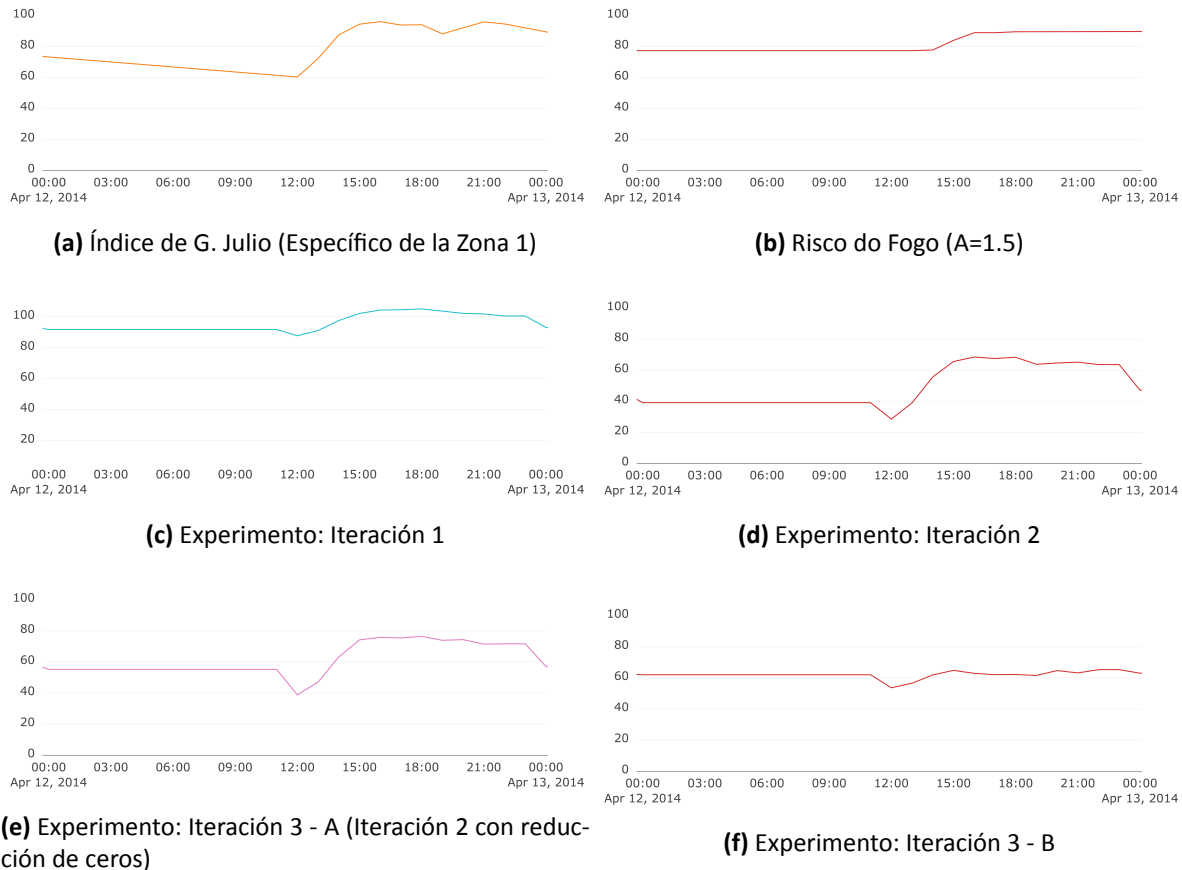


Figura 51: 6 índices calculados a lo largo del día 12 de abril de 2014. En todos los casos el eje y corresponde al valor calculado (mayor significa más peligro). En el eje X se muestra la hora del día para un valor calculado.

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Los incendios son catástrofes, en su mayoría, artificiales. Las malas intenciones no dejarán de existir y no queda otra opción que tomar medidas correctivas ante tales situaciones. Aún así, para que se produzca un incendio de magnitud, deben estar las condiciones que permitan la ignición y propagación. Ese es un hecho universal y es la razón de porqué existe un área de investigación con el propósito de encontrar una definición que permita modelar el riesgo que un incendio sea factible. Por razones obvias una solución preventiva es preferible, pero es de la misma manera, evidente que la dificultad se presenta en forma de situaciones imprevisibles.

El santo grial de los índices de riesgo de incendios, es lograr una suerte de predicción. Aunque es de utilidad saber en qué períodos las probabilidades de ocurrencia de incendios son altas, lo que la industria o instituciones gubernamentales buscan, es la capacidad de utilizar un indicador de riesgo como una herramienta de toma de decisiones para preparar recursos y organizar respuestas.

5.1. RESPECTO A LAS SOLUCIONES

- De lo desarrollado se pretende determinar la utilidad práctica de un índice de riesgo de incendios y evaluar la efectividad de los métodos utilizados.
- Se trabaja en base a la calidad y disponibilidad de los datos.
- Como se menciona en la investigación, los datos generados son horarios a diferencia de las implementaciones comunes, esto agrega resolución a los resultados.
- Calcular los índices en tiempo real para evaluar cuál es el riesgo de incendio al instante no es tan efectivo. Si se ven los cálculos a lo largo de todo el espectro (por ejemplo: anual), es interesante ver el comportamiento de los máximos y mínimos. Estos dan una sensación de conciencia de las estaciones del año y su influencia en la ocurrencia de incendios; la mayoría se concentraba entre noviembre y mayo.
- De las variables estudiadas, la que más influencia tiene es la precipitación. Al ver el gráfico que contrasta precipitaciones con ocurrencia de incendios (ver Figura 45), se ve que la premisa de G. Julio es correcta.
- Si bien el comportamiento general se puede definir satisfactoriamente con los índices, al revisar el detalle, en ocasiones funciona cuando ocurren incendios y en otras no, vale decir, se nota una variación positiva en el índice calculado. Es importante recalcar que un índice alto **no implica incendio**, sólo se trata de condiciones favorables para la ignición.

5.2. PROPUESTA DE APLICACIÓN

Como se mencionó, la aplicación más interesante es la utilización como mecanismo de toma de decisiones. Por todas las razones mencionadas y listadas anteriormente, el índice de riesgo en sí mismo no es de gran utilidad en este caso ya que no entrega información de suficiente calidad en un instante para movilizar recursos de respuesta. Esto se puede evidenciar particularmente en la Figura 51, donde, si bien existe un incremento en los índices cercano al momento del incendio (en algunos más notorios que en otros), este tipo de variaciones se replica en muchas otras instancias en donde no ocurrió incendio, haciendo que la cantidad de falsos positivos sea considerable y por consiguiente, pierda todo sentido utilizar un índice por sí solo para tomar una decisión a medida que los datos son generados.

Sin embargo, se propone como resultado principal de esta investigación, la utilización de un valor de sequía como el PSE o bien la falta de precipitaciones, como el factor de precipitación acumulada de Julio, como un índice independiente, capaz de dar suficiente información respecto a las condiciones propicias de ignición. Esto, combinado con la recolección de suficientes datos históricos climáticos de una zona determinada, se puede generar por medios estadísticos, un valor correspondiente a la tolerancia máxima de prolongación de un factor de sequía/precipitación acumulada en su estado crítico (como el análisis en la Figura 50). Si se lleva mucho tiempo con resultados críticos, es entonces recomendable que se movilicen y reserven recursos preventivos hasta la ocurrencia de un incendio, o bien, una precipitación que restablezca la situación.

5.3. TRABAJO FUTURO

A quien esté interesado en el tema, se recomienda lo siguiente:

- Hacer una correlación de ocurrencia de incendios e intervalos de tiempo. Se busca definir una temporada (o bien estación del año), en función de la ocurrencia de incendios.
- Lo que mejor representa la probabilidad de ignición es el factor de sequía. Actualmente sólo considera precipitaciones; sería interesante definir la sequía en función de la precipitación, temperatura y quizá radiación.
- Respecto a la disponibilidad de datos y representación visual: un proyecto completo se podría basar en la creación de un GIS combinado con filtros temporales para mostrar los índices y distintos factores en un mapa. Esto permitiría incluir los datos de diversas estaciones en un área.
- Automatización de cálculos, de manera que se actualicen los datos día a día y la capacidad de reajustar los resultados a medida que se consuma mayor cantidad de información.

- Adaptar cálculos para redes de sensores.
- Evaluar factibilidad de predicción de índices con pronóstico del clima.

Adicionalmente, a finales del proceso de investigación se publicó el resultado de la aplicación de un índice de probabilidad de ignición en la página oficial de CONAF⁸. Es de particular interés indagar más sobre el método y la fuente de datos usados. Debido a que es posible que el resultado no esté disponible en un futuro en la página de CONAF, se agrega en anexos una captura de pantalla del estado actual del contenido y un vínculo a la ubicación del recurso.

⁸<http://www.conaf.cl>

ANEXOS

Todo el contenido digital (replicable) utilizado para el desarrollo de la investigación se puede encontrar en el repositorio git:

<https://github.com/rcastill/recursos-memoria>

El lector puede hacer uso libre del material acorde a las restricciones de la licencia BSD 2-clause.

Índice de Probabilidad de Ignición CONAF

A continuación se muestra una captura de pantalla (ver Figura 52) del índice de probabilidad de ignición mencionado en la sección de trabajo futuro.

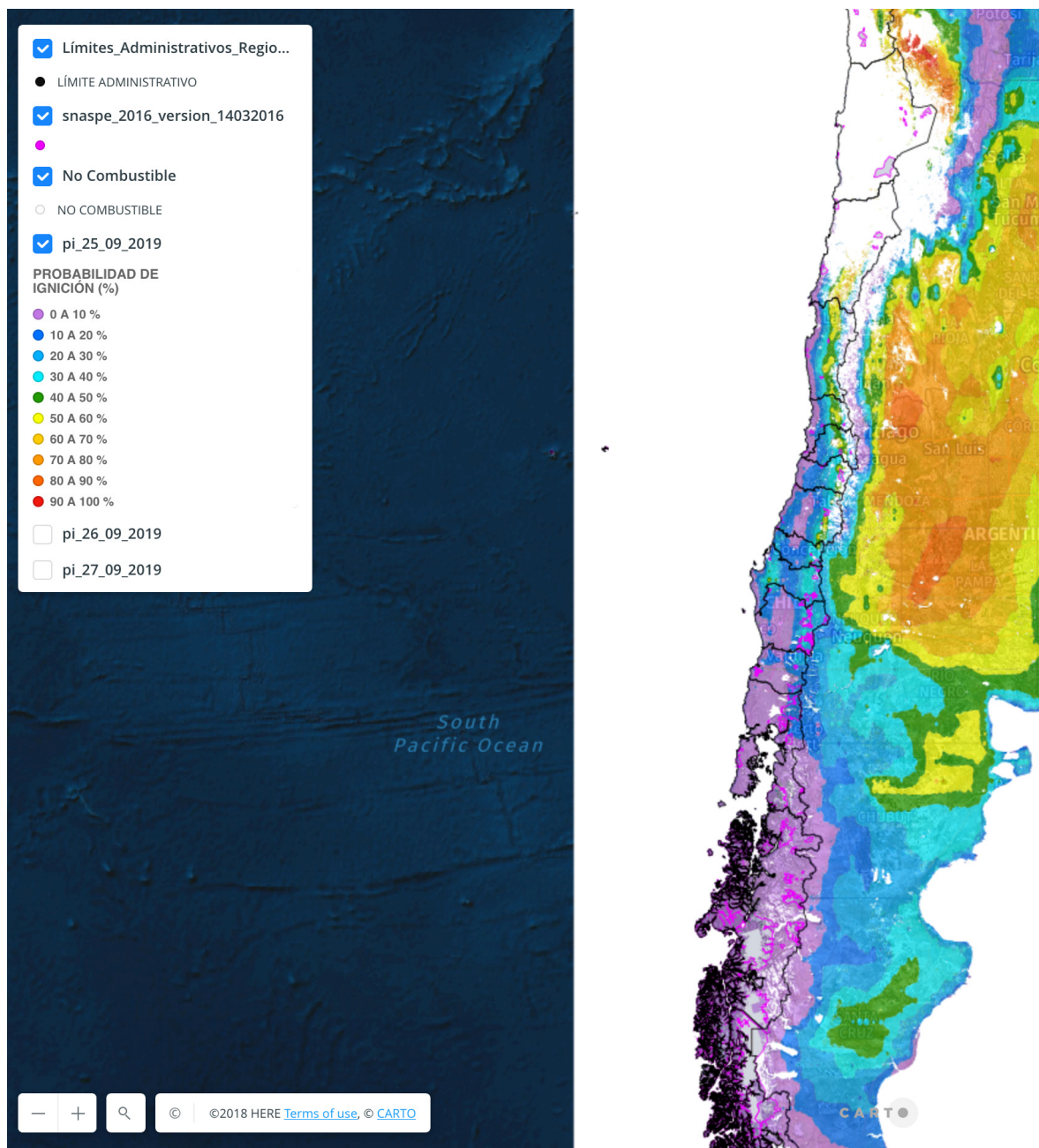


Figura 52: Mapa coloreado según el índice de probabilidad de ignición calculado.

Fuente: CONAF <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-probabilidad-de-ignicion/>
 (Visitado 2019-09-26)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [24HORAS, 2014] 24HORAS (2014). Valparaíso: más de una decena de muertos y miles de damnificados. <https://www.24horas.cl/nacional/valparaiso-mas-de-una-decena-de-muertos-y-miles-de-damnificados-1179384>. Accedido: 2019-06-19.
- [Bradshaw *et al.*, 1984] Bradshaw, L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E., y Cohen, J. D. (1984). The 1978 national fire-danger rating system: technical documentation. *General Technical Report INT-169. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station*. 44 p., 169.
- [CONAF, 2019] CONAF (2019). <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>. Accedido: 2019-08-26.
- [Deeming, 1972] Deeming, J. E. (1972). *National fire-danger rating system*, volumen 84. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Dept
- [Dowdy *et al.*, 2009] Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkele, K., y de Groot, W. (2009). Australian fire weather as represented by the mcarthur forest fire danger index and the canadian forest fire weather index. *Centre for Australian Weather and Climate Research, Melbourne, Australia, Tech. Rep.*
- [EMOL, 2016] EMOL (2016). 30-30-30, la extrema combinación de números detrás del aumento de incendios forestales. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2016/11/22/832203/303030-Una-de-las-razones-del-aumento-de-incendios-forestales-en-la-zona-central-del-pais.html>. Accedido: 2019-06-19.
- [Graham *et al.*, 2014] Graham, R. T., Jain, T. B., Graham, K. L., Denner, R., y Hardy, C. (2014). One-hundred years of wildfire research: A legacy of the priest river, deception creek, and boise basin experimental forests of idaho. En *USDA Forest Service Experimental Forests and Ranges*, pp. 485–513. Springer.
- [Hardy y Hardy, 2007] Hardy, C. C. y Hardy, C. E. (2007). Fire danger rating in the united states of america: an evolution since 1916. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2):217–231.
- [Hardy, 1983] Hardy, C. E. (1983). *The Gisborne era of forest fire research: legacy of a pioneer*. US Dept. of Agriculture, Forest Service.
- [Julio, 1968] Julio, G. (1968). Estudio preliminar de variables climáticas como base para la preparación de índices de grado de peligro de incendios forestales en la zona de los arenales. *Serv. Agríc. Gan., Pub. Min., Santiago*, p. 28.
- [Julio, 1990] Julio, G. (1990). Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para chile.
- [Matthews, 2009] Matthews, S. (2009). A comparison of fire danger rating systems for use in forests. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 58(1):41.

- [Merrill y Alexander, 1987] Merrill y Alexander (1987). Ccfffm glossary of forest fire management terms - 4th edition.
- [Noble *et al.*, 1980] Noble, I., Gill, A., y Bary, G. (1980). Mcarthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, 5(2):201–203.
- [Peña, 2008] Peña (2008). Incremento de los incendios forestales en bosques naturales y plantaciones forestales en Chile. En *Memorias del segundo simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales: Una visión global*, pp. 595–612.
- [Prevención, 2019] Prevención (2019). <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/prevencion/campana-nacional-de-prevencion-de-incendios-forestales-2018-2019/>. Accedido: 2019-08-26.
- [Setzer *et al.*, 2016] Setzer, A. W., Sismanoglu, R. A., y Martins, G. (2016). Metodologia do cálculo do risco de fogo do programa queimadas do inpe-versão 10, junho/2016.
- [Sismanoglu *et al.*, 2002] Sismanoglu, R. A., Setzer, A., Justino, F. B., y Lima, W. F. A. (2002). Avaliação inicial do desempenho do risco de fogo gerado no cptec. En *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, pp. 1991–1999.
- [Sismanoglu y Setzer, 2004] Sismanoglu, R. A. y Setzer, A. W. (2004). Risco de fogo para a vegetação da América do Sul: comparação de duas versões para 2003. En *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, volumen 13, p. 2004.
- [SOYCHILE, 2014] SOYCHILE (2014). Incendio en Valparaíso: más de 11 mil damnificados, 2500 casas destruidas y 15 fallecidos. <https://www.soychile.cl/Valparaiso/Policial/2014/04/12/242586/Gobierno-declaro-Zona-de-Catastrofe-en-Valparaiso-por-mega-incendio.aspx>. Accedido: 2019-06-19.
- [T13, 2019] T13 (2019). <https://www.t13.cl/noticia/nacional/activo-controlado-y-extinto-como-distinguir-estados-incendio>. Accedido: 2019-08-26.
- [Van Wagner *et al.*, 1987] Van Wagner, CE and Forest, Petawawa and others (1987). Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. En *Can. For. Serv., Forestry Tech. Rep.* Citeseer.
- [Van Wagner, 1974] Van Wagner, Charles Edward, e. a. (1974). *Structure of the Canadian forest fire weather index*, volumen 1333. Citeseer.
- [Wright, 1932] Wright, J. (1932). Forest fire hazard research. *The Forestry Chronicle*, 8(3):133–151.
- [Zárate López, 2004] Zárate López, L. G. (2004). *Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales*. Universitat Politècnica de Catalunya.

[Índice de Riesgo de Incendios Forestales, 2018] Índice de Riesgo de Incendios Forestales (2018). Valparaíso: más de una decena de muertos y miles de damnificados. <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/combate-de-incendios-forestales/indice-de-riesgo-de-incendios-forestales/>. Accedido: 2018-08-05.