



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MODELO DE DECISIÓN SOBRE EL MANEJO DE COMBUSTIBLE EN  
BOSQUES ANTE INCENDIOS FORESTALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

BRAULIO IGNACIO ALIAGA ALARCÓN

PROFESOR GUÍA:  
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAIME CARRASCO BARRA  
JUAN VELÁSQUEZ SILVA

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL  
POR: BRAULIO IGNACIO ALIAGA ALARCÓN  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

## MODELO DE DECISIÓN SOBRE EL MANEJO DE COMBUSTIBLE EN BOSQUES ANTE INCENDIOS FORESTALES

Los incendios son un problema mundial que genera gran dificultad en la planificación forestal. Para abordarlo han surgido enfoques como el Fire Smart Forest Management, que busca incorporar medidas de prevención de incendios en la gestión del bosque y así disminuir el impacto potencial de incendios catastróficos que se puedan ocasionar.

Usando este enfoque se estudia la planificación de los tratamientos del combustible forestal en el tiempo, en particular, la cosecha de determinadas áreas de tal forma que su localización y priorización puedan mitigar el efecto de la propagación del fuego. De esta manera se define el objetivo de este trabajo como el *“Desarrollo y evaluación de heurísticas de corte que permitan minimizar la propagación de incendios dentro de una plantación forestal a partir de la toma de decisiones de un programa de cosechas”*.

Para estudiar el problema se ocupa un simulador estocástico de incendios (*Cell2Fire*) diseñado para evaluar el impacto de las estrategias de corte a nivel táctico-estratégico. Se modela el bosque usando teoría de grafos, de esta forma el bosque se divide en celdas caracterizadas por el tipo de vegetación presente y sus condiciones topográficas, y se agrupan en unidades básicas de cosecha, llamadas rodales.

En un marco multi etapas se evalúa el impacto de las estrategias de corte en el tiempo decidiendo período a período qué rodales cortar. Para incorporar el riesgo de fuego en la toma de decisiones se ha estudiado el uso de diferentes factores para medir el impacto sobre la protección del bosque ante el fuego al momento de cortar uno o más rodales. Estos son: Probabilidad de quemado (*BP*), Betweenness Centrality (*BC*), Fire Protection Value (*FPV*) y Downstream Protection Value (*DPV*)

Usando estos valores con el propósito de priorizar el tratamiento de una celda en las distintas etapas, antes se somete a una fase de entrenamiento, donde se usa la información de múltiples simulaciones de incendios usando igniciones y escenarios climáticos aleatorios sobre el bosque. Se hace una evaluación del rendimiento de las heurísticas en base al nivel de entrenamiento del factor con el que se trabaja.

Se comparan los resultados obtenidos con los de un decisor que no considera el riesgo de incendio, y las heurísticas son evaluadas bajo diferentes condiciones que varían el comportamiento del fuego, como lo son el clima y la topografía.

Los resultados indican que al ocupar *DPV* como métrica de decisión se obtienen resultados consistentemente mejores que con las otras medidas, seguido por *BC* y *BP*, mientras que el uso de *FPV* se descarta por su bajo rendimiento computacional y el decisor que no considera el riesgo de incendio es quien obtiene los peores resultados.



*A todos quienes me han ayudado a llegar a este momento*

*En especial a mis padres, hermanos y a Rocío*

*Pero por sobretodo*

*a Alén*

*que te apareciste hace poco*

*pero me cambiaste la vida*



# Agradecimientos

Quisiera agradecer en especial a mi familia, mis padres, Omar y Yéssica que a lo largo de los años siempre me han dado su apoyo incondicional, ya que sin ellos probablemente ni siquiera hubiese entrado a la Universidad. Gracias por sacar lo mejor de mi y dejarme en claro que yo podía.

A mis hermanos, Vanessa, Daniel, Juan Pablo y Diego.

A mis amigos, Rodrigo, Diego, Nicolás, Nadina, Walter, Francisco y Nathalie. Que con los años han seguido estando ahí para mí.

A Rocío, por ser mi cambio de enfoque permanente, quien me da otra perspectiva de las cosas para afrontar los problemas y salir adelante.

Agradecer también a los profesores miembros de la comisión.

Al profesor Weintraub por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto gigante y darme la confianza de ser un partícipe importante y contribuir con este trabajo.

Al profesor Coguía Jaime Carrasco y el profesor integrante Juan Velásquez. Por ser de gran ayuda en encaminar esta tesis a buen puerto con sus correcciones y contribuciones.

A todos ellos y muchos más

Gracias... Totales!!



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general . . . . .	1
1.2. Incendios Forestales . . . . .	2
1.3. Contexto . . . . .	2
1.4. Problema . . . . .	5
1.5. Objetivos . . . . .	6
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Fire Smart Forest Management . . . . .	7
2.2. Modelos de Propagación de fuego . . . . .	9
2.2.1. Tipos de modelos . . . . .	11
2.2.2. Modelo de Rothermel . . . . .	13
2.2.3. Principio de Huygens y propagación elíptica . . . . .	14
2.2.4. Autómata Celular . . . . .	15
2.3. Modelos de Combustible . . . . .	17
2.4. Simuladores . . . . .	19
2.4.1. Tipos . . . . .	20
2.4.2. Simuladores destacados . . . . .	20
2.4.3. Cell2Fire . . . . .	22
<b>3. Cell2Fire</b>	<b>25</b>
3.1. Estructura de Grafo . . . . .	25
3.2. Propagación Cell2Fire . . . . .	26
3.3. Árboles de propagación . . . . .	28
<b>4. Propuesta de Solución</b>	<b>32</b>



4.1. Problema Multietapas . . . . .	33
4.2. Mapas de probabilidad de incendio . . . . .	35
4.3. Betweenness Centrality . . . . .	36
4.4. Fire Protection Value (FPV) . . . . .	38
4.5. Downstream Protection Value (DPV) . . . . .	40
4.6. Value at Risk . . . . .	41
4.7. Formulación . . . . .	42
4.8. Heurísticas . . . . .	43
4.9. Restricciones de adyacencia . . . . .	44
<b>5. Implementación</b>	<b>45</b>
5.1. Algoritmos . . . . .	45
5.2. Fuentes de Incertidumbre . . . . .	47
5.2.1. Puntos de Ignición . . . . .	48
5.2.2. Escenarios de Clima . . . . .	48
5.3. Área de Estudio . . . . .	49
5.4. Experimentos . . . . .	50
<b>6. Resultados</b>	<b>52</b>
6.1. Capacidad de aprendizaje . . . . .	53
6.2. Resistencia al fuego . . . . .	61
6.2.1. Impacto de diferentes fuentes de incertidumbre . . . . .	62
6.3. Extensiones . . . . .	65
6.3.1. Restricciones operacionales: adyacencia . . . . .	65
6.4. Marco multi etapas . . . . .	67
6.4.1. Información adicional y posibles aplicaciones . . . . .	69
<b>7. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>70</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>Anexos</b>	<b>79</b>
<b>A. Capacidad de aprendizaje</b>	<b>80</b>
<b>B. Resultados experimentos</b>	<b>84</b>

# Índice de Ilustraciones

1.1. Ocurrencia y daño Incendios Forestales Decenio 2008-2017 . . . . .	3
2.1. Vecindad de una celda identificada según los puntos cardinales . . . . .	17
3.1. Representaciones gráfica de un bosque a través de un grafo . . . . .	26
3.2. Inicio de la propagación de un incendio en Cell2Fire . . . . .	27
3.3. Principio de Hyugens en Cell2Fire . . . . .	28
3.4. Árbol de propagación de una simulación de incendio . . . . .	29
3.5. Ejemplo gráfico de un árbol de propagación global . . . . .	30
4.1. Esquema de temporalidad y relación bosque-cosecha-incendios . . . . .	34
4.2. Mapa de calor de Probabilidad de incendio hecho con Cell2Fire . . . . .	37
5.1. Flujo de la simulación . . . . .	47
6.1. Comparación del rendimiento de las diferentes métricas a distintos niveles de tratamiento y tamaño del conjunto de entrenamiento . . . . .	57
6.2. Experimentos resistentes al fuego de la instancia Sub20x20 con un número diferente de repeticiones en el escenario $RW - RI$ cumpliendo restricciones de adyacencia . . . . .	58
6.3. Experimentos resistentes al fuego de la instancia Sub40x40 con un número diferente de repeticiones en el escenario $RW - RI$ . . . . .	59
6.4. Experimentos resistentes al fuego de la instancia Sub100x100 con un número diferente de repeticiones en el escenario $RW - RI$ . . . . .	60

6.5.	Efectividad del plan de tratamiento dependiendo del escenario simulado ( $ R  = 1000$ ) para la instancia Dogrid. Punto de ignición fijo ( $FI$ )(izquierda) vs punto de ignición aleatorio ( $RI$ )(derecha). Clima fijo ( $FW$ )(arriba) vs clima aleatorio ( $RW$ )(abajo.) . . . . .	63
6.6.	Efectividad del plan de tratamiento dependiendo del escenario simulado ( $ R  = 1000$ ) para la instancia Revelstoke. Punto de ignición fijo ( $FI$ )(izquierda) vs punto de ignición aleatorio ( $RI$ )(derecha). Clima fijo ( $FW$ )(arriba) vs clima aleatorio ( $RW$ )(abajo.) . . . . .	64
6.7.	Comparación del rendimiento con (izq) y sin (der) incluir las restricciones de adyacencia para la instancia sub40x40 . . . . .	66
6.8.	Mapas de calor del DPV de la misma instancia dependiendo del VaR utilizado . . . . .	67
6.9.	Comparación de rendimiento de algoritmos en la instancia Sub100 para niveles múltiples de $tf$ . . . . .	68

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Descripción general

La gestión de operaciones en la industria forestal ha ido evolucionando con los años hacia objetivos más integrales, donde ya no sólo se busca maximizar la extracción de madera, si no incorporar un desarrollo sustentable en sus labores, sin ir más lejos, las primeras declaraciones de la Visión del Sector Forestal Chileno[12] dicen:

*"Marco normativo forestal que sea representativo de una visión consensuada e inclusiva de todos los agentes sectoriales, destinado a potenciar el desarrollo sustentable del sector forestal, integrando armónicamente sus dimensiones política, económica, social, ambiental y cultural"*

*"Legislación forestal con una perspectiva social, ambiental y económica que fomenta y promueve la fiscalización, la protección, la conservación y el uso sustentable de los recursos naturales"*

De estas declaraciones se desprende el interés por la protección de los ecosistemas naturales, sin embargo, pese a que se pueden desarrollar buenos planes de gestión para los bosques de explotación hay ciertos eventos de carácter natural que son impredecibles, poco controlables y que pueden tener efectos bastante negativos en el medio ambiente, ya sean estos sequías, inundaciones, aluviones o incendios forestales. Es en este último punto donde este trabajo pretende hacer un aporte, usando el enfoque del Fire Smart

Forest Management (*FSFM*), un concepto desarrollado por Hirsch[27] en 2001, el cual propone que es posible incluir medidas de protección al largo plazo en la gestión del bosque que permiten minimizar el potencial daño del fuego frente a eventuales incendios de carácter catastrófico, y con ello proteger el medio ambiente de estos desastres integrando los objetivos comerciales.

## 1.2. Incendios Forestales

Los incendios son un problema de carácter mundial [23], no sólo por su aleatoriedad sino también por los efectos que pueden llegar a producir, tanto en la naturaleza como en la sociedad. Desde daños a infraestructuras, pérdidas de terrenos cultivables y de cosechas forestales, dejando a veces daños irreversibles en estos recursos naturales, hogares destruidos y vidas perdidas.

El calentamiento global ha traído consigo un aumento general en las temperaturas a nivel global, a causa de esto el deshielo de las nieves acumuladas en invierno llega antes, como resultado la primavera comienza antes y el verano se hace más largo. Así, con veranos más largos y calurosos la temporada de incendios se hace más extensa, ya que, en este período coexisten los factores que favorecen la propagación del fuego y hacen difícil su combate. Lo que lleva consigo un aumento en la frecuencia de incendios y un aumento promedio en la duración y superficie abarcada por éstos ([45],[58], [57]).

Esto se puede observar en algunos hechos recientes, donde el fuego ha sido el protagonista de grandes desastres a niveles nunca antes vistos, como la gran cantidad de incendios ocurridos en Chile en los primeros meses de 2017 o que en 2018 en el estado de California, Estados Unidos sufrieron el mayor incendio registrado en su historia, donde un solo incendio destruyó más estructuras que cualquier otro en la historia moderna[15].

## 1.3. Contexto

Como se mencionó en la sección anterior, a principios de 2017 se produjeron una gran cantidad de incendios catastróficos en Chile, afectando principalmente a la zona

central del país.

Al revisar la ocurrencia de incendios en Chile en los últimos años, en la Figura 1.1 se puede observar que se ha mantenido estable alrededor de los 5.000 incendios anuales. En contraste, la superficie dañada por los mismos sufrió un alza considerable a causa de la gravedad de los incendios ocurridos en 2017.

Tal catástrofe se debió en gran parte a las condiciones adversas que favorecían la propagación del fuego y hacían difícil su combate, como la alta velocidad del viento y las altas temperaturas.

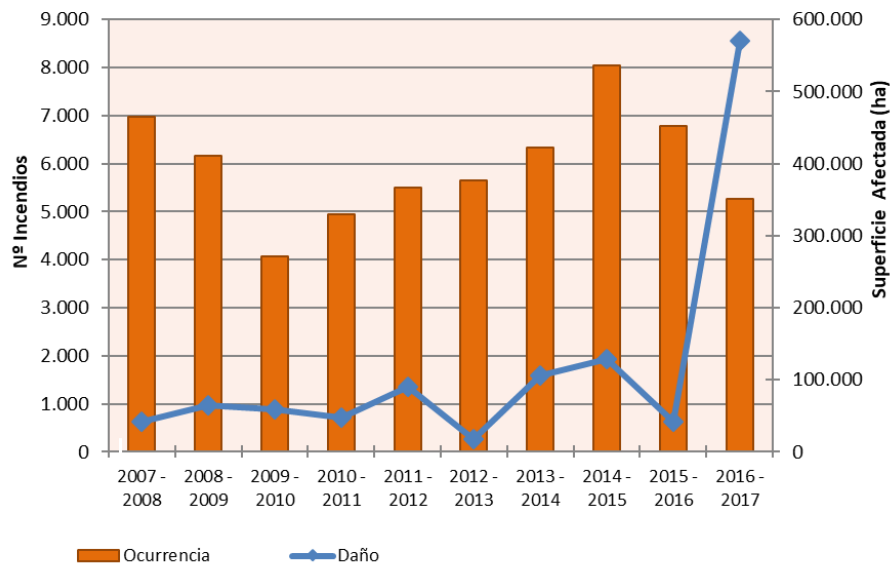


Figura 1.1: Ocurrencia y daño Incendios Forestales Decenio 2008-2017  
Elaborado por CONAF

La ola de incendios consumió un total de 518.174 hectáreas [13], afectando principalmente a plantaciones forestales y bosque nativo. (ver Tabla 1.1). Sin ir más lejos, en la ola de incendios antes mencionada el 54,7% de los terrenos quemados correspondían a plantaciones forestales, mientras que sólo el 6,5% afectó a terrenos agrícolas.

Al situar a Chile en el mercado internacional de la madera, según la Corporación Chilena de la Madera, en 2015 el país se encontraba el 11º puesto en la participación mundial de madera en trozas y 10º en la producción mundial de pulpa de madera.

En 2017 se consumieron 45,8 millones de metros cúbicos de madera[26], representado

Uso	Superficie Consumida (ha)	Porcentaje del total
Plantaciones Forestales	283.659	54,7 %
Bosque Nativo	105.138	20,3 %
Praderas y Matorrales	93.775	18,1 %
Terrenos Agrícolas	33.579	6,5 %
Otros	33.579	0,4 %
Total	518.174	100 %

Tabla 1.1: Superficie consumida según tipo de uso de suelo

un aumento del 2,7 % respecto al año anterior. El uso se distribuyó como se muestra en la Tabla 1.2

Item	Porcentaje
Pulpa de Madera	37,65 %
Aserrío	35,12 %
Astillas	16,48 %
Tableros Y chapas	9,68 %
Postes y Polines	0,76 %
Trozos de exportación	0,31 %

Tabla 1.2: Distribución de la producción de madera según uso

Además, si se refiere al tipo de vegetación cultivada la distribución de las plantaciones según especie se puede resumir en la Tabla 1.3

Especie	Porcentaje
Pino Radiata	67,0 %
Eucalyptus nitens	17,3 %
Eucalyptus globulus	14,3 %
Otras Especies	1,4 %

Tabla 1.3: Distribución de la producción de plantaciones según especie

Con respecto al combate contra incendios en 2015, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Ministerio de Agricultura en su “Documento guía para la formulación de la política Forestal Chilena” [12] se definieron así mismos como:

*“Actores sectoriales comprometidos con la protección de los recursos forestales contra incendios, plagas y otros agentes dañinos”*

El Ministerio de Agricultura, junto a CONAF en el Informe de Afectación y Severidad [13] publicado a raíz de los incendios forestales ocurridos propone, dentro de sus propuestas para la planificación territorial:

*“Incorporación de estrategias de prevención y manejo de incendios a escalas de paisaje, que permitan diseñar territorios que minimicen los incendios ante un futuro de mayor probabilidad de frecuencia e impacto de los incendios”*

Este es sólo un ejemplo de cómo las instituciones a cargo del cuidado medioambiental han declarado la necesidad de incorporar la prevención de incendios al momento del diseño de las plantaciones forestales con el fin de evitar desastres como el antes descrito.

## 1.4. Problema

Por lo mencionado en los puntos anteriores se demuestra una clara necesidad de mejorar las medidas de protección pasiva en la cadena de cultivo y cosecha de productos forestales y de esta forma evitar y aminorar los posibles daños frente a un incendio de tipo forestal.

En el contexto del *FSFM*, varios investigadores han informado que la intensidad y la gravedad de los incendios forestales pueden reducirse a través de actividades de manejo de combustible. Una serie de estudios pioneros en esta dirección fueron realizados por Finney[18], lo que indica que es posible modificar el comportamiento del fuego en los paisajes a través de la colocación estratégica de los tratamientos y patrones de los tratamientos. Un trabajo que evalúa estrategias de tratamiento de combustible para reducir pérdidas potenciales puede revisarse en el trabajo de Salis de 2016 [48], donde los tratamientos se definen por la probabilidad de incendio, la longitud de la llama o el tamaño del incendio forestal. En la planificación forestal, encontrar la distribución óptima del tratamiento en un paisaje en múltiples períodos de tiempo no es una tarea sencilla como se señala Chung[10], principalmente debido a la complejidad intrínseca del cómputo. Este último artículo también revisa los diferentes sistemas de apoyo a las decisiones para la planificación del tratamiento del combustible. Finalmente, se han abordado otros estudios para encontrar la asignación espacial óptima de las actividades de quema prescritas [33]; y para el diseño de cortafuegos para el control de



la propagación de incendios [46].

## 1.5. Objetivos

La principal contribución de este estudio es la introducción de nuevas técnicas de gestión de combustible y una nueva metodología FSFM en el contexto de la simulación de crecimiento de incendios que podría ayudar a los administradores de los bosques a establecer planes óptimos de gestión del paisaje considerando el riesgo de incendios forestales.

De esta manera, la hipótesis que se pretende probar es si un tratamiento sistemático en varios períodos afecta positivamente las probabilidades de incendio en un bosque, en comparación a una gestión del bosque que no considera las probabilidades de incendio en su planificación. Y, por lo tanto, minimiza las pérdidas esperadas. Y se define así el objetivo general.

### Objetivo General

Desarrollar y evaluar heurísticas de corte que permitan minimizar la propagación de incendios dentro de una plantación forestal a partir de la toma de decisiones de un programa de cosechas.

### Objetivos Específicos

1. Probar el desempeño de las heurísticas mediante el uso de un simulador estocástico de incendios
2. Comparar los resultados con los obtenidos por un decisor que no considera el riesgo de incendios en su planificación
3. Analizar la sensibilidad de los resultados a la variación de la información disponible

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Fire Smart Forest Management

La gestión de operaciones en la industria forestal guarda relación con el desarrollo e implementación, táctica y operacional de estrategias que buscan sacar el mayor provecho económico del bosque maximizando la productividad de éste. Dentro de las decisiones que tienen que tomar deben considerar los tipos de árboles que plantar, las cantidades, dónde poner caminos de accesos o cuándo cosechar, entre otros.

En sus inicios la planificación forestal se preocupaba sólo de maximizar beneficios obtenidos desde la extracción de madera bruta, sin embargo, gracias a la investigación de operaciones en el área se ha podido trabajar en un enfoque mucho más integrado de la industria buscando objetivos a largo plazo y la sustentabilidad del negocio.

A pesar de esto, la aleatoriedad de los incendios pone en jaque la planificación forestal, un gran incendio puede desarmar los planes estratégicos de una empresa y generar grandes pérdidas.

Por lo tanto, el ideal es incluir en la planificación forestal el permanente peligro de fuego, buscando minimizar las posibles consecuencias sin dejar de lado el objetivo económico de maximizar las utilidades obtenidas. A este enfoque se le llama Fire Smart Forest Management[27].

El manejo inteligente ante el fuego tiene por objetivo usar las prácticas de gestión de bosques de forma planeada y proactiva de modo de reducir las áreas quemadas frente a incendios no deseados.

Todo el trabajo se basa en la modificación del bosque presente en el paisaje. De esta forma, se modifica sus características de inflamabilidad [49]. Esto se logra mediante la extracción o cosecha de determinadas áreas que generan barreras para el fuego perturbando la continuidad del paisaje

Este paradigma de manejo del bosque posee un triple objetivo que busca cumplir:

1. Disminuir el potencial del comportamiento del fuego
2. Reducción del potencial de igniciones
3. Aumentar la capacidad de supresión del fuego, esto es, una mejora en las condiciones para enfrentar un potencial incendio

En el contexto del *FSFM*, varios investigadores han hecho estudios sobre cómo la intensidad y la gravedad de los incendios forestales pueden reducirse a través de actividades de manejo de combustible.

Además, Salis [48] evaluó estrategias de tratamiento de combustible para reducir pérdidas potenciales, donde los tratamientos se definen por la probabilidad de quema, la longitud de la llama o el tamaño del incendio forestal. Sin embargo, como señala Chung [10], en planificación forestal, encontrar la distribución óptima del tratamiento en un paisaje en múltiples períodos de tiempo no es una tarea sencilla, principalmente debido a la complejidad intrínseca del cómputo, ya que incluye restricciones que son prácticamente imposibles de resolver por optimización directa. Este último también revisa los diferentes sistemas de apoyo a las decisiones (O DSS por sus siglas en inglés) para la planificación del tratamiento del combustible. Finalmente, otros estudios han abordado cómo encontrar la asignación espacial óptima de las actividades de quema prescritas [33]; o para el diseño de cortafuegos en el control de la propagación de incendios [46].

Dentro de las medidas que se pueden implementar para integrar los conceptos de protección ante incendios y planificación forestal una buena opción es la creación de un programa de cosechas en el largo plazo que signifique no sólo sacar provecho económico

de la cosecha de madera al cumplir una demanda, sino que también hacerlo a medida que se minimizan las probabilidades de expansión de un incendio. Sin embargo, es un problema que incluye muchas variables y los objetivos de maximizar ganancias y minimizar las pérdidas por incendios pueden ir en direcciones opuestas en el largo plazo. Esto conlleva una difícil resolución, no solo desde el punto del modelado, sino también desde la dificultad computacional, por lo que una buena aproximación son las heurísticas de corte que usan reglas y resuelven el problema global desde una perspectiva más local o buscando métricas en ayuda a la toma de decisiones.

Para lograr esto, lo primero es lograr entender la dinámica de la propagación de los incendios. Se procederá a explicar los principales modelos que son usados para describir el comportamiento del fuego y a partir de eso establecer y analizar una propuesta de solución.

## 2.2. Modelos de Propagación de fuego

El fuego es el producto de una reacción química llamada combustión y que ocurre al nivel molecular, por lo tanto analizarlo es difícil, y más aún predecir la evolución de un incendio cuando este ocurre.

Una vez iniciada una ignición la propagación de un incendio es un proceso complejo, donde interactúan procesos químicos y físicos. La química guarda relación con la reacción de combustión y sus efectos, como la intensidad calorífica que puede llegar a generar el fuego del incendio. Mientras que la física guarda relación con cómo se expande el foco de fuego, definiendo los caminos que sigue y la velocidad de propagación según las condiciones presentes.

Los principales factores que determinan la propagación del fuego en un incendio forestal son tres: el combustible presente, las características topográficas del terreno donde se produce y las condiciones climáticas en el lugar mientras el fuego se propaga. Todos ellos interactúan y determinan la probabilidad de ignición y cómo el fuego se propaga, en especial se ha estudiado como afectan la *velocidad de propagación del fuego*, también llamado **ROS** por las siglas en inglés para *Rate of Spread*, que se define como la velocidad de propagación de fuego en el frente del incendio (en la dirección del viento).

En breves palabras se describe cómo estos factores influyen en la propagación del fuego:

### *Combustible*

Se le llama combustible a cualquier elemento, que, dada una combustión, es capaz de liberar energía en forma de calor.

Pero cuando se habla en términos forestales, combustible se refiere a los tipos de biomasa presente que se pueden llegar a quemar en un incendio. Depende de la vegetación presente las características del combustible, pues producto de la existencia de ciertos árboles el suelo se puede tornar más seco debido al agua que estos consumen, o también variará la presencia y cantidad de de ramas en el suelo.

De esta manera, la existencia de unos u otros combustibles dispondrá las bases para una eventual propagación del fuego, determinando la factibilidad de ignición y las propiedades de la combustión resultante, como también los niveles de energía liberada, la velocidad de propagación o la intensidad de las llamas.

Debido a la amplia variedad de combustibles que existen en el mundo, su presencia en determinados lugares y la necesidad de estudiar el fenómeno de la propagación del fuego se han creado los llamados *Modelos de Combustible* que buscan resumir esta información. Más adelante, en la sección 2.3 se abordarán con más detalle.

### *Clima*

Las condiciones meteorológicas existentes afectan directamente las probabilidades de ignición en el combustible presente mediante la interacción con éste. En específico, factores como la temperatura, humedad relativa y la presencia de precipitación o no, modifican los niveles de humedad en los combustibles, alterando las propiedades básicas del combustible que definen la combustión resultante.

Además, otro factor importante del clima es el viento, la dirección de este determina en qué sentido se propaga el fuego con más facilidad y a mayor magnitud de la velocidad del viento también es mayor la propagación del fuego.

### *Topografía*

Las características topográficas, en especial la elevación, pendiente y orientación del terreno, impactan en la propagación del fuego a través de su interacción con los factores climáticos, pues según las propiedades del terreno se ven acrecentadas o disminuidas los efectos que estos producen, en especial en el efecto del viento sobre el ROS.

### 2.2.1. Tipos de modelos

Dependiendo el enfoque los modelos de propagación de fuego se pueden dividir en tres tipos: físicos o cuasi físicos [50], empíricos o cuasi empíricos [51] y análogo matemáticos y modelos de simulación [52], a continuación se define cómo se caracterizan.

#### *Físicos y Cuasi Físicos*

En un incendio están involucrados procesos químicos a nivel de moléculas que generan la combustión y luego se involucran procesos físicos que determinan la expansión de la combustión. Los modelos físicos intentan representar la física y la química de la expansión del fuego a través de la teoría aplicada. Para esto ocupan ecuaciones diferenciales para describir el proceso de propagación, lo que los hace bastante complejos.

Mientras que los cuasi-físicos sólo se concentran en la física de la expansión del incendio, dejando de lado la química referente a los procesos de combustión que describen la transmisión del calor.

Estos modelos, dado el pequeño orden de magnitud con el que analizan el fuego, son difícilmente aplicables a la hora de modelar grandes incendios o grandes paisajes, por lo que no son los adecuados al momento de analizar incendios forestales o estudiar decisiones operacionales o estratégicas en un bosque.

#### *Empíricos y Cuasi Empíricos*

Los modelos empíricos se establecen sólo a partir de la observación y experimentación. A través de esto establecen las características fundamentales de la vegetación que determinan el comportamiento del fuego y se analizan las relaciones entre ellas.

Y los cuasi empíricos se desarrollan a partir del estudio de datos obtenidos mediante experimentación y observación, se analizan en un marco físico y para establecer

relaciones entre las variables presentes.

Estos modelos han sido usados principalmente para estimar el peligro potencial de incendio en diversas zonas mediante el análisis de las condiciones presentes y así ayudar en la prevención y lucha contra los incendios.

Sin embargo, estos modelos son unidimensionales y usan como variable dependiente la velocidad propagación del frente de fuego (ROS), por lo que se hace difícil cómo se expandirá el incendio bajo condiciones heterogéneas.

### *Modelos de Simulación y de Analogía Matemática*

Los modelos de simulación han sido creados con la finalidad de dar una respuesta más práctica, fácil de implementar y analizar, y que además entregue información en tiempo real frente a algún incendio y su propagación. Esto, a través de la reproducción de escenarios de fuego que usan determinados datos (reales o ficticios) sobre la zona a estudiar y que determinan la propagación del fuego, como lo son geografía, clima y combustible presente.

Como ya se mencionó los modelos empíricos son unidimensionales y sólo predicen la propagación del fuego en la dirección del viento, por lo que es necesario extender ese conocimiento a todas las dimensiones de una superficie para representar la expansión real de un incendio, buscando reproducir el área potencialmente afectada. Por lo que los modelos de simulación normalmente toman como base algún modelo físico o empírico del cual interpolan la propagación del fuego en otras direcciones.

Por otra parte, los modelos por Analogía Matemáticos han sido creados sin basarse explícitamente en la literatura correspondiente a la propagación propia del fuego ni sus procesos químicos y físicos, sino usando conceptos matemáticos que se adaptan a la naturaleza de expansión del fuego a través de procesos y funciones análogas, el más usado de estos modelos es el de Celular Automata que se describirá en el punto 2.2.4.

Diferentes softwares se han creado con el objetivo de simular escenarios de incendio usando estos modelos, se dará mayor profundidad a estos en la sección 2.4.

---

Dado los puntos anteriormente descritos y las características del problema a abordar,

donde se buscan tomar decisiones en el largo plazo, los modelos de simulación son los idóneos para usar en el estudio, ya que permiten probar diferentes estrategias que con otros métodos de experimentación sería imposible lograr.

A continuación se presentan los modelos de propagación de fuego que coinciden con este tipo de modelos y que son incorporados para la propuesta de solución del problema.

### 2.2.2. Modelo de Rothermel

Este modelo está basado en el principio de balance de calor desarrollado por Frandsen [21] y fue creado por Rothermel en 1972 [43] y Albini, en 1976 [2] introdujo algunas pequeñas modificaciones sobre éste. Es considerado un modelo cuasi empírico [5] ya que se usaron experimentos analizados bajo un marco teórico para desarrollarlo.

Fue inicialmente usado para estimar índices de peligro de fuego en Estados Unidos, y luego, para predecir el comportamiento del fuego en incendios [44]

El modelo está descrito por la ecuación:

$$R = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}} \quad (2.1)$$

Donde:



$R$	=	Velocidad de Propagación - ROS ( $m/min$ )
$I_R$	=	Intensidad de la reacción, energía liberada en el frente del incendio por unidad de área y de tiempo ( $kJm^{-2}min^{-1}$ )
$\xi$	=	Proporción de la intensidad de reacción que calienta a las partículas adyacentes de combustible hasta la ignición
$\Phi_w$	=	Coefficiente de viento
$\Phi_S$	=	Coefficiente de pendiente
$\rho_b$	=	Densidad aparente del combustible ( $kg/m^3$ )
$\varepsilon$	=	Número de calentamiento efectivo, representa la proporción de partículas de combustible que se calientan hasta la temperatura de ignición en el momento que éstas se inflaman
$Q_{ig}$	=	Calor de preignición, energía necesaria para que una unidad de masa de combustible llegue a la ignición ( $kJ/kg$ )

Este modelo ha sido ampliamente utilizado para generar otros modelos de simulación, sin ir más lejos Sullivan analizó 14 modelos de simulación [52], y el modelo de Rothermel era el principal modelo usado en 9 de ellos como base para interpolar y generar modelos tridimensionales.

### 2.2.3. Principio de Huygens y propagación elíptica

En 1690 los físicos Christiaan Huygens y Augustin-Jean Fresnel formularon un principio para explicar la propagación de las ondas de luz [28] que se enunciaba de la siguiente forma:

*"Todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden"*

No fue hasta 1982 que fue tomado por Anderson et. al para explicar cómo se propaga el fuego [4], en este contexto se toma cada punto del perímetro de fuego como un nuevo foco de expansión y la expansión de este nuevo foco depende de las condiciones presentes en ese punto y el perímetro final de fuego es la suma de los bordes externos de todos los focos de propagación. Sin embargo, en vez de usar ondas esféricas, como el principio

original, las ondas de expansión usadas para el fuego son elípticas, ya que, como describió Van Vagner en 1969 [55], al considerar un incendio en condiciones homogéneas, sobre un terreno plano, este se expande el forma de elipse, con uno de sus focos en el punto de ignición y el semieje mayor en la misma dirección del viento.

La geometría de la elipse propagada está determinada por la velocidad de propagación en la dirección del viento (ROS) según lo predicho por el modelo de propagación de fuego elegido y una relación longitud/anchura adecuada.

Este modelo, unido a otros de predicción del ROS ha servido de base en varios en modelos simulación, es de notar que los simuladores con mejores resultados en el mundo: Farsite y Prometheus (de los cuales se hablará más adelante) incorporan este principio.

#### 2.2.4. Autómata Celular

El concepto de Autómata Celular fue creado en 1966 por von Neumann [56]. Consiste en un modelo discreto, tanto en tiempo como espacio usado principalmente para modelar sistemas o procesos naturales donde la interacción entre agentes locales afecta el estado de los otros. Se caracteriza principalmente por la utilización de una matriz o grilla espacial dividida en celdas que interactúan entre ellas, el estado de cada celda cambia en tiempos discretos dependiendo del estado de su vecindad en el periodo anterior.

Las cinco principales características que definen a un sistema Autómata Celular son:

1. Un número determinado de dimensiones espaciales  $N$
2. El ancho de cada lado de la matriz  $w$  donde  $w_j$  es el ancho hacia el lado  $j = 1, 2, 3...n$
3. El ancho de la vecindad de la celda ( $d$ ), donde  $d_j$  es el ancho del vecindario en hacia el lado  $j$  de la matriz
4. Un estado para cada celda
5. Una regla local que puede ser una función  $F$  arbitraria, normalmente se usa la

misma función para toda la grilla.

No fue hasta 1994 cuando Clarke [11] propuso un modelo espacio-temporal para predecir el comportamiento del fuego usando el concepto de Autómata Celular, sin embargo, el modelo desarrollado en 1997 por Karafyllidis y Thanailakis [31] se acerca más a los modelos modernos, pues ocupa el modelo de principio de Huygens para determinar la geometría de la propagación del fuego, ya sea en combustible homogéneos o heterogéneos.

El modelo que propusieron consistió en que teniendo una distribución de probabilidad de la tasa de propagación del fuego sobre la superficie estudiada ( $R(i, j)$  para la celda  $(i, j)$ ) y el estado del fuego en un momento  $t$ , junto a la dirección y velocidad del viento, la pendiente y forma del terreno determinarán el estado del fuego en el momento  $t' > t$ .

El estado de una celda  $i, j$  quedaría determinado por la proporción entre el área quemada y no quemada, de la forma:

$$S_{i,j}^t = \frac{A_b}{A_t}$$

donde:

$$\begin{aligned} S_{i,j}^t &= \text{estado de la celda } (i, j) \text{ en el tiempo } t \\ A_b &= \text{área quemada de la celda} \\ A_t &= \text{área total de la celda} \end{aligned}$$

Con esta definición de estado claramente se puede identificar que  $S_{i,j}^t = 0$  representa una celda no quemada y  $S_{i,j}^t = 1$  identifica a una celda totalmente quemada.

Las condiciones meteorológicas fueron incluidas de manera indirecta en la tasa de propagación  $R(i, j)$  de cada celda y esta tasa determina el tiempo necesario para que la celda se queme por completo.

El que haya una distribución de probabilidad de la tasa de propagación sobre la superficie ayudó a lograr que el modelo fuera capaz de modelar situaciones de combustible y terreno heterogéneos.

Trabajando en un plano de dos dimensiones espaciales, y un ancho de una celda en cada sentido.

El estado de cada celda  $(i, j)$  es determinado por sus 8 celdas adyacentes, donde las celdas no diagonales (N-S-E-O) tendrían mayor incidencia en el estado de la celda que las celdas diagonales (NE, NO, SE, SO) (Ver figura 2.1) y el efecto del viento y la pendiente fueron incluidos mediante pesos sobre el efecto de las correspondientes celdas vecinas según la dirección de la propagación.

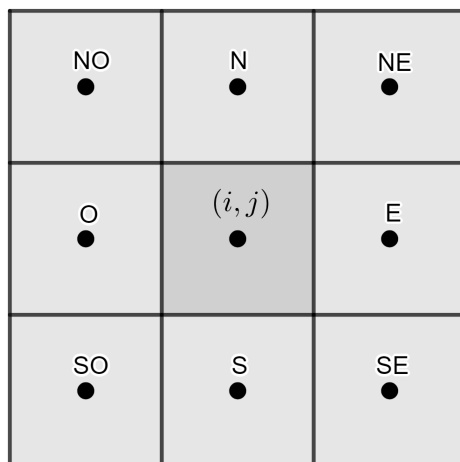


Figura 2.1: Vecindad de una celda identificada según los puntos cardinales

Es de notar que los tres modelos anteriores no son necesariamente contrapuestos, sino normalmente son complementarios y que juntos son la base de algunos simuladores de incendios.

### 2.3. Modelos de Combustible

Uno de los factores clave en la expansión del fuego es la vegetación presente en el lugar de ignición, dependiendo de las características geográficas y climáticas de la zona el tipo de flora presente puede variar mucho, lo que provocará diversas condiciones de flamabilidad si es que llegan a quemar. Por consiguiente, para describir tales características diferentes instituciones en el mundo han creado *modelos de combustible* para caracterizar la vegetación presente en su contexto.

Según la definición de Rothermel [43] un modelo de combustible contiene un conjunto

de parámetros para modelar matemáticamente la propagación del fuego y determinan la velocidad con que se propaga según el combustible presente.

La mayoría de los modelos de combustible describen la vegetación según los siguientes factores:

- Cantidad de combustible
- Tamaño y forma
- Compactación y densidad aparente
- Continuidad horizontal y vertical
- Densidad de madera
- Sustancias químicas presentes
- Humedad del combustible

Así, dependiendo de la vegetación disponible en cada área las instituciones encargadas de la protección forestal de algunos países han diseñado modelos de combustible de acuerdo a su contexto. Los más destacados son:

### **Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System**

Es parte del Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS)[53], desarrollado por el Canadian Forest Service, que se divide en dos sub-sistemas mayores: el Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System y el Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System.

El FWI System sirve para analizar las condiciones climáticas y a partir de la lectura éstas es capaz de estimar 6 factores que resumen el riesgo potencial de incendio según un combustible estándar. Tres de estos factores analizan la humedad presente en los combustibles, mientras que los otros son índices de comportamiento del fuego y sus valores aumentan a medida aumenta el riesgo de incendio.

Mientras que el FBP System, en palabras del Ministerio de Recursos Naturales de Canadá:

*"Proporciona estimaciones cuantitativas de la velocidad potencial de propagación del incendio, el consumo de combustible y la intensidad de llama, así como descripciones de incendios. Con la ayuda de un modelo elíptico de*

*crecimiento de incendios, proporciona estimaciones del área de incendios, el perímetro, la tasa de crecimiento del perímetro y el comportamiento del fuego de flanco y trasero".*<sup>1</sup>

De esta manera el FBP System divide la vegetación en 16 modelos, o tipos de combustible que están clasificados en 5 grupos: coníferas, caducos, madera mixta, recortes o ramas (residuos de la tala) y combustible abierto (Como pasto o arbustos).

## **BEHAVE**

Behave es un sistema de modelado de combustibles y comportamiento de incendios forestales que desarrollado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos para proporcionar predicciones de comportamiento de incendios forestales en tiempo real a gran escala o incendios naturales prescritos basado en el modelo de propagación de Rothermel.

El sistema de combustibles [6] cuenta con 13 modelos estándar y la capacidad de personalizar modelos de combustible específicos del sitio.

## **2.4. Simuladores**

El tratamiento del paisaje involucra escalas espaciales que hacen prácticamente imposible la evaluación de estrategias mediante la experimentación con incendios reales por los riesgos que esto implica. De modo que, para sobrellevar esta limitante se han creado softwares que ocupan modelos de simulación de propagación de incendios, que presentan una alternativa útil al diseñar tratamientos de combustible como una herramienta de planificación.

Estos normalmente se basan en los principios de propagación ya nombrados, como el Modelo de Hyugens o de Rothermel para establecer las bases de la simulación.

---

<sup>1</sup>De la página del Ministerio de Recursos Naturales de Canadá <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fbp>

### 2.4.1. Tipos

Para la representación de la expansión del fuego hay dos enfoques principales: los del tipo vectorial, que representan la expansión de un incendio a través de un perímetro cerrado que muestra la marca del fuego y los del tipo raster, que dividen el área analizada en una grilla de celdas de igual tamaño y que muestra las celdas quemadas y las que no a través de una matriz binaria. Sin embargo, ambas formas de representación pueden ser obtenidas en función de la otra y la mayoría de los simuladores tienen implementados ambos enfoques.

Lo que diferencia a unos de otros es el enfoque de simulación que ocupan[39]. En este sentido se pueden reconocer tres tipos: Celular Automata, Sistemas de Eventos Discretos (DEVS, Discrete Events System) o los que combinan ambos, llamados Cells-DEVS[35].

### 2.4.2. Simuladores destacados

Existen variados softwares creados con el fin de simular el comportamiento del fuego en incendios forestales, sin embargo, los que sobresalen sobre el resto son *Prometheus*, *Farsite* y *Wildfire Analyst* que se describirán a continuación.

#### **Prometheus**

Prometheus [54] es un simulador de crecimiento de fuego determinista creado por el Centro Interinstitucional Canadiense de Incendios Forestales. Sus modelos se basan en el sistema Canadiense de Clasificación de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS).

El modelo calcula el comportamiento del fuego espacialmente explícito y las salidas de dispersión dado el combustible, la topografía y las condiciones climáticas heterogéneas. Todas las salidas espaciales son compatibles con los sistemas de información geográfica.

Para simular los incendios necesita de información detallada de las condiciones climáticas y topográficas del terreno, además de un mapa de los combustibles presentes. Para esto se apoya en el uso de sistemas de información geográfica (GIS).

Usa el modelo de onda de Hyugens para determinar cómo se propaga el fuego, esto unido a los modelos de comportamiento del FBP System.

### **Farsite**

Farsite [16] [17] es un sistema de simulación de propagación de incendios usado ampliamente por instituciones federales de manejo de suelos en los Estados Unidos y es capaz de simular fuego bajo condiciones heterogéneas de terreno, combustible y clima.

Está basado en BEHAVE, un modelo de predicción del comportamiento del fuego que a su vez es basado en el principio de Rothermel visto en la sección 2.2.2

Al igual que Prometheus, Farsite admite datos de entrada basados en GIS y genera outputs en el mismo formato.

Sin embargo, pese a ser considerado el mejor simulador de expansión de incendios, la última versión de Farsite fue liberada en 2008.

### **Wildfire Analyst**

Este es un simulador comercial desarrollado por Tecnosylva<sup>2</sup> y está enfocado en el análisis en tiempo real de incendios para ayudar los procesos de supresión.

Tiene varios modelos de propagación de fuego incluidos, incluso el modelo empírico Chileno **Kitral** [30], sin embargo, el modelo que ocupa por defecto es el de Rothermel.

Al igual que los simuladores anteriores ocupa archivos de entrada basado en sistemas de información geográfica.

---

Sin embargo, pese a lo bien evaluados que están estos simuladores cuando un tercero requiere usarlos para evaluar y generar planes de manejo del bosque les es difícil obtener resultados exactos o útiles, debido a la dificultad de obtener mapas de combustible precisos y la falta de la adecuada calibración de los modelos utilizados. Además no poseen funciones que permitan evaluar un tratamiento sistemático del bosque a través del tiempo, ya que sólo están enfocados en predecir el comportamiento del fuego y no en

---

<sup>2</sup><https://tecnosylva.es/>



el estudio de tratamientos del bosque, y, por lo tanto, se orientan su uso a simulaciones independientes.

### 2.4.3. Cell2Fire

Para la investigación a realizar se decidió utilizar el simulador *Cell2Fire* [37], que pese a ser bastante reciente posee características claves para modelar el problema de planificación de cosechas.

*Cell2Fire* es un simulador estocástico de propagación de incendios basado en un sistema Automata Celular y que gracias al uso de la computación paralela es capaz de simular instancias a gran escala. El simulador incluye modelos de combustible y de clima basados en el Canadian Fire Behavior Prediction (FPB) System [25] e incorpora el principio Huygens de propagación además del fuego en forma de elipse a nivel celular.

Las grandes ventajas de esta herramienta versus las anteriormente descritas son tres:

1. La inclusión de funciones que hacen más fácil y óptima la simulación de diversas situaciones. En especial la integración con modelos de decisión de cosecha y la posibilidad de evaluar estrategias sistemáticas y en diferentes períodos respecto a la planificación de cosechas.

Esto debido a que se puede “guardar” el estado del bosque (y de cada celda) de un período a otro de simulación y lograr así un análisis multiperíodos.

2. Es una herramienta que permite la inclusión de modelos propios de combustibles debido a que permite calibrar [7] los modelos de propagación usados.
3. La posibilidad de incorporar la estocacidad del fuego en la simulación de incendios. Pese a que tiene la posibilidad de simular la propagación del fuego de forma determinista, posee la capacidad de incluir fuentes de incertidumbre que ayudan al análisis de escenarios de incendio. Esto quiere decir, que a diferencia de los simuladores antes mencionados, se pueden obtener diferentes resultados bajo las mismos parámetros de una simulación.

## Fuentes de incertidumbre

Como ya se mencionó, *Cell2Fire* entrega la posibilidad de incluir fuentes de incertidumbre para reflejar mejor la naturaleza propia de los incendios, aumenta la variabilidad en los parámetros necesarios para la simulación y, por lo tanto, genera alta diversidad en los escenarios disponibles, lo que mejora el análisis de decisiones bajo incertidumbre.

Para generar esto se introdujeron tres fuentes de incertidumbre que se describen a continuación.

### *Puntos de ignición*

El lugar donde se iniciará un incendio es, claramente, imposible de saber previo a alguna ignición, pero existen lugares más propensos que otros a incendiarse ya sea por sus características topográficas o de vegetación. Para integrar esta idea al momento de simular se introduce en cada instancia una distribución de probabilidad de ignición sobre el terreno.

La distribución que se introduzca dependerá principalmente de la causa a la que se atribuya el inicio del fuego, ya que pueden ser por causas naturales, como sucede con la caída de rayos, o provocados por intervención humana. En este último caso, se atribuye una mayor probabilidad de incendio a terrenos cercanos a caminos o asentamientos.

### *Variación aleatoria del ROS*

La velocidad con que el fuego se propaga depende de tres factores, las características topográficas del terreno, la vegetación que ahí reside y el clima presente a la hora de la ignición. Al momento de simular un incendio estas características se integran al simulador de forma simplificada, y, por lo tanto, el ROS resultante también lo es, no toma el error intrínseco de la simulación. Esto debido a las aproximaciones que se hacen sobre el terreno, combustible y clima. Por esto, se induce un coeficiente de variación que captura esta estocasticidad en la velocidad de propagación del fuego.

### *Escenarios de clima*

Se define un escenario de clima como un conjunto de datos dentro de un período determinado, de observaciones de los índices meteorológicos necesarios para simular un

incendio. Siendo estos: velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y presencia de precipitaciones. Diferentes escenarios provocarían que, dado un mismo punto de ignición, el fuego se propague de manera diferente.

Para capturar esto se pueden integrar una serie de escenarios de clima correspondientes al lugar donde la simulación tiene lugar, cada uno con una probabilidad de ocurrencia que proveerá al simulador de diferentes condiciones para la simulación.

Dadas las ventajas de *Cell2Fire* para la incorporación de modelos de decisión de corte y las fuentes de incertidumbre presentes en la simulación se ha seleccionado este simulador para desarrollar las fases de experimentación de este estudio.

	Prometheus	Farsite	Wildfire Analyst	Cell2Fire
Última actualización	2019	2008	2017	2019
Pago	Gratis	Gratis	De pago	Gratis
Modelo Matemático	Principio de Hyugens	Principio de Hyugens	Principio de Hyugens	Principio de Hyugens
Tipo de simulación	Determinística	Determinística	Determinística	Determinística o aleatoria
Modelos de combustible	FBP	Behave	Varios, con la posibilidad de agregar propios	FBP, con la posibilidad de agregar propios

Tabla 2.1: Tabla comparativa de simuladores

# Capítulo 3

## Cell2Fire

Para representar el problema de manera gráfica y trabajar con él es necesario establecer una base y definir algunos conceptos de cómo se propaga el fuego en *Cell2Fire*, ya que estos serán claves para entender cómo se modela el problema.

### 3.1. Estructura de Grafo

El problema es modelado usando teoría de grafos, donde se divide el bosque en una grilla de celdas iguales y estas se agrupan en rodales. Así, en lo que sigue, se asume:

- Las celdas  $i \in \mathcal{N}$  son nodos se identifican por sus posiciones geográficas y representan las coordenadas de su centro geométrico dentro del gráfico de cuadrícula global.
- Las celdas están conectadas por aristas generadas por la estructura intrínseca de la grilla que representa el bosque: las restricciones de adyacencia se reflejan por la presencia de estos bordes.
- Después de un incendio, teniendo las celdas del bosque son denotadas por  $i \in \mathcal{T} \subseteq \mathcal{N}$  en un grafo dirigido donde las aristas representan la propagación del fuego de una celda a otra. Cada arista posee las siguientes propiedades:
  - El tiempo de viaje  $t_{ij}[min]$  del centro de una celda  $i$  al centro de la celda  $j$
  - El tiempo de llegada  $t(j)$  a la celda  $j$

- El  $ROS_{ij}[m/s]$  efectivo al momento de una nueva ignición en el centro de una celda  $j$  propagada desde el centro de una celda  $i$
- El número de veces  $f_{ij}$  (de múltiples simulaciones) que la arista  $(i, j)$  ha sido atravesada por el fuego
- Los nodos también están asociados con atributos, como el total del volumen disponible,  $[m^3]$ , precio de venta por metro cúbico  $[\$/m^3]$ , costo de tratamiento o cosecha por área  $[\$/m^2]$ , tipo de combustible, etc.

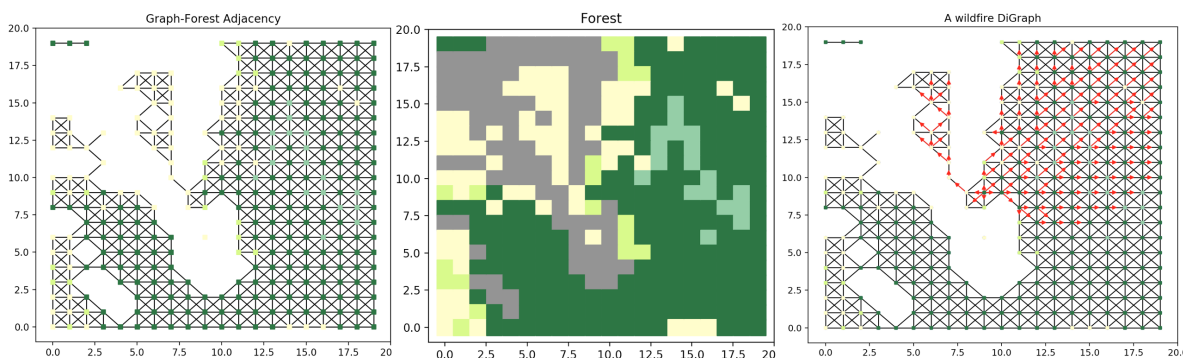


Figura 3.1: Representaciones gráfica de un bosque a través de un grafo

A la izquierda se observan los nodos y las correspondientes aristas que conectan las celdas adyacentes. Es de notar que no existen aristas entre celdas que no pueden propagar el fuego.

Al centro se observa una representación gráfica de los combustibles de la instancia, identificando cada celda con un color correspondiente al combustible presente.

A la derecha se observa el grafo después de un incendio. Las celdas rojas representan celdas quemadas y las aristas rojas corresponden a las aristas usadas efectivamente para la propagación del fuego

## 3.2. Propagación Cell2Fire

Este simulador ocupa como base un sistema Celular Automata para modelar la propagación del fuego, sin embargo, incorpora el principio de Hyugens.

Tal como se señala en la Sección 2.2.4, primero se definen 8 dimensiones espaciales para cada celda, una por cada celda adyacente. Todas las celdas tienen las mismas dimensiones.

*Cell2Fire* define 5 estados fundamentales para cada celda:

- Disponible: Son todas las celdas que pueden quemarse y, por lo tanto, tienen combustible disponible.
- Quemándose: Celdas que tienen fuego activo, esto es, no se han quemado por completa y son un foco de incendio.
- Quemada: Se refiere a las celdas donde el fuego no ha dejado combustible disponible.
- Cosechada: Corresponde a una celda donde los árboles han sido cosechados, y tampoco hay combustible disponible para la quema.
- Sin combustible: Son todas las celdas no inflamables, como caminos, rocas o con agua

Cuando una celda se encuentra en el estado *Quemándose*, se transforma en un foco de propagación de fuego.

Por ejemplo, como se ve en la Figura 3.2, cuando se inicia el fuego en una celda  $i$  se inicia la propagación del fuego en 8 direcciones, de la celda  $i$  a cada una de sus celdas adyacentes, siempre y cuando la celda esté “disponible” para quemarse, esto es, cuando el combustible de la celda adyacente es inflamable. En el caso de la Figura 3.2, el fuego no se propaga de la celda  $i_3$  ya que esta última no tiene combustible, esto se puede deber a que la celda ya fue quemada, en algún período anterior, ya ha sido cosechada o simplemente no es inflamable, como en el caso de que haya agua o un camino.

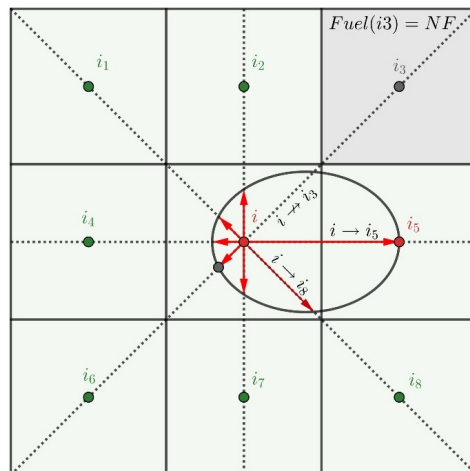


Figura 3.2: Inicio de la propagación de un incendio en Cell2Fire

La velocidad con que cada vector se propaga depende de los factores ya mencionados,

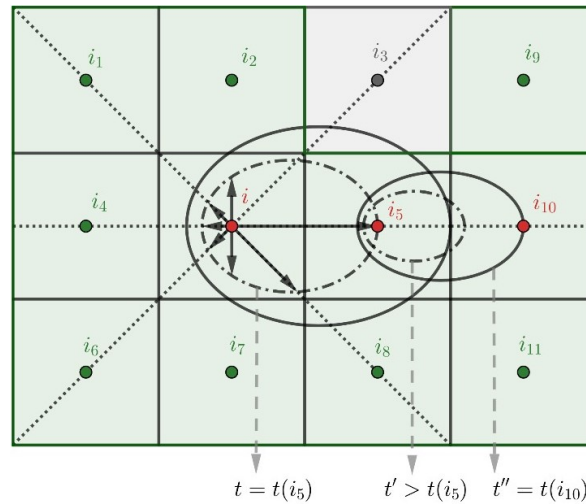


Figura 3.3: Principio de Huygens en Cell2Fire

Una vez una celda es alcanzada por el fuego empieza a actuar como un nuevo foco de incendio.

pero conserva la forma de elipse dada por el principio de Huygens.

una vez uno de los vectores de propagación alcanza el centro de una celda adyacente esta se considera quemada y se convierte en un nuevo foco de fuego, proyectando vectores de propagación a sus celdas adyacentes.

Esto se puede apreciar en la Figura 3.3, uno de los vectores de la celda  $i$  alcanzó el centro de la celda  $i_5$ , y esta se transforma en un nuevo foco para la expansión del fuego.

Es de notar que más de una celda pueden estar propagando el fuego a una misma celda objetivo, por ejemplo, en la figura 3.3, hipotéticamente, las celdas  $i_8$ ,  $i_9$  e  $i_{11}$  podrían estar propagando el fuego al mismo tiempo hacia  $i_{10}$ , pero, para efectos prácticos de análisis se considera que el fuego se propaga desde la celda que primero alcanza el centro de la celda objetivo.

### 3.3. Árboles de propagación

Basado en la idea de la sección anterior de que *Cell2Fire* determina desde qué celda se propaga el fuego a otra, se crea el concepto de Árbol de propagación [8], que será útil en el estudio más adelante.

**Definición 3.1** Se dice que  $\mathcal{T}_i = (N_i, E_i)$  es el “Árbol de propagación” de la celda  $i$  si:

- $i \in N_i$  es la raíz del árbol  $\mathcal{T}_i$ , donde  $N_i = \{j : i \rightarrow j\} \cup \{i\}$ .
- $E_i = \{(k, j) : k, j \in N_i, k \leftrightarrow j\}$  donde  $\leftrightarrow$  representa la presencia de una arista entre las celdas  $k, j$  debido a la propagación de un mensaje de incendio durante el incendio forestal simulado (relación de adyacencia).
- Cada arista  $e = (k, j) \in E_i$  está asociada a un peso  $w_{(k,j)} = (t_{kj} = t(j) - t(k), ROS_{kj}, f_{kj})$  incluyendo el tiempo de viaje entre celdas, ROS efectivos durante el nuevo encendido y la frecuencia de uso (dependiendo del número de repeticiones). Entonces,  $\mathcal{T}_i = (N_i, E_i)$  es un grafo de árbol.

Usando las definiciones previas, se puede representar cualquier marca de fuego como un grafo (ver figura 3.4) que contiene todos los caminos más cortos de la dinámica de propagación del fuego entre celdas. Las flechas rojas indican las aristas por donde el fuego se propagó. La raíz  $i$  del árbol  $\mathcal{T}_i$  corresponde al punto de ignición del fuego. Un sub-árbol  $\mathcal{T}_j \subset \mathcal{T}_i$  puede ser obtenido para cualquier celda  $j \in \mathcal{T}_i : j \neq i$ . Esto proporciona la flexibilidad y potencial para analizar los incendios usando teoría de grafos.

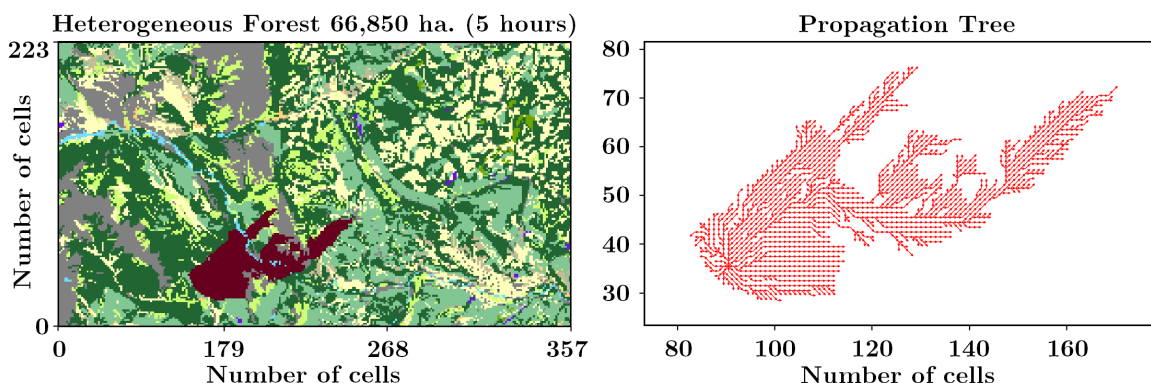


Figura 3.4: Árbol de propagación de una simulación de incendio

El concepto de Árbol de propagación es, aunque simple, muy poderoso. Dada cualquier celda  $i \in \mathcal{N}$  dentro del bosque, resume la dinámica de propagación del fuego durante una simulación. Por lo tanto,  $\mathcal{T}_i$  contiene todas las celdas  $j$  que se queman en el paisaje debido a la participación de  $i$  en el incendio:  $i$  es el punto de partida de todo el crecimiento del incendio. Dentro de  $\mathcal{T}_i$  y, por lo tanto, desempeña un papel fundamental



en el encendido de cada celda  $j \in \mathcal{T}_i : j \neq i$ .

En el contexto de múltiples simulaciones, la presencia de una celda  $i$  en varios árboles, así como el tamaño de su propio árbol  $\mathcal{T}_i$  provee información relevante con respecto a la importancia estadística de la celda en el simulado la dinámica del crecimiento del fuego. Mediante el análisis de indicadores como su impacto económico potencial en el paisaje, la probabilidad de ignición o quema, o la obtención de información con respecto a su incidencia (y su magnitud) en el área global quemada dentro del bosque. Además, se introduce el concepto de **Árbol de propagación global**, que es el árbol generado a partir de la superposición de todos los árboles individuales de  $n$  simulaciones.

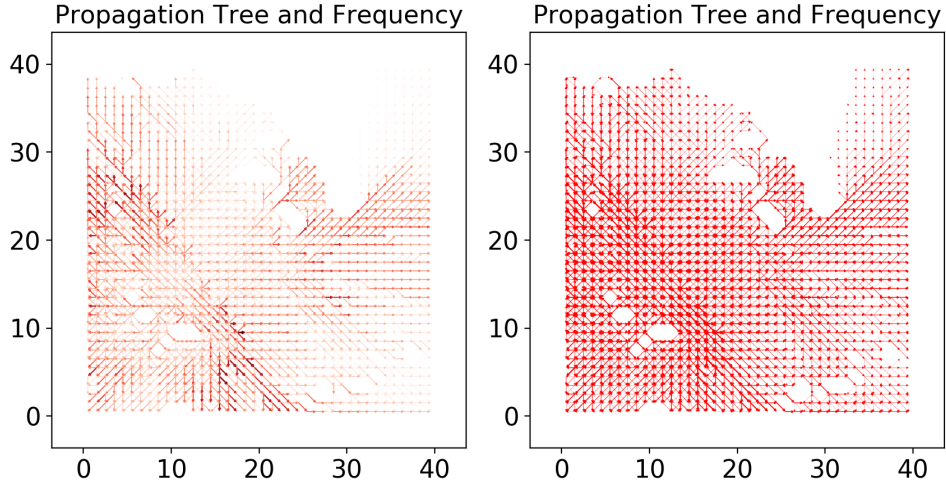


Figura 3.5: Ejemplo gráfico de un árbol de propagación global

**Definición 3.2** Se define el grafo  $\mathcal{GT}_R = (N_R, E_R)$  como el “**Árbol de propagación global**” después de  $R$  repeticiones se obtiene:

- El conjunto  $N_R := \cup_{r \in R} N_r$  contiene todos los nodos quemados de todas las  $R$  repeticiones.
- $E_R := \cup_{r \in R} E_r$ , el conjunto de todas las aristas atravesadas por en fuego en el total de simulaciones.
- Los pesos  $w_{(i,j),R} := (t_{(i,j),R}, ROS_{(i,j),R}, f_{(i,j),R})$  asociados a cada arista  $(i, j) \in E_R$  donde:

$$- t_{(i,j),R} = \sum_{r \in R} \frac{\mathbb{1}_{(i,j) \in E_r} t_{ij,r}}{|R|} \text{ es el promedio de tiempo de viaje entre los nodos } i \text{ y } j.$$

- $ROS_{(ij,R)} = \sum_{r \in R} \frac{\mathbb{1}_{(i,j) \in E_r} ROS_{(ij,r)}}{|R|}$  el promedio de ROS efectivo cuando el fuego llega al centro del nodo  $j$  desde  $i$ .
  - $f_{ij,R} = \sum_{r \in R} \mathbb{1}_{(i,j) \in E_r}$ , el número de veces que  $(i, j)$  es atravesado por el fuego en el total de simulaciones.
- 

Todos los conceptos definidos en este capítulo serán de vital importancia a la hora de modelar y tratar de buscar una solución al problema que se está estudiando, en especial la estructura de grafo que ocupa el simulador y el concepto de árboles de propagación dan una perspectiva diferente para analizar el problema, que será aprovechada en la siguiente sección.

# Capítulo 4

## Propuesta de Solución

Hay que recordar que el objetivo de la investigación es integrar el peligro de incendio en un programa de cosechas con el fin proteger el bosque, y para esto se plantea modificar el paisaje de forma sistemática, período a período en un horizonte de planificación táctica  $T$ . Así, se debe evaluar el beneficio de cosechar o aplicar algún tratamiento a una celda o sección dentro del bosque.

Para evaluar esto se pueden utilizar múltiples criterios, como el valor económico de las celdas, costos de accesibilidad, su impacto en la salud de los ecosistemas y, principalmente, su papel durante un posible incendio forestal en términos de propagación y diseminación del fuego de una zona a otra.

Además, dada la naturaleza impredecible de los incendios, es necesaria la inclusión de múltiples escenarios probables para hacer un análisis que refleje mejor la realidad. Por lo tanto, se trabajará considerando el **Beneficio Esperado** de aplicar un sistema de tratamiento sistemático en el bosque.

En este punto, surgen dos preguntas relevantes si se quiere proteger el bosque: ¿Qué celdas se deben cosechar cada período? y ¿Cómo se clasifican para elegir qué cortar primero? Para intentar responderlas es que se recurrirá a la base de una formulación de flujo de red donde el fuego se propaga entre nodos que representan diferentes unidades básicas de área del bosque, explotando la representación de la estructura del grafo subyacente de la dinámica de crecimiento del fuego obtenida de *Cell2Fire*

Sobre la base de una formulación de flujo de red donde el fuego se propaga entre nodos que representan diferentes unidades del bosque, se introduce e implementa una serie de métodos utilizando el modelo propuesto, explotando la representación de la estructura del gráfico subyacente de la dinámica de crecimiento del fuego obtenida de *Cell2Fire*. Además, se exploran y adaptan los enfoques tradicionales de trabajos anteriores, que se describirán en las secciones siguientes.

## 4.1. Problema Multietapas

El problema debe abarcar un horizonte de tiempo al que se denominará  $T$ . En cada período se debe tomar la decisión de qué cosechar y se asume que los incendios ocurren entre períodos y no interrumpen la cosecha. Sin embargo, los incendios son una variable aleatoria y se deben tomar decisiones en función de ésta, ya que modifican el bosque, y, por lo tanto, el espectro de decisiones posibles.

Es importante denotar que, por simplicidad, sólo se considerará la cosecha como tratamiento posible para este trabajo, ampliar el espectro de decisiones respecto a qué tipo de tratamiento<sup>1</sup> usar en cada celda sería complicar demasiado el problema en una primera instancia, por lo que se deja propuesto para algún trabajo posterior.

Por último, se asume también, que al cosechar una celda esta no se podrá quemar ni propagar fuego en períodos siguientes, esta suposición se hace en base a que se considerará la cosecha como una *Tala Rasa* [36], que es la práctica más común al momento de cosechar en la industria forestal, y se refiere a cortar de raíz toda la vegetación en un área determinada.

Es una practica muy usada debido a que los altos rendimientos por unidad de área potencialmente reducen los costos de cosecha y cortar todos los árboles facilita la preparación del sitio para controlar las plagas y la vegetación competitiva, mejorar los semilleros y mejorar las deficiencias del suelo. Pero la característica más importante es que deja el terreno inhabilitado para el crecimiento de vegetación, a menos que se planten. Por lo tanto, hace este tratamiento ideal para este estudio, pues se asegura que no se producirán incendios en las celdas una vez que estas son cosechadas.

---

<sup>1</sup>Otros tratamientos se puede referir a: raleo, control de malezas, quemas prescritas, etc



Figura 4.1: Esquema de temporalidad y relación bosque-cosecha-incendios

Como se puede apreciar en la Figura 4.1 la configuración del bosque en un período de tiempo depende de la cosecha y los incendios que hayan ocurrido en el período anterior. Ambas acciones modifican no sólo la estructura del bosque en términos de la vegetación que allí hay, sino también en las características de ellos. La presencia o no de vegetación en ciertas áreas puede alterar las propiedades del bosque en cuanto a la propagación del fuego se refiere.

De esta forma, período a período se debe actualizar la métrica usada para la toma de decisiones, usando la estructura de propagación descrita en la Sección 3.2, En cada período se procede a *desconectar* la parte del grafo que se ha quemado o ha sido cosechada en el período anterior.

Para lograr tomar una decisión de corte se hará un ranking con las celdas, identificando cuáles son las que más beneficio reportan en términos de protección del bosque, de esta manera, se cosecharían primero las celdas que mayor beneficio reporten, siempre que cumplan con las restricciones del problema.

El desafío es crear un Sistema de Soporte a Decisiones (DSS) que genere mejores resultados en el largo plazo. Para esto se seleccionaron algunos índices de la bibliografía relacionada que servirá de apoyo a la toma de decisiones. Estos son:

- Probabilidad de Quemado (BP)
- Betweenness Centrality (BC)
- Fire Protection Value (FPV)
- Downstrem Protection Value (DPV)

A su vez, el resultado del uso de estos factores serán comparados con los obtenidos por un decisor que no considera el riesgo de incendios, y, por lo tanto, período a período va cosechando lo que mayor beneficio le otorga en términos económicos.

A continuación, se describen los factores elegidos para el desarrollo de esta investigación.

## 4.2. Mapas de probabilidad de incendio

Frente a un eventual incendio no todos los lugares tienen la misma posibilidad de que se inicie una ignición, existen características que hacen de ciertas zonas más propensas que otras a ser quemadas. Esto se puede expresar en mapas que describan este riesgo según zona.

Estudios pasados sobre el tratamiento de combustible para reducir el impacto de posibles incendios consideraban la probabilidad de ignición uniforme y estacionaria, se concentraban en la creación de cortafuegos de forma arbitraria. Pero estos métodos son poco efectivos en la realidad, ya que se consideran despreciables los efectos de las características propias del terreno, por lo que eran aplicables a terrenos con características ideales o planos.

Para obtener la Probabilidad de quemado o Burn Probability (**BP**) es necesario considerar varios factores, los dos principales son la probabilidad de ignición y la expansión del fuego[32]. Este último depende de la interacción de factores topográficos, climáticos y de combustible.

Para calcular la probabilidad de incendio en un terreno es necesario simular una gran cantidad de incendios sobre la zona a analizar, considerando las probabilidades de ignición y la dinámica de propagación del fuego bajo varios escenarios representativos de clima [34]. Así, para una celda  $i$ , si se hacen  $N$  simulaciones, la probabilidad de incendio puede ser calculada como:

$$\mathbb{P}(i \text{ se quemó}) = BP_i = \frac{b_i}{N} \cdot 100 \quad (4.1)$$

con:

$b_i$  = número de veces que la celda  $i$  se quemó

Sin embargo, no es una tarea fácil, ya que se debe incorporar integralmente la variabilidad de las igniciones, los modelos de crecimiento del fuego y los patrones específicos del clima del fuego en las simulaciones para obtener valores confiables [20].

Actualmente hay varios softwares que ayudan de diferentes maneras a calcular estas métricas, como Burn-P3, FSPro y FlamMap [40, 41, 20]. La diferencia entre los métodos siempre radica en cómo se incorpora la estocasticidad en el nivel metodológico. Por ejemplo, el software de soporte de decisiones Burn-P3 [40] simula varios incendios con diferentes puntos de ignición (dada una distribución de probabilidades de ignición) para una cierta temporada vinculada a las condiciones climáticas, generando mapas de calor de probabilidad de quema mediante la aproximación del valor de  $BP_i$  según la fórmula 4.1.

Este enfoque de evaluación se puede combinar con algún Valor al Riesgo relevante en un intento de medir explícitamente el impacto del tratamiento o cosecha de una celda  $i$  en el bosque con una unidad de medida conocida, como ponderar por el volumen de madera de la celda, definiendo un valor de probabilidad de incendio de la manera:

$$BPV_i = V_i \cdot BP_i \tag{4.2}$$

Así, este índice se puede usar para clasificar las celdas, apoyando el proceso de toma de decisiones.

### 4.3. Betweenness Centrality

En teoría de grafos las medidas de centralidad tienen por objetivo buscar los vértices más importantes dentro de la red. Para esto existen varios tipos de cálculos y medidas posibles, pero a la hora de relacionarlo con la propagación del fuego el concepto de Betweenness Centrality [22] es el que hace más sentido ocupar para detectar los puntos clave en un paisaje que sirven como puente para la extensión de un incendio. Esta medida refleja la importancia de los nodos cuando existe un flujo presente, en este caso, de fuego, pues Betweenness Centrality ocupa el concepto de los caminos más cortos para identificar los nodos que facilitan el flujo a través de toda la red.

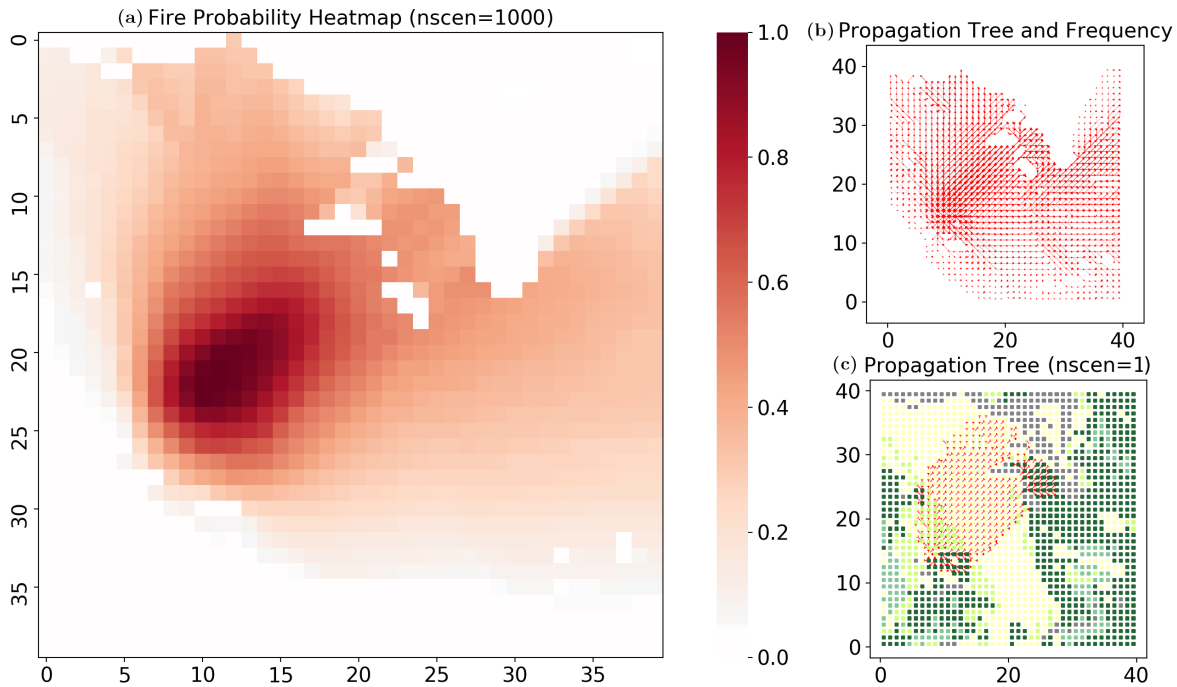


Figura 4.2: Mapa de calor de Probabilidad de incendio hecho con Cell2Fire  
 El mapa de calor (a) está hecho en base al Árbol de propagación global (b) donde el ancho de las aristas es proporcional a el paso del fuego en las 1000 simulaciones hechas, se puede apreciar el árbol de una simulación en la figura (c)

Así, asignando un determinado costo o distancia a cada arista, se calculan todos los caminos más cortos entre los pares de nodos válidos en el grafo. Para un nodo  $k$  del grafo, su centralidad quedará medida por la fracción de caminos más cortos del resto de los pares válidos de nodos en los que  $k$  está presente.

Matemáticamente:

$$BC(k) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\sigma_{ij}(k)}{\sigma_{ij}} \quad (4.3)$$

con:

- $\sigma_{ij}$  = Total de caminos más cortos entre los nodos  $i$  y  $j$
- $\sigma_{ij}(k)$  = Caminos más cortos entre  $i$  y  $j$  que pasan por  $k$

Para este cálculo sólo es necesario la caracterización del mapa topográficamente y en términos de tipo de combustible ya que está basada en un modelo espacial. Sin embargo, la dificultad del cálculo de los caminos más cortos va creciendo exponencialmente a



medida que aumenta la cantidad de nodos incluidos en la instancia, por lo que se hace difícil el uso de este método en instancias de gran tamaño.

Esta medida de centralidad ha sido ampliamente usada en estudios de redes sociales y el estudio de redes complejas. Además, se ha extendido su uso en estudios de conectividad de hábitats, pero apenas se está aplicando en el contexto de mitigación de los efectos del fuego.

En 2016, Gray y Dickson [24] usaron esta medida para la colocación estratégica de tratamientos de combustibles y mitigar la propagación del fuego. Para esto rankearon el posicionamiento de franjas de vegetación resistente al fuego a lo largo de extensas áreas basándose en la conectividad del fuego. Finalmente concluyeron que las medidas de centralidad son útiles para exponer áreas de alto riesgo, lo que puede ser útil para realizar una gestión eficiente del paisaje en términos ecológicos y económicos.

Por otra parte, algunos estudios se han centrado en aplicar esta medida a la detección de centros de propagación de incendios, donde la propagación se modela a través de una red dirigida ponderada se le asigna a cada arista un peso según las probabilidades de transición de estado de un autómata celular de Markov espacio-temporal [47].

En esta investigación en particular se usarán medidas de ROS para determinar los caminos más cortos entre bloques del bosque de un mismo escenario y así encontrar los bloques clave para la expansión del fuego y que, por lo tanto, al cosecharlos tendrían un mayor efecto retardándolo, haciendo el combate del incendio más fácil y disminuyendo los posibles daños del mismo.

## 4.4. Fire Protection Value (FPV)

Uno de los avances más notables en virtud de la toma de decisiones en un programa de cosecha inteligente al fuego es la creación de un Factor de Protección de Fuego (FPV por las siglas en inglés) [38] [1]. El FPV pretende ser una métrica respecto al impacto potencial que tiene cortar una sección del bosque sobre las pérdidas esperadas frente a un incendio. Esto se explica porque el cortar un rodal del bosque debiese influir en la propagación de un eventual incendio, ya que interrumpe ciertos caminos de propagación,

y, por lo tanto, disminuye el riesgo de fuego en ciertas áreas.

Definiéndolo matemáticamente, si se tiene un bosque dividido en celdas, y se denomina  $VP$  al conjunto de pares de celdas válidas (es decir, que existe un camino entre ellas) el FPV de una celda  $k$  será:

$$FPV(k) = \sum_{i,j \in VP} P_i \cdot V_j \cdot (PL_{ij} - PL_{ij}(k)) \quad (4.4)$$

con:

- $P_i$  = Probabilidad de que un incendio se inicie en la celda  $i$
- $V_j$  = Valor al riesgo de la celda  $j$
- $PL_{ij}$  = Probabilidad que de un incendio iniciado en  $i$  alcance la celda  $j$
- $PL_{ij}(k)$  = Probabilidad que de un incendio iniciado en  $i$  alcance la celda  $j$  si la celda  $k$  ha sido cortada (o cosechada)

Esta medida puede aplicarse a nivel de celda o de rodal. La importancia radica en analizar la situación con y sin cosechar  $k$ , ya sea una celda o un conjunto de ellas, basándose en el supuesto de que al cosechar una celda  $k$ , que forma parte del camino más corto entre las celdas  $(i, j)$ , forzará al fuego a viajar de  $i$  a  $j$  sobre el segundo camino más rápido. En su trabajo, los autores estiman la probabilidad de quema  $P_i$  de cada celda según las distribuciones históricas que modelan el número de incendios que ocurren en una celda (cada día) como un Poisson en el que la tasa  $\lambda$  puede variar de una celda a otra.

La gran diferencia con el enfoque a usar en este trabajo es que los autores no usan un modelo de crecimiento de incendios para calcular la Velocidad de propagación (ROS) entre las celdas vecinas (y luego el tiempo de propagación entre las celdas). Más bien, utilizan directamente las obtenidas del Sistema FBP, para condiciones climáticas únicas y, por lo tanto, no se capturan en su procedimiento interacción temporal que puede ocurrir en un incendio, mientras que el fuego evoluciona.

Es de notar que el valor resultante de la medición de este factor es muy dependiente de los valores de probabilidad de ignición asignados en el mapa y del valor al riesgo de las celdas. Para valorizar las celdas se usó una estimación del volumen por hectárea de madera según el tipo de combustible presente.

## 4.5. Downstream Protection Value (DPV)

Siguiendo la línea de medir del *FPV* y medir el nivel de protección del bosque que puede causar el corte de una hectárea de combustible, en su tesis doctoral, Carrasco [8]<sup>2</sup>, desarrolló el concepto de Downstream Protection Value (DPV), que usa conceptos de teoría de grafos para crear una medida usando árboles de propagación (ver Definición 3.1) y repetidas simulaciones de incendios para incorporar la aleatoriedad de estos en el cálculo.

Usando la definición 3.1 de árbol de propagación se puede definir el DPV para una celda  $i$  como:

$$DPV(i) = \sum_{j \in T_i} V_j \quad (4.5)$$

Con:

- $V_j$  = Valor al riesgo de la celda  $j$
- $T_i$  = Conjunto de celdas pertenecientes al árbol de propagación de la celda  $i$

Pero este valor no es realmente representativo con una sola simulación de incendio, ya que existen miles de formas en que el fuego se puede propagar dependiendo de donde se inició y las condiciones climáticas presentes, entre otros factores. Para lograr una mejor aproximación a un valor que capture de mejor manera el nivel de protección de una celda se deben hacer repetidas simulaciones con diferentes configuraciones con escenarios representativos, variando los puntos de ignición y configuraciones climáticas. Así, haciendo  $N$  simulaciones basta calcular el promedio:

$$ADPV(i) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N DPV_i^s \quad (4.6)$$

Con:

- $DPV_i^s$  =  $DPV$  de la celda  $i$  en la simulación  $s$

---

<sup>2</sup>Capítulo 3: *Evaluating the effectiveness of Fire-Smart Fores Management plans under wildfire risk*

De la definición anterior, el DPV es la suma de algún factor de Valor en Riesgo (VaR), donde el VaR puede ser cualquier valor relevante para el decisor. Por ejemplo, el volumen surge como una variable VaR consistente y simple. Se puede ampliar fácilmente e incluir más información al ponderar los valores por probabilidades y otras características de los nodos y aristas. Además, la extensión es directa de las celdas a unidades más grandes como los rodales debido a las propiedades aditivas del DPV propuesto.

## 4.6. Value at Risk

En 2005, Finney [19] abordó la importancia de la evaluación de riesgos en los incendios forestales y cómo esto ayuda a las actividades de manejo en la planificación forestal.

Se puede definir el Valor al Riesgo (VaR) como el valor máximo probable de la pérdida, pero el daño producido por el incendio puede afectar muchos tipos diferentes de activos, por lo tanto, evaluar las pérdidas es un trabajo difícil y depende de los objetivos del tomador de decisiones. Por ejemplo, se puede definir el VaR del sector forestal como las pérdidas en madera o materias primas utilizadas para otros productos. Por otro lado, si se pone el foco en los impactos en el ecosistema, el fuego puede producir degradación de los bosques, erosión del suelo, interrupción del ciclo del agua y los ecosistemas fluviales, pérdida de biodiversidad y otros efectos adversos que son difíciles de medir.

Para cuantificar el riesgo es necesario utilizar la misma unidad de medida. De esta manera, la evaluación de las pérdidas materiales no es difícil utilizando el valor de mercado de los productos, pero los daños ecológicos no son fácilmente cuantificables porque no son recursos de mercado. En 1999, Rideout et al. [42] introdujo un marco que utiliza el análisis de costo-efectividad (CEA), un tipo de análisis de costo-beneficio (BCA) y es especial para evaluar situaciones donde los resultados del proceso no pueden evaluarse a precios de mercado, pero sí las inversiones.

Por ejemplo, se pueden usar los costos de manejo para la protección del bosque para evaluar las pérdidas en términos de preservación del ecosistema.

Sin embargo, este análisis depende de cada caso y requiere una gran cantidad de datos. Como simplificación, en esta tesis se usará sólo el volumen de madera como el VaR principal, que resume todas las materias primas en la industria forestal y es considerado un commodity.

## 4.7. Formulación

Para apoyar al tomador de decisiones, el ideal es señalar el conjunto de celdas/rodales que deben ser sometidas a tratamiento para maximizar la protección del bosque sujeto a restricciones operativas.

Teniendo lo anterior en cuenta, la formulación debe ser lo suficientemente flexible como para poder incluir restricciones tradicionales en el contexto de la planificación forestal, como la limitación presupuestaria por temporada, las restricciones de movimiento de la maquinaria, el área máxima/mínima cosechada, el flujo uniforme de la producción, los corredores para la vida silvestre, protección de áreas altamente pobladas, y las restricciones de adyacencia clásicas [14, 9] donde el tratamiento debe ocurrir en unidades conectadas (induciendo un subgrafo conectado) relacionadas con la salud del bosque y los costos de tratamiento (ver Sección 4.6).

A partir de la discusión anterior, se puede proponer una formulación general para el problema de protección táctica. Dado que  $G = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$  un grafo no dirigido con nodos ponderados, se pretende encontrar el subconjunto de nodos que maximice la protección del bosque representada por la sumatoria de la métrica elegida para medirlo, induciendo así un subgrafo conectado.

Esta es una variante de el Problema de Subgrafo conectado de Peso Máximo (MWCSP, por sus siglas en inglés), un conocido problema combinatorio de complejidad NP [29, 3], donde se incluyen restricciones adicionales que dependen de las necesidades del administrador de incendios.

Se define así:

**Definición 4.1** *Dado un grafo no dirigido  $G = (N, E)$  y una función de pesos  $\nu : N \rightarrow \mathbb{R}$ , se busca identificar el subconjunto de nodos  $S$  donde  $\sum_{i \in S} \nu_i$  es maximizada y el sub-*

grafo  $G_S$  es conexo. El conjunto factible  $\Omega$  es definido por un conjunto de restricciones operacionales (ej. Presupuesto máximo, flujo continuo de producción entre períodos, capacidad máxima, etc). Por lo tanto, se formula el Problema de Valor de Protección (PVP) como:

$$\begin{aligned}
 (PVP) \quad & \max_{S \in \Lambda_N} \sum_{i \in N} PV(i) \mathbb{1}_{i \in S} \\
 & s.t. \quad S \text{ conexo} \\
 & S \in \Omega
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Donde:

$\Lambda_N$  es el conjunto de todos los subconjuntos de nodos en  $N$

$PV \in \{BPV, BCV, FPV, DPV\}$ .

## 4.8. Heurísticas

Para resolver el problema recién definido muchos métodos pueden ser aplicados, pero la principal dificultad del problema a resolver es la inclusión de la incertidumbre de los incendios. Como se mencionó en la sección anterior la optimización directa es imposible. Por lo tanto, se ha optado por la creación de algoritmos heurísticos, lo que implica buscar una solución lo más cercana al óptimo posible mediante es testeo de diferentes estrategias y la aplicación de determinadas reglas a establecer.

Como la decisión a tomar es qué rodales cortar en cada período considerando la demanda y el riesgo de incendio se establecerá que se cortará, en cada período, el rodal que más contribuya a la protección del bosque ante incendios.

Sin embargo, se deben establecer ciertas condiciones a seguir, dadas por las restricciones de adyacencia del problema. Además, se debe considerar el esquema de temporalidad del problema, ya que se resolverá en múltiples etapas en un horizonte de tiempo determinado.

## 4.9. Restricciones de adyacencia

Cortar sectores del bosque parece un proceso simple, sin embargo, no hay que olvidar que los bosques representan un ecosistema natural, y que, por lo tanto, existen ciertas restricciones con la finalidad de generar medidas de protección al medio ambiente. En este sentido, estas medidas se pueden clasificar en tres tipos según su objetivo [9].

- **Selección de Reservas Naturales:** consiste en la protección de grandes áreas contiguas que conforman espacios de gran riqueza ecológica, y, por lo tanto, se prohíbe la intervención humana con fines productivos.
- **Conservación de bosque antiguo:** Fuera de las reservas naturales los bosques antiguos son de gran importancia para la vida silvestre, pues, alrededor de ellos se desarrollan hábitats naturales con gran biodiversidad, en consecuencia se requiere proteger las áreas del bosque que concentren árboles de larga data.
- **Corte máximo:** si se cortan áreas de bosque demasiado grandes pueden traer efectos negativos como erosión o afectar gravemente en la vida habitante del bosque, por lo tanto, se establece una área máxima a cortar, si es necesario cortar más allá de esa cota los cortes no pueden ser contiguos.

Para incluir estas medidas de protección en el problema es necesario establecer restricciones a nivel estructural, que se sostienen en las propiedades de conectividad y contigüidad de los rodales. Sin embargo, para este problema sólo se abordará el último tipo de restricción, ya que se asume que el lugar de la cosecha no pertenece a alguna reserva natural y que ha sido plantado con el fin de ser cosechado, y, por lo que, además, no posee bosque antiguo. Por consiguiente, sólo se considerará la restricción de corte máximo contiguo.

# Capítulo 5

## Implementación

En esta sección se procederá a describir los métodos y materiales que se usaron para obtener resultados que ayuden a determinar la mejor estrategia de corte para minimizar la propagación del fuego.

### 5.1. Algoritmos

Para los experimentos, se implementaron cinco heurísticas de planificación de aprovechamiento en el sistema de apoyo a las decisiones para la gestión del paisaje bajo el riesgo de incendios forestales, siguiendo el esquema que se definirá en esta sección.

Las heurísticas son:

- Cosecha miope (Random): maximiza la utilidad (volumen) sin considerar el riesgo de incendio. Se convierte en una política aleatoria cuando se configuran valores de volumen idénticos para todas las celdas/bloques.
- Burn Probability (BP): probabilidades de ignición de mayor a menor, ponderadas por el volumen de la celda. Maximiza el beneficio esperado sujeto a restricciones
- Betweenness Centrality (BC): priorizar la cosecha de celdas/rodales con un alto valor de centralidad para ralentizar la propagación del fuego. Ponderado por volumen.



- Fire Protection Value adaptado (A-FPV): plan de cosecha basado en el trabajo de Palma [38] y la adaptación propuesta en la sección 4.4. Prioriza la recolección de celdas de riesgo y maximiza la utilidad al incluir el volumen de las celdas como VaR principal.
- Dowsntream protection Value (DPV). Maximiza el DPV total de las celdas seleccionadas, utilizando el volumen como VaR.

Como ya se mencionó, para la implementación se ocupará el simulador *Cell2Fire*. Ahora se definirá cómo se organizará el esquema de simulación para el estudio.

La figura 5.1 representa un resumen de cómo se desarrollará el estudio. De esta manera, se reconocen los siguientes pasos:

1. Tomando el bosque completo se hacen  $R$  simulaciones de incendios aleatorios, y se guardan los resultados de todas las simulaciones
2. Con las simulaciones anteriores se procede al cálculo de las métricas necesarias para la toma de decisiones, siendo estas: BP, BC, FPV o DPV.
3. Una vez obtenidas las métricas se procede a correr  $N$  iteraciones de una simulación multietapas, donde:
  - (a) Iniciando un período se decide qué cortar, en base al ranking generado según la métrica usada y el bosque disponible.
  - (b) Ya hecha la cosecha se simula un incendio aleatorio
  - (c) Luego del incendio se procede a la actualización del bosque disponible y el recálculo de las métricas
4. Finalmente, se pasa al cálculo de las métricas de performance según el factor de decisión usado.

Los puntos 1 y 2 son considerados la *Fase de Entrenamiento*, ya que depende de la cantidad de  $R$  repeticiones que se hagan los valores que se obtendrán de las métricas necesarias, y se estudiará cómo afecta esta fase al rendimiento de las mismas.

Claramente, cuando se usa el algoritmo Miope, no es necesaria la fase de entrena-

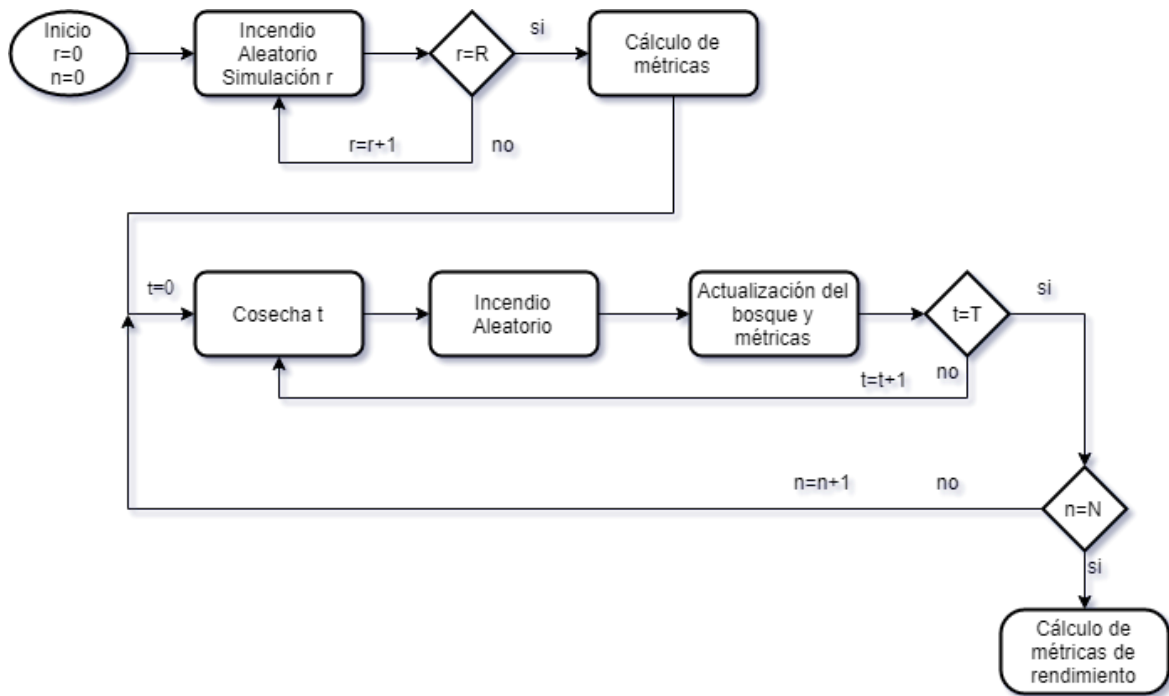


Figura 5.1: Flujo de la simulación

miento, que sirve para el cálculo del factor a usar, pues el ranking de corte es generado según el volumen de las celdas.

En una primera instancia se analizará el experimento sólo con  $T = 1$  para luego pasar al marco multietapas con  $T = 4$ .

## 5.2. Fuentes de Incertidumbre

Como se introdujo en la sección 2.4.3, *Cell2Fire* ocupa diferentes fuentes de incertidumbre para crear escenarios aleatorios y con ello ampliar el espectro de marcas de fuego que puede generar. A continuación se describe cómo se ocupó cada una de las fuentes de incertidumbre que *Cell2Fire* puede implementar al simular incendios.

### 5.2.1. Puntos de Ignición

Para esto se integró una distribución de probabilidad sobre el terreno de estudio en base un análisis desarrollado con el software BurnP3 para cada escenario.

Como las instancias del área de estudio están asociadas a incendios generados principalmente por caídas de rayos, se trabajará con una distribución uniforme de probabilidad de ignición sobre el terreno de estudio.

### 5.2.2. Escenarios de Clima

Para un mejor análisis del potencial comportamiento del fuego en un bosque, es necesaria la inclusión de varios de ellos, que representen los diversos contextos en que se puede desarrollar un incendio. Entre más escenarios se incluyan mejor se captura la variabilidad de este factor.

Sin embargo, de deben incluir sólo escenarios que favorezcan la propagación del fuego, como Finney [19] abordó, al igual que Parisien et al.[40], los grandes incendios son más útiles para la evaluación de riesgo. Por esta razón es inútil incluir escenarios que no impulsen la transmisión del incendio a través del bosque, pues no son un aporte al análisis

Así, se obtuvieron datos históricos desde la Sección de información climática del sitio de Agricultura y Silvicultura de Alberta, Canadá y se ocuparon los datos de la estación Yaha Tinda Auto (coordenadas: 51.6547°, -115.3617°), la estación más cercana a las coordenadas del bosque usado para la simulación, que se describe en la Sección (5.3), que se presenta a continuación.

Primero se extrajo los datos de los promedios diarios de los indicadores climáticos más importantes (Temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento) de los últimos 5 años calendario (del 01-01-2014 al 31-12-2018). De estos datos se eligieron los 40 días con las peores condiciones climáticas, que favorecen la propagación del fuego y se procedió a obtener el detalle por hora de las 24 horas por día, incluyendo los índices del Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System.

### 5.3. Área de Estudio

*Cell2Fire* ocupa los mismos inputs que el software Prometheus, así, se obtuvo información respecto a dos instancias de gran tamaño hechas para ese simulador.

Se ocuparán 2 instancias mayores que se dividirán en sub-instancias. La información de ambas instancias corresponde a terrenos ubicados en Canadá y están divididas en una cuadrícula de celdas de 100x100m (1 hectárea) cada una. Por cada celda se tiene información respecto al tipo de combustible según la clasificación del Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System e información topográfica (altitud, pendiente y aspecto).

A continuación se describen ambas con más detalle.

#### Alberta

Esta instancia es un conjunto de datos de muestra de la subregión de las Montañas Rocosas de Alberta, Canadá, para el incendio de Dogrib de 2001, que se puede revisar en línea<sup>1</sup>. Este parche tiene una superficie de 79,611 ha. Además del área original, se extrajeron tres subconjuntos aleatorios de todo el bosque con 400 (20x20), 1.600 (40x40) y 10.000 (100x100) hectáreas para probar los métodos propuestos. Estas instancias son referidas como Sub20, Sub40 y Sub100 respectivamente.

#### British Columbia

La segunda instancia se ubica en British Columbia, y es muy grande (1,854,838 ha) para trabajar con ella completa. Se caracteriza por ser muy montañosa y discontinua al nivel de combustible. Con el fin de analizar los posibles efectos de la topografía en las medidas de riesgo y acelerar la capacidad computacional, se han construido 6 sub-instancias a partir de ella. Llamadas: ArrowHead (AH) (159,963 ha.), Revelstoke (RT) (350,956 ha.), Mica Creek (MC) (304,781 ha.), Glacier Natural Park (GNP) (464,664 ha.), Central Kootenay (CK) (399,401 ha.), Neptune Peak (NP) (350,956 ha.). Los

---

<sup>1</sup>[http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/software\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/software_e.php)

nombres fueron asignados en relación con las montañas que están dentro de cada parche.

Originalmente, las instancias completas de British Columbia forman parte de la documentación de Burn-P3 y también están públicas para su descarga<sup>2</sup>.

Instancia	Area [ha]	Elevación min [m]	Elevación max [m]	Elevación prom [m]	Pendiente max [%]	Pendiente prom [%]	Combustible* Dominante
Sub20	400	2.049	2.414	2.286	71	22,25	O1a
Sub40	1.600	1.858	2.414	2.154	83	24,75	O1a
Sub100	10.000	1.555	2.552	1.943	101	26,31	C-2
Dogrib	79.611	1.299	2.825	1.693	189	21,04	C-2
AH	159.963	430	2.894	1.329	220	42,96	C-5
RT	350.956	429	2.997	1.494	251	45,91	C-5
MC	304.781	516	2895	1523	230	48,41	Non-fuel
GNP	464.664	300	3.000	1.701	1.495	45,79	Non-fuel
CK	399.401	300	3.000	1.811	1.449	51,64	Non-fuel
NP	350.956	429	2.997	1494	251	45,91	C-5

Tabla 5.1: Características generales de las instancias usadas para las simulaciones

\*Clasificación de combustible según el FBP system

## 5.4. Experimentos

Para medir el rendimiento de los métodos propuestos en diferentes entornos se ocuparon diferentes configuraciones que derivaron en una amplia gama de escenarios que permiten hacer un análisis más robusto respecto al desempeño de las heurísticas evaluadas. Se usó:

(1) Múltiples paisajes con diferentes tamaños y composiciones de combustible. Se prueban experimentos con paisajes heterogéneos canadienses que incluyen de  $\sim 80.000$  a  $\sim 460.000$  celdas (mencionadas en la sección 5.3).

(2) Variando el número de repeticiones  $R$  totales  $R \in \mathcal{R}_{\mathcal{T}} := \{10, 50, 100, 1000\}$  de la fase de entrenamiento para evaluar la sensibilidad y la solidez del rendimiento del algoritmo con respecto a la cantidad de información disponible.

(3) Selección aleatoria del escenario meteorológico por cada iteración. Definiendo además dos conjuntos, donde se asocia un clima fijo a cada instancia ( $FW$ ), y otro donde en cada período el escenario de clima se selecciona de forma aleatoria ( $RW$ )

<sup>2</sup>[http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/software\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/software_e.php)

(4) Selección aleatoria del punto de ignición, análogo al punto (3), los incendios se inician en un punto completamente al azar entre las celdas disponibles (inflamables) dentro del bosque ( $RI$ ) o siguiendo una función de distribución de probabilidad histórica, seleccionando al azar un punto de ignición de un área específica del paisaje donde la probabilidad de ignición histórica es superior al 50 % ( $FI$ ).

(5) La fracción total  $tf$  del paisaje a tratar. Para analizar el rendimiento de los métodos propuestos al aplicar planes de recolección a diferentes escalas, se prueban múltiples niveles de tratamiento. Esto puede interpretarse como una restricción operativa como la demanda total de madera que debe satisfacerse en el período actual  $t \in T$  o como la capacidad operativa máxima (capacidad máxima o área cosechada) dados los recursos de quienes toman las decisiones. Dependiendo del tamaño del paisaje, se prueban dos conjuntos de valores  $tf : TF_1 := [5\% - 90\%]$  en un paso de 5 % y  $TF_2 := [0.01\% - 0.05\%]$  (por 0.01 %)  $\cup$   $[1\% - 5\%]$  (por 0.5 %) para instancias masivas. Esto, con el objetivo de no cosechar una gran parte de las celdas en el nivel más bajo de  $tf$  cuando las instancias son muy grandes, ya que se pretende analizar el rendimiento de los métodos con respecto al número de celdas tratadas antes de alcanzar un cierto  $tf$  valor donde el número de celdas inflamables es muy limitado y, por lo tanto, no se puede observar una propagación significativa del fuego.

(6) Se hace primero un estudio de las métricas en un período único ( $N = 1$ ) y luego multiperíodo ( $N = 4$ )

Para evitar sesgos en la metodología usada, se utiliza una semilla aleatoria diferente para cada repetición realizada durante la etapa de evaluación, justo después de aplicar el plan de recolección propuesto a un nivel de  $tf$ . Por lo tanto, se evalúa el desempeño de los métodos propuestos en incendios distintos de los que se simularon durante la etapa de entrenamiento. Este es el conjunto de pruebas. Gracias a este enfoque, se puede evaluar el rendimiento de la metodología y algoritmos en un conjunto de potenciales incendios, lo que proporciona métricas de rendimiento más realistas y útiles cuando se analiza el sistema de soporte de decisiones en la práctica, modelando un entorno altamente estocástico.

Por lo tanto, para cada bosque  $F \in \mathcal{F}$  se realizan un total de  $|\mathcal{R}_{\mathcal{T}}| \times |\{RW, FW\}| \times |\{RI, FI\}| \times |TF_j|$  experimentos en el conjunto de pruebas con  $j \in \{1, 2\}$  dependiendo del tamaño de la instancia (64,960 simulaciones por bosque).

# Capítulo 6

## Resultados

En esta sección, se presentan los principales resultados obtenidos de los experimentos descritos en la sección 5.4. Se realiza una comparación y análisis de todas las combinaciones de las fuentes de incertidumbre y número de iteraciones de los experimentos. Se discuten las aplicaciones potenciales de la metodología propuesta y las extensiones naturales. Los resultados detallados de todos los experimentos se incluyen en los Anexos A y B.

Se decidió eliminar los resultados obtenidos usando la heurística que ocupaba el *FPV* como métrica de decisión, ya que es superado constantemente por las otras métricas y, sobretodo, por su bajo rendimiento computacional, pues que requiere hasta 72 horas para clasificar las celdas cuando se trata de instancias mayores a 400 celdas, pese a que son las instancias más pequeñas usadas en el estudio.

Por consiguiente, considerando lo anterior y el diseño de los experimentos de usará la siguiente notación para referirse a los algoritmos usados y la cantidad de repeticiones hechas en su respectivas fases de entrenamiento.

- **BP10** : Burn Probability con 10 repeticiones de entrenamiento
- **BC10** : Betweenness Centrality con 10 repeticiones de entrenamiento
- **DPV10** : Downstream Protection Value con 10 repeticiones de entrenamiento
- **BP100** : Burn Probability con 100 repeticiones de entrenamiento
- **BC100** : Betweenness Centrality con 100 repeticiones de entrenamiento

- **DPV100** : Downstream Protection Value con 100 repeticiones de entrenamiento

Por último, se ocupará la siguiente notación para describir la introducción de las fuentes de incertidumbre en el experimento.

- Para el clima: **FW** la clima fijo o **RW** para clima aleatorio
- Para los puntos de ignición **FI** para puntos de ignición fijos o **RI** para puntos aleatorios.

## 6.1. Capacidad de aprendizaje

Un aspecto crítico para evaluar los algoritmos propuestos es su capacidad para aprender y mejorar la efectividad del plan de manejo del paisaje con respecto a la cantidad de información disponible. Dado un número mayor de repeticiones  $|R|$ , se esperan resultados mejores y más precisos, ya que se han simulado e incluido más trayectorias potenciales de incendios para calcular los VaR relevantes, que cubren una gama más amplia de escenarios de incendios forestales.

Se amplía aún más este análisis siguiendo los experimentos descritos en la sección 5.4. Se muestra un resumen del rendimiento de todos los algoritmos aplicados en la Figura 6.1, donde se presenta el número promedio de celdas quemadas y la desviación estándar para diferentes niveles de tratamiento y métricas entrenadas para las instancias de *Dogrid* y *British Columbia* comparando el promedio de celdas quemadas con 10 y 100 repeticiones de entrenamiento. Esto, también se analiza numéricamente en las Tablas 6.1 y 6.2

A partir de los resultados en la Figura 6.1 se puede observar cómo el aumento del tamaño del conjunto de entrenamiento tiene un impacto positivo en el rendimiento de todos los métodos probados al reducir (1) la variabilidad de los resultados y (2) el área total esperada quemada después de la aplicación del plan de tratamiento de combustible. Esto se hace particularmente evidente cuando se resuelven los escenarios con clima e igniciones aleatorias (*RW* – *RI*), donde la incertidumbre juega un papel fundamental en los incendios simulados.

Así, el DPV se presenta como la métrica más útil en todos los casos, ya que puede



mejorar significativamente su rendimiento y superar el resto de las métricas al incluir más instancias en el conjunto de entrenamiento. De los gráficos, se observa que aumentar el número de repeticiones no es efectivo cuando se entrena la métrica de Probabilidad de Quemado (BP), al no poder capturar la dinámica de crecimiento del incendio subyacente y, por lo tanto, no mejora la efectividad del plan.

Por otro lado, *BC* es capaz de aprender y extraer patrones de propagación más complejos al agregar más muestras de entrenamiento. Sin embargo, en instancias muy pequeñas puede tener problemas, como se ve en la Tabla 6.1. Por otro lado, en instancias más grandes (Tabla 6.2) es capaz de mejorar considerablemente su rendimiento al aumentar el nivel de entrenamiento. Pese a lo anterior, los resultados obtenidos usando *BC* siguen siendo inferiores a los obtenidos por el *DPV*, que es además la métrica que más se ve favorecida con el aumento del conjunto de entrenamiento, mejorando su rendimiento al orden del 40% al 50%.

Aquí se puede ver que el modelo *DPV* supera a los otros indicadores entrenados, incluso cuando se entrena con una cantidad limitada de información. Por ejemplo, incluso entrenar el modelo *DPV* con una cantidad limitada de muestras (*DPV* 10) podría superar los resultados de *BC* 100. Esta tendencia se magnifica cuando se aumenta el tamaño del conjunto de entrenamiento, mejorando su rendimiento y aumentando su distancia de las métricas alternativas.

Se nota la importancia de una buena fase de entrenamiento en instancias donde el paisaje es más complejo y fragmentado, como Central Kootenay o Revelstoke, donde la diferencia de rendimiento entre las métricas *BC*10 y *DPV*10 son casi es casi nula. Sin embargo, al aumentar la cantidad de repeticiones de entrenamiento y de esta manera incorporar más escenarios probables al estudio, usando  $|R| = 100$ , el modelo que ocupa *DPV* mejora significativamente más sus resultados. (ver Tabla 6.2)

Se observa cómo el modelo *DPV* puede aprovechar los datos históricos y/o simulaciones para desarrollar planes de tratamiento de combustible más efectivos con el Sistema de Soporte de Decisiones propuesto, obteniendo paisajes que están mejor preparados para enfrentar incendios forestales. De esta manera, los tomadores de decisiones podrían entrenar los algoritmos mediante la reconstrucción de incendios forestales históricos y sus condiciones climáticas en un paisaje de interés, obteniendo un DSS totalmente adaptado para ese bosque en particular con la ventaja de que cuanto más información se

ingrese al sistema, mejor rendimiento se obtendrá.

Instancia	Métrica	Promedio 5 %-25 % $tf$	Max	STD	$\Delta$ %* relativo	$\Delta$ %*
Sub20x20	BP 10	140.5	271	103.0	0	
	BP 100	140.1	271	102.4	-0.3	-0,3
	BC 10	104.3	271	91.6	-25.7	
	BC 100	118.0	270	96.9	-16.0	13,1
	DPV 10	38.1	157	35.7	-72.9	
	DPV 100	27.8	128	30.8	-80.2	-27,0
Sub40x40	BP 10	292.0	1258	280.2	0	
	BP 100	262.2	1258	256.7	-10.2	-10,2
	BC 10	211.2	1208	219.2	-27.7	
	BC 100	224.4	1181	227.7	-23.2	6,3
	DPV 10	196.6	1229	226.2	-32.7	
	DPV 100	137.6	1211	198.2	-52.9	-53,6
Sub100x100	BP 10	472.9	3795	560.1	0	
	BP 100	384.4	2895	442.2	-18.7	-18.7
	BC 10	327.0	2804	422.6	-30.9	
	BC 100	279.8	2831	394.8	-40.8	-14,4
	DPV 10	278.3	2417	368.6	-41.2	
	DPV 100	135.7	1415	228.2	-71.3	-51,2
Dogrib	BP 10	290.0	1407	327.1	0	
	BP 100	263.4	1382	299.0	-9.2	-9.2
	BC 10	233.4	1292	255.9	-19.5	
	BC 100	125.8	806	151.9	-56.6	-46,1
	DPV 10	211.8	1248	242.5	-27.0	
	DPV 100	109.7	688	133.5	-62.2	-48,2

Tabla 6.1: Promedio del número de celdas quemadas para los  $tf \in \{0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25\}$  para las instancias de la región de Alberta.

\* ambos  $\Delta$  % corresponden a la variación del promedio.  $\Delta$  % relativo es respecto a el con rendimiento más bajo según instancia y  $\Delta$  % es respecto a la misma instancia y métrica pero con menor fase de entrenamiento.

Instancia	Métrica	Promedio 5 %-25 % $tf$	Max	STD	$\Delta\%$ * relativo	$\Delta\%$ *
Mica Creek	BP 10	479.8	1969	516.3	0	
	BP 100	459.4	1969	500.0	-4.2	-4.2
	BC 10	440.5	1953	517.0	-8.2	
	BC 100	343.3	1648	330.5	-28.4	-22.1
	DPV 10	414.0	1878	517.6	-13.7	
	DPV 100	219.0	1595	254.4	-54.4	-47.1
Central Kootenay	BP 10	435.5	2459	536.4	0	
	BP 100	316.6	2047	367.8	-27.3	-27.3
	BC 10	373.1	2131	490.8	-14.3	
	BC 100	259.6	1637	275.7	-40.4	-30.4
	DPV 10	375.0	2091	492.4	-13.9	
	DPV 100	169.7	2508	280.7	-61.1	-54.7
Revelstoke	BP 10	561.7	1579	444.8	0	
	BP 100	443.0	1617	365.9	-21.1	-21.1
	BC 10	459.3	1506	402.7	-18.2	
	BC 100	357.8	1466	312.7	-36.3	-22.1
	DPV 10	459.2	1487	397.2	-18.2	
	DPV 100	244.9	1488	274.9	-56.4	-46.7
Arrowhead	BP 10	1099.6	4666	1090.3	0	
	BP 100	1066.7	4671	1191.7	-3.0	-3.0
	BC 10	637.9	2686	625.9	-42.0	
	BC 100	529.2	3093	691.1	-51.9	-17.0
	DPV 10	510.1	2256	547.3	-53.6	
	DPV 100	343.4	3054	609.0	-68.8	-32.7
Glacier National Park	BP 10	934.0	3192	771.4	0	
	BP 100	911.9	3107	719.2	-13.1	-13.1
	BC 10	722.2	2893	691.0	-22.7	
	BC 100	469.7	2424	512.0	-49.7	-35.0
	DPV 10	539.9	2676	551.9	-42.2	
	DPV 100	303.1	1674	412.8	-67.5	-43.9

Tabla 6.2: Promedio del número de celdas quemadas para los  $tf \in \{0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25\}$  para las instancias de la región de British Columbia.

\* ambos  $\Delta\%$  corresponden a la variación del promedio.  $\Delta\%$  relativo es respecto a el con rendimiento más bajo según instancia y  $\Delta\%$  es respecto a la misma instancia y métrica pero con menor fase de entrenamiento.

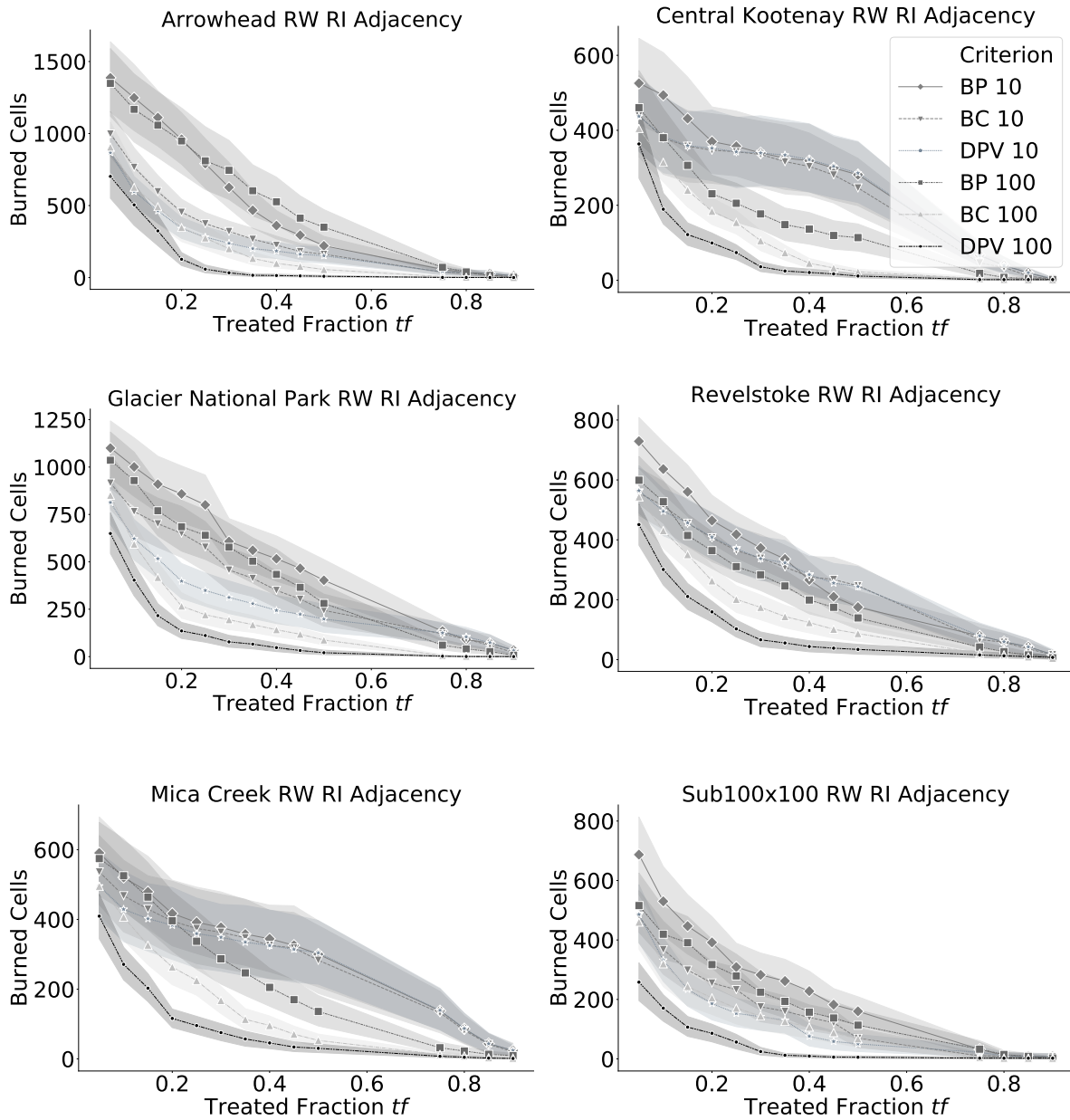


Figura 6.1: Comparación del rendimiento de las diferentes métricas a distintos niveles de tratamiento y tamaño del conjunto de entrenamiento

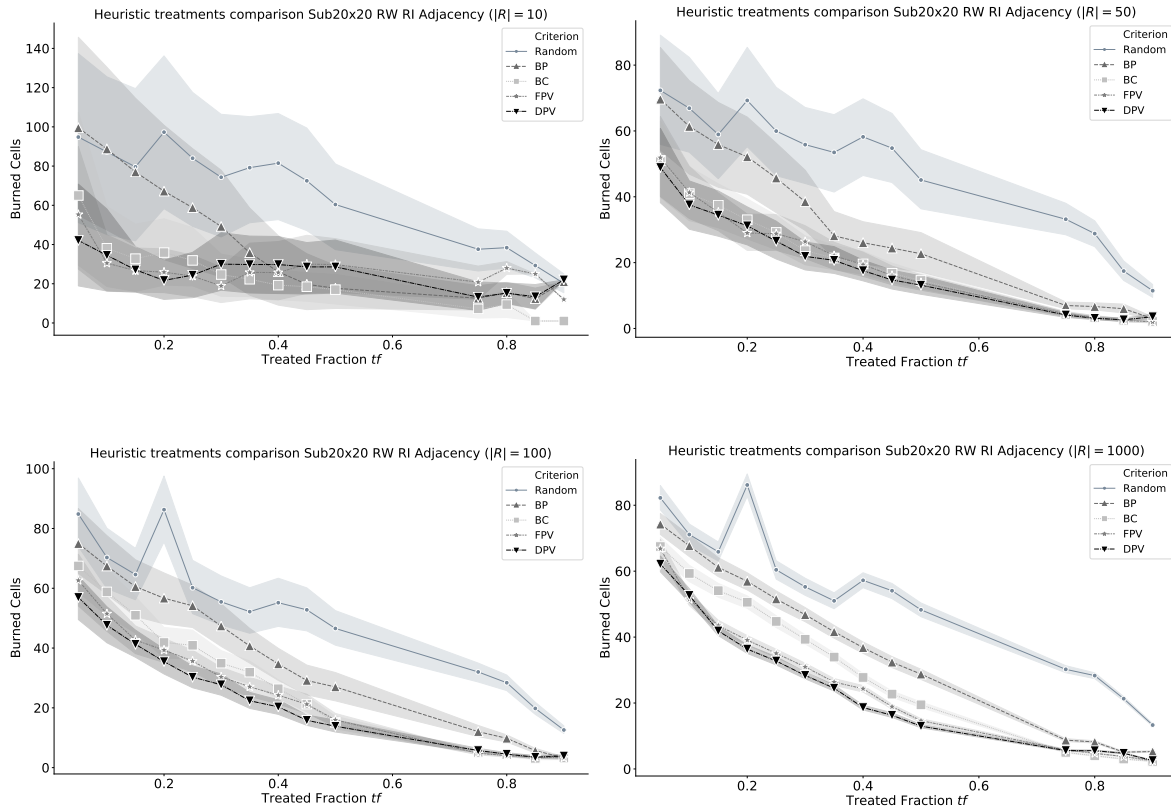


Figura 6.2: Experimentos resistentes al fuego de la instancia Sub20x20 con un número diferente de repeticiones en el escenario  $RW - RI$  cumpliendo restricciones de adyacencia

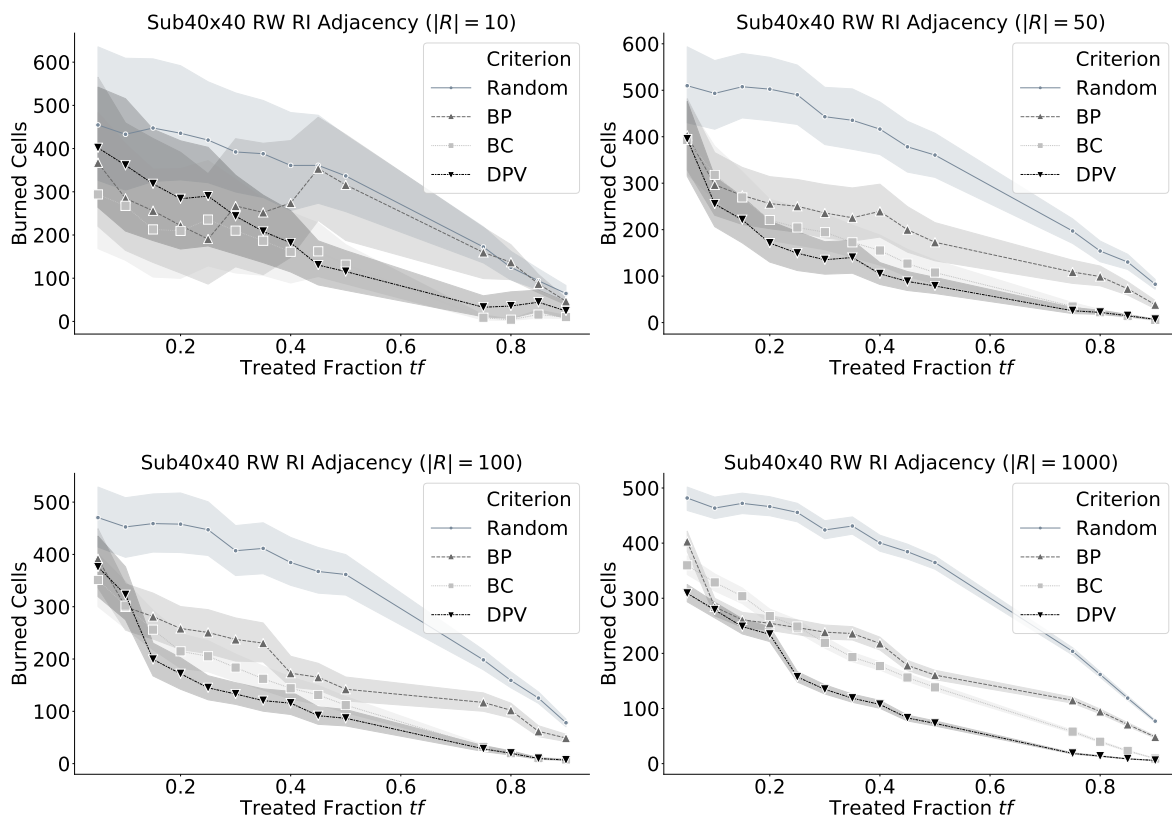


Figura 6.3: Experimentos resistentes al fuego de la instancia Sub40x40 con un número diferente de repeticiones en el escenario  $RW - RI$ .

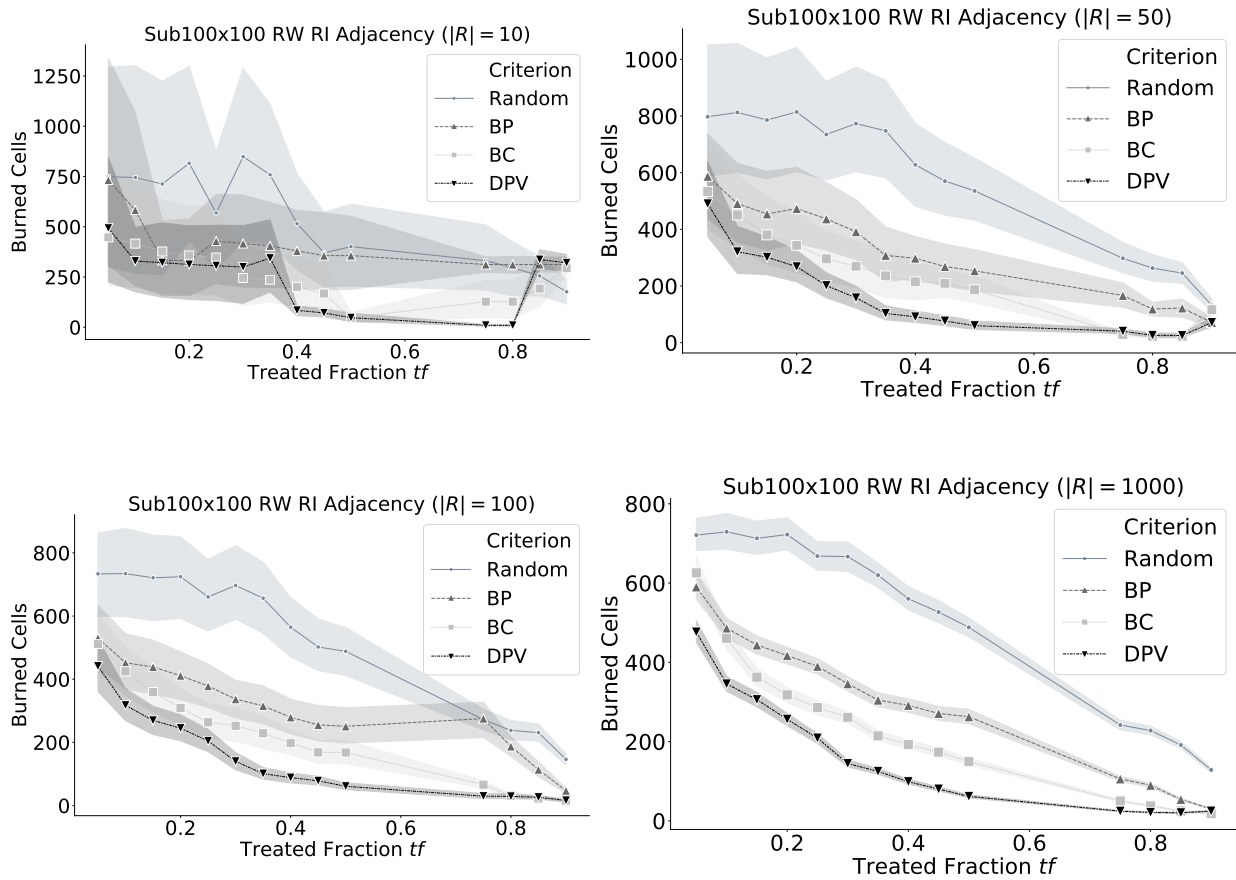


Figura 6.4: Experimentos resistentes al fuego de la instancia Sub100x100 con un número diferente de repeticiones en el escenario  $RW - RI$ .

## 6.2. Resistencia al fuego

El foco principal de este estudio está puesto en disminuir los daños esperados frente a incendios catastróficos.

Al observar los gráficos obtenidos de las instancias de Sub20, Sub40 y Sub100 como ejemplos (Figuras 6.2 , 6.3 y 6.4) se puede determinar que a medida aumenta el tamaño del conjunto de entrenamiento se hace más evidente la diferencia de rendimiento entre el decisor que no considera el riesgo de incendios versus cualquiera que sí lo hace. Además se observa la relación de rendimientos entre las diferentes heurísticas, ya que a medida que los resultados suelen ser consistentes entre todas las instancias. Donde el *DPV* aparece como la mejor opción en rendimiento, seguido por *BC* y luego *BP*. Esto independiente del nivel de tratamiento *tf* que se evalúa.

También se observa que los algoritmos no pueden capturar el riesgo potencial de incendio y los patrones de propagación de incendios dentro del paisaje al limitar el tamaño del conjunto de entrenamiento a 10 repeticiones, ya que, al capturar pocos escenarios probables, no modifica de manera efectiva la estructura del paisaje para minimizar las pérdidas por incendios forestales. Como se esperaba, su desempeño es inestable e impredecible, lo que lleva a planes de tratamiento que solo son útiles para un pequeño subconjunto de posibles incendios, al no poder capturar la estocasticidad detrás de los eventos de incendios forestales. De esta manera, no logran generar paisajes resistentes al fuego. Al aumentar el número de repeticiones a 50, 100 y 1000, se muestra cómo los algoritmos propuestos comienzan a converger hacia 0 celdas quemadas con respecto al nivel de tratamiento *tf*.

Por lo tanto, pueden proteger eficazmente el bosque a medida que se aumenta la fracción del paisaje a tratar. Además, se observa una disminución significativa (hasta del 90 %) de la desviación estándar en todos los casos, lo que indica que se encuentran planes de tratamiento más robustos y generales para preparar la tierra para eventos de incendios forestales. Este aspecto es crítico para el tomador de decisiones, ya que minimiza la probabilidad de tener un resultado muy malo ya que los conjuntos de entrenamiento más grandes incluyen escenarios catastróficos.

De los resultados detallados en las Tablas B.1 - B.9 de Anexos, se concluye que el modelo *DPV* es nuevamente capaz de obtener constantemente el mejor rendimiento en



todas las instancias. Dependiendo de la estructura del paisaje y del tamaño del conjunto de entrenamiento, *BC* surge como la segunda mejor medida para capturar el riesgo de propagación de incendios forestales dentro del bosque, pudiendo alcanzar un rendimiento similar al obtenido por *DPV* en ciertos paisajes (ej. la instancia Sub40x40) al evaluar la estructura final del combustible disponible después de aplicar el tratamiento. *BP* presenta el peor desempeño entre las métricas alternativas, obteniendo resultados ligeramente mejores que el tratamiento aleatorio (punto de referencia), no pudiendo capturar con éxito la propagación del incendio y la dinámica de crecimiento.

### 6.2.1. Impacto de diferentes fuentes de incertidumbre

Al comparar el impacto de las diferentes fuentes de incertidumbre incluidas en los experimentos, se advierte que todos los algoritmos implementados pueden converger hacia cero (sin celdas quemadas) con niveles de *tf* hasta 50% cuando se fija el punto de ignición en una cierta área (instancias *FI*). Ejemplos en las Figuras 6.5 y 6.6.

Aún variando las fuentes de incertidumbre, *DPV* surge como la mejor opción para todos los niveles de tratamiento. Puede detectar el área de ignición relevante y enfocar el tratamiento dentro de esa región desde los niveles más bajos de los planes de tratamiento (menor *tf*). Este patrón se observa en todos los paisajes y combinaciones con escenarios climáticos (*RW* o *FW*), alcanzando diferencias por encima del 50% con respecto a la segunda mejor métrica (*BC*) al comparar los tres primeros niveles de *tf* de 5%, 10%, y 15%. La selección aleatoria y los planes de recolección basados en *BP* son superador en todos los casos por *BC* y *DPV*. Estos resultados son significativamente útiles para los tomadores de decisiones que enfrentan fuertes limitaciones presupuestarias y operacionales donde los recursos se deben gastar de la manera más eficiente, seleccionando las unidades más relevantes para ser recolectadas justo al inicio del plan de tratamiento de combustible.

La efectividad de la estrategia de clasificación usando *BC* es similar a la lograda por el modelo *DPV* en casos con clima aleatorio *RW* y área de ignición fija *FI* (ver Tablas B.1 - B.9 en Anexos). Dado un clima constante en todos los incendios simulados, es capaz de capturar las secciones del paisaje que actúan como enlaces entre diferentes zonas, teniendo un fuerte poder predictivo de la dinámica de propagación del fuego

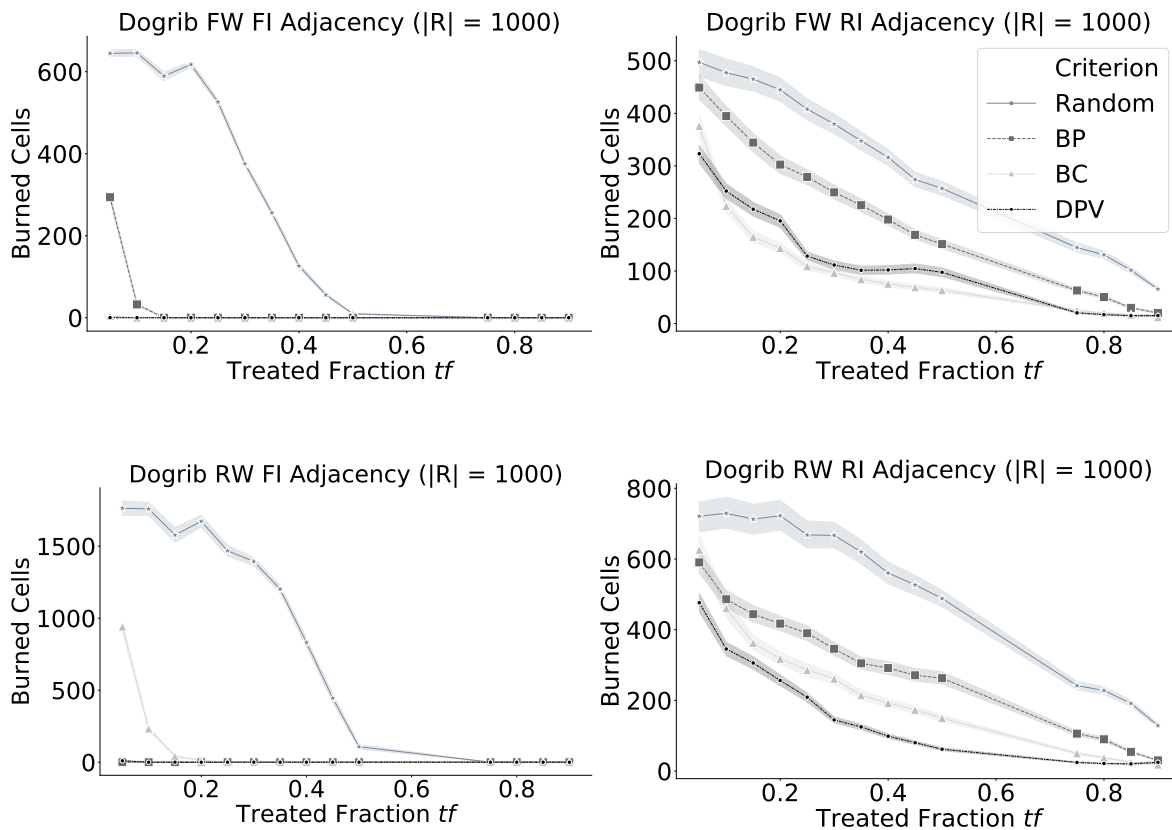


Figura 6.5: Efectividad del plan de tratamiento dependiendo del escenario simulado ( $|R| = 1000$ ) para la instancia Dogrid. Punto de ignición fijo ( $FI$ )(izquierda) vs punto de ignición aleatorio ( $RI$ )(derecha). Clima fijo ( $FW$ )(arriba) vs clima aleatorio ( $RW$ )(abajo.)

dado un clima esperado conocido.

El potencial del modelo DPV se observa plenamente cuando se experimenta con el escenario más difícil e interesante  $RW - RI$ , incluida la incertidumbre tanto en los pronósticos meteorológicos como en los puntos de ignición de incendios forestales.

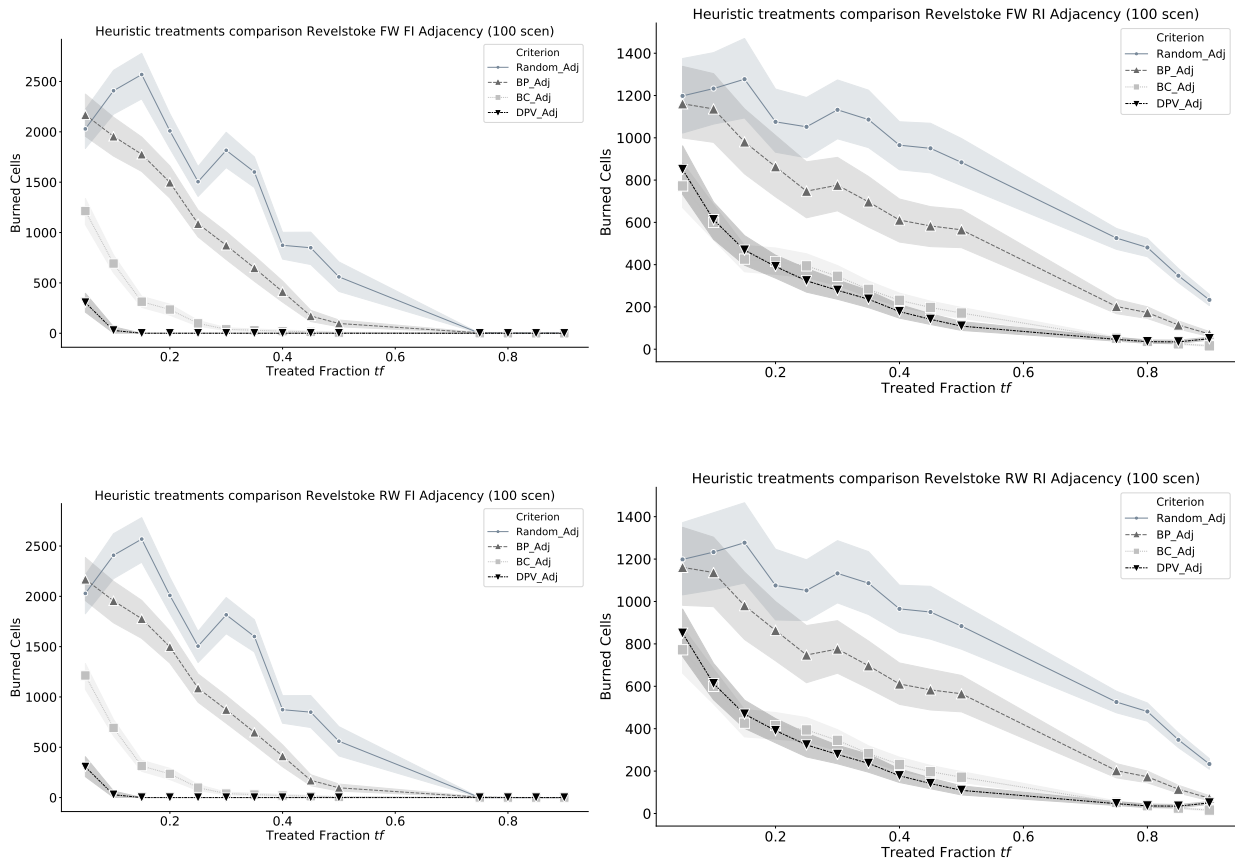


Figura 6.6: Efectividad del plan de tratamiento dependiendo del escenario simulado ( $|R| = 1000$ ) para la instancia Revelstoke. Punto de ignición fijo (*FI*)(izquierda) vs punto de ignición aleatorio (*RI*)(derecha). Clima fijo (*FW*)(arriba) vs clima aleatorio (*RW*)(abajo.)

## 6.3. Extensiones

### 6.3.1. Restricciones operacionales: adyacencia

Como se esperaba, la relajación de las restricciones de adyacencia genera planes de tratamiento más efectivos. (Ver Tabla 6.3 y Figura 6.7)

La explicación detrás de este patrón es simple: la introducción de la fragmentación y la discontinuidad de los combustibles dentro del paisaje se incrementa al permitir que el tomador de decisiones trate cualquier celda del bosque sin satisfacer esta restricción operativa dura, por lo tanto, concentra las acciones y recursos en esas celdas con mayor riesgo de propagar el fuego a otras secciones del paisaje y causar daños significativos al bosque.

Al replicar los experimentos anteriores sin incluir estas restricciones, se observa cómo todas las métricas implementadas pueden mejorar su rendimiento, disminuyendo el número promedio de celdas quemadas para todos los niveles de  $tf$ . Por ejemplo, se puede ver este patrón en la Figura 6.7 donde se contrastan los resultados para la instancia Sub40  $RW - RI$  ( $|R| = 1000$ ) con y sin satisfacer las restricciones de adyacencia. Como se comentó, se pueden encontrar planes más efectivos, que disminuyen el número promedio de celdas quemadas al relajar estas restricciones.

Al comparar el promedio de celdas quemadas en el nivel  $tf = 20\%$ , en la Tabla 6.3 se pueden observar diferencias significativas en las heurísticas que ocupan  $DPV$  y  $Random$ , sin embargo, no es así para  $BC$  y  $BP$ .

Métrica ocupada	Con rest. de adyacencia	Sin rest. de adyacencia
$DPV$	$234,6 \pm 216,9$	$168,3 \pm 145,9$
$BC$	$267,6 \pm 203,7$	$266,1 \pm 201,1$
$BP$	$254,5 \pm 213,3$	$253,4 \pm 212,0$
$Random$	$466,3 \pm 291,6$	$296,4 \pm 234,5$

Tabla 6.3: Promedio de celdas quemadas para la instancia 40x40 cumpliendo vs no cumpliendo las restricciones de adyacencia

Es interesante observar que el tratamiento aleatorio tiende a encontrar mejores políticas, ya que introduce una discontinuidad uniforme en el paisaje, siendo útil tanto

para frenar como para contener el crecimiento del fuego. Este patrón es claro en el ejemplo, donde supera consistentemente a *BC* y *BP* cuando  $tf \geq 30\%$ . A partir de los resultados de los experimentos en todos los casos, se concluye que tanto *DPV* como las políticas aleatorias pueden mejorar su rendimiento al relajar la restricción de adyacencia al intensificar la discontinuidad de los combustibles dentro del paisaje. La magnitud de esta mejora depende de la instancia, ya que los bosques con grandes regiones homogéneas (por ejemplo, la provincia de Alberta) se pueden tratar de manera más efectiva sin esta restricción operativa. Por otro lado, tanto *BC* como *BP* no están mejorando significativamente su rendimiento, al no poder aprovechar la región factible y relajada.

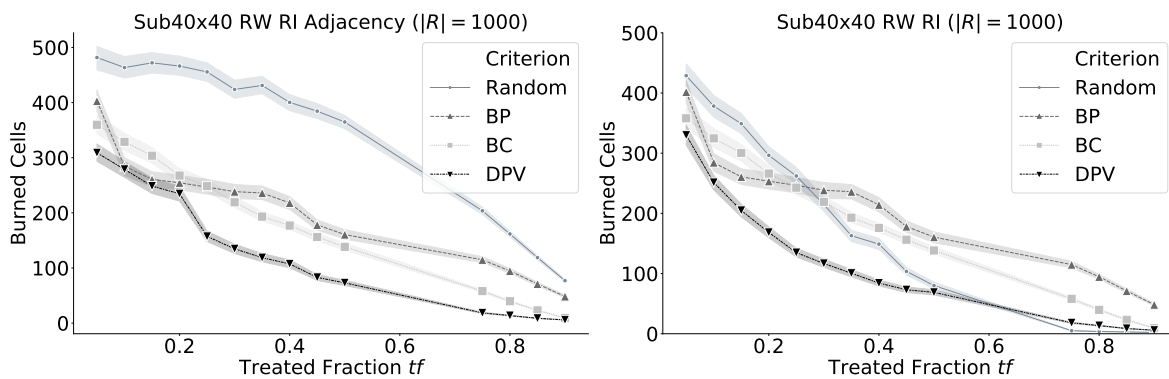


Figura 6.7: Comparación del rendimiento con (izq) y sin (der) incluir las restricciones de adyacencia para la instancia sub40x40

### Valor económico de las celdas y funciones de pesos

Diferentes secciones del paisaje podrían representar diferentes valores para el tomador de decisiones. Las áreas con bosques nativos, zonas densamente pobladas dentro del paisaje, o regiones con características naturales para albergar ciertas especies son desafíos clásicos que el tomador de decisiones debe tener en cuenta al resolver el problema de optimización. Todos estos elementos se pueden incorporar fácilmente en modificando (o agregando) el VaR incluido en el modelo *DPV*. De esta manera, ciertas rodales (conjunto de nodos) del bosque podrían tener diferentes pesos  $\nu_i$  al calcular el VaR global, y, por lo tanto, se les daría mayor importancia sobre el nivel de protección que necesitan, reflejado a través de los mapas de calor del *DPV*, como se ve en la Figura 6.8 donde se analizan algunas ponderaciones posibles para las sub-regiones del bosque y cómo estas pueden impactar en el plan de cosecha.

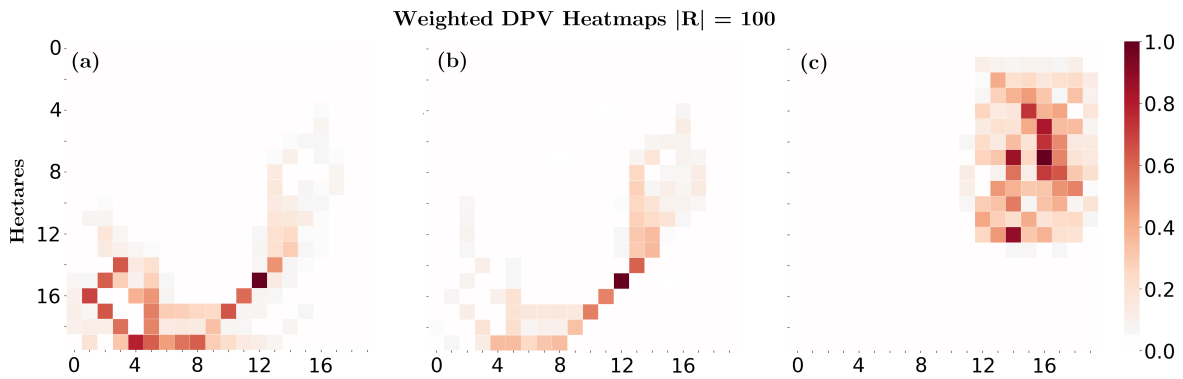


Figura 6.8: Mapas de calor del DPV de la misma instancia dependiendo del VaR utilizado

(a) DPV básico (b) Ponderando mayor el Bosque Nativo (c) Celdas con mayor valor comercial

## 6.4. Marco multi etapas

Extendiendo los modelos antes analizados al marco multi etapas, se resuelven una serie de problemas iterativos  $t \in T$  con  $T$  el conjunto que contiene todos los períodos hasta al horizonte de la planificación. Usando  $|T| = 4$ , se simula el problema al que se enfrenta un tomador de decisiones al determinar qué partes del paisaje deben ser tratadas entre temporadas de incendios. Para simplificar el análisis, se asume que solo se produce un incendio por temporada. Sin embargo, el DSS permite al usuario incluir tantos incendios como desee (número fijo, siguiendo un determinado historial o siguiendo una función de distribución de probabilidades). Además, los niveles de  $tf$  se calculan con respecto a las hectáreas de bosque restantes después de aplicar el plan de tratamiento de combustible y pasar la temporada de incendios, por cada período  $t$ .

Resolviendo el problema de múltiples etapas con  $|T| = 4$  en la instancia *Sub100*, se observa en la Figura 6.9 que el modelo *DPV* supera a las métricas alternativas, y las diferencias en el rendimiento son incluso mayores que en el problema de una sola etapa analizado en los puntos anteriores. Esto puede explicarse por el hecho de que los planes de tratamiento basados en *DPV* pueden modificar sistemáticamente el paisaje para transformarlo en un terreno resistente al fuego, minimizando las pérdidas esperadas debido a incendios forestales al capturar los patrones de propagación más frecuentes y su impacto en el ecosistema forestal y traducir esta información en una clasificación robusta para priorizar el tratamiento de las células.

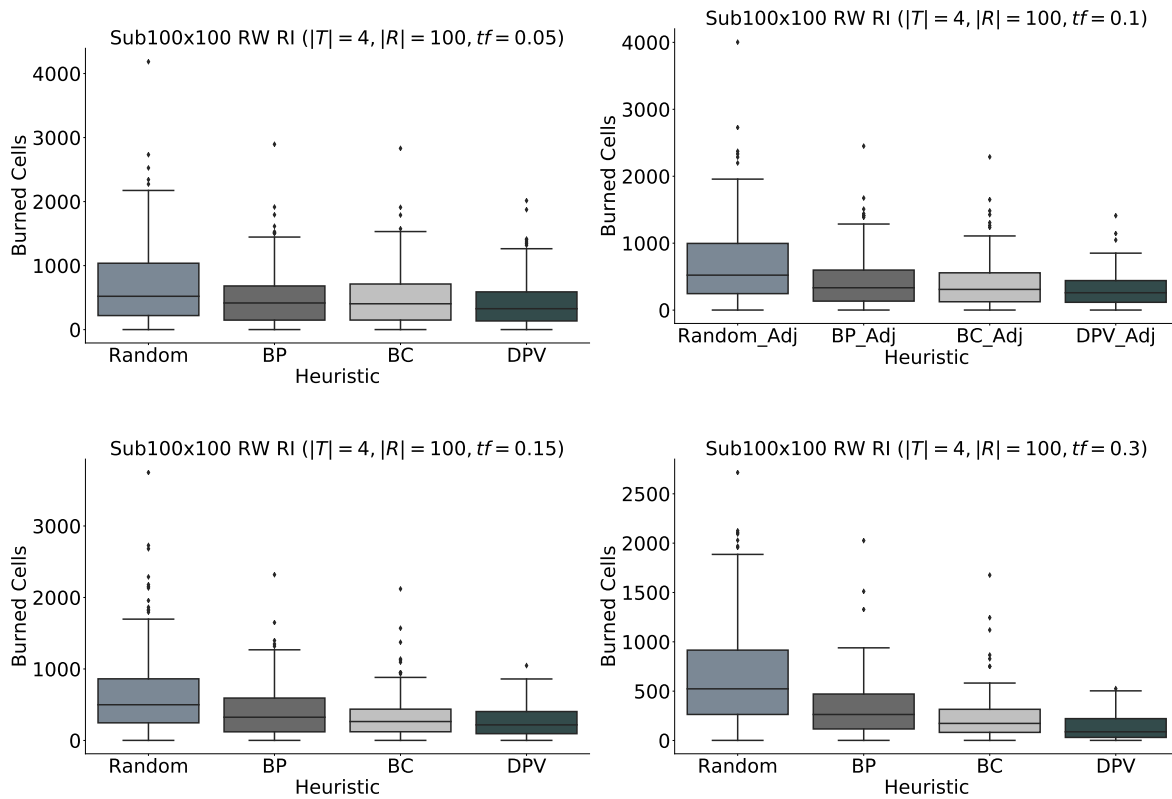


Figura 6.9: Comparación de rendimiento de algoritmos en la instancia Sub100 para niveles múltiples de  $tf$ .

Este esquema puede extenderse naturalmente a cualquier horizonte de planificación  $T$ , incluso con la posibilidad de utilizar diferentes VaR según el período  $t$ , lo que proporciona una gran flexibilidad para quien toma las decisiones. Es importante notar que en este estudio, se usa la información capturada por los árboles de propagación obtenidos durante la etapa de entrenamiento para calcular el VaR relevante de  $DPV$ . Después de cada temporada de incendios, el gráfico original se actualiza con el nuevo estado del bosque y las decisiones tomadas en el plan de cosecha anterior. Por lo tanto, no se realiza ninguna simulación nueva entre los períodos para actualizar el VaR dentro del gráfico. Aunque el segundo enfoque podría ser más efectivo ya que el nuevo gráfico se calcula con respecto a las trayectorias simuladas que dan cuenta del nuevo estado del paisaje, requiere una cantidad significativa de tiempo para ser evaluado, se realizarían desde  $|T| \times |R|$  simulaciones. Esta versión y los enfoques alternativos/complementarios se están estudiando y se cubrirán en un estudio futuro.

### 6.4.1. Información adicional y posibles aplicaciones

Además de toda la discusión anterior, se obtiene una serie de resultados valiosos de la ejecución de la metodología propuesta, que permite al tomador de decisiones actualizar o modificar sus Valores al Riesgo relevantes en función de la información recopilada de los experimentos. Por ejemplo:

1. Los tiempos de viaje más cortos entre todos los nodos dentro de un Árbol de propagación podrían proporcionar información crítica al planificar las actividades de supresión y la asignación de recursos. Conocer la frecuencia y los patrones de propagación de los incendios potenciales más probables dentro del paisaje podría usarse para generar planes de prevención eficientes, así como también para ayudar a estimar la cantidad de unidades de diferentes recursos de supresión necesarios para actuar bajo varios escenarios para suprimir un incendio detectado.
2. El usuario puede probar y adaptar fácilmente las métricas personalizadas basadas en *DPV*. Después de desarrollar una serie de experimentos para el paisaje en estudio, el tomador de decisiones podría modificar, mezclar o incluso proponer un VaR completamente nuevo para su bosque, explotando todo el conocimiento obtenido de múltiples repeticiones y el rendimiento alcanzado por las métricas propuestas durante los experimentos. De esta manera, las métricas generales como *DPV* ponderadas por *BC* e incluyendo las probabilidades de descargas eléctricas pueden probarse fácilmente en nuestro DSS de código abierto, lo que brinda una total flexibilidad y un gran potencial para el sistema.



# Capítulo 7

## Conclusiones y Trabajo Futuro

La metodología propuesta ha sido evaluada utilizando instancias realistas y entornos experimentales exhaustivos. Los resultados indican que mejora significativamente el rendimiento obtenido por los enfoques tradicionales y alternativos cuando se mide el riesgo de incendios forestales en diferentes secciones de un paisaje, lo que hace posible al planificador de decisiones desarrollar planes de manejo de combustible más efectivos. Permite al responsable de la toma de decisiones tener en cuenta explícitamente e incorporar el riesgo de incendios forestales como parte del proceso de toma de decisiones. Usando el DSS propuesto, los administradores de paisajes podrán incluir sus VaR relevantes como parte de los cálculos de *DPV*, obteniendo información cuantitativa sobre la importancia de cada celda o rodal dentro del paisaje para minimizar el impacto y las pérdidas asociadas con los incendios forestales. Resolviendo un problema explícito de optimización, incluyendo restricciones y objetivos adicionales según sea necesario, se proporciona una metodología flexible y robusta y un DSS de código abierto para realizar una gestión táctica de combustible sistemática, efectiva y eficiente.

La capacidad de aprendizaje del DSS propuesto al aumentar el tamaño del conjunto de entrenamiento, así como su flexibilidad, expansión y personalización natural, lo convierten en un sistema poderoso no solo para los administradores de paisajes sino también para una comunidad de investigación más amplia involucrada en temas como animales la conservación (por ejemplo, la inclusión de corredores de conectividad dentro del paisaje) bajo el riesgo de incendios forestales, el modelado de dinámicas de plagas y la industria forestal en general, entre otras posibilidades.

La principal conclusión que se puede obtener es que al incluir información del riesgo de incendios en la planificación forestal, las pérdidas esperadas son siempre menores que las de un decisor que no las considera y sólo maximiza utilidades.

Varios retos futuros de investigación permanecen abiertos. En la versión actual, se calcula un VaR individual ( $DPV$ ) para que cada celda se asocie con un valor. Sin embargo, diferentes configuraciones de celdas cosechadas podrían llevar a un mejor o peor desempeño, incluso cuando la suma individual o total de  $DPV$  es idéntica. Las investigaciones futuras podrían explorar el valor de la interacción entre las células de una manera simple pero efectiva: dado su VaR individual, la ubicación en el gráfico, el grado y otras características o calcular el  $DPV$  total ponderado por un factor que capture la interacción entre las celdas. Se podría aplicar un enfoque de evaluación basado en la simulación, probando diferentes combinaciones o formas de celdas y registrando las más efectivas para comprender los patrones subyacentes que las hacen más efectivas. Sin embargo, el problema es altamente combinatorio, aumenta exponencialmente con el tamaño de la instancia y, por lo tanto, es extremadamente exigente desde una perspectiva computacional.

El enfoque actual de múltiples etapas es miope en el sentido de que las decisiones se toman en función del estado real. Esto se repite para cada periodo de decisión. Una alternativa es modelar el problema táctico/estratégico completo como un problema estocástico en varias etapas. Sin embargo, desencadena varios desafíos, como la complejidad del modelo o la definición del escenario (contenido, número, probabilidades asociadas). Por lo tanto, sigue siendo un desafío abierto.

Una vez se toman decisiones que afectan el bosque, como la cosecha de ciertas celdas, se modifica el VaR del bosque completo. Cómo poder actualizar sin ejecutar nuevas simulaciones es una pregunta de investigación interesante. En la versión actual, se eliminan los valores de las celdas ya cortadas y se recalculan los VaR restantes, sin embargo, ese valor se calculó después de simular incendios con la configuración original del bosque y, por lo tanto, no son completamente representativos de la nueva situación. Para abordar esta limitación, actualmente se está explorando el uso de técnicas de aprendizaje supervisado para entrenar un modelo como parte de un artículo de investigación futuro de la siguiente manera:

1. Generar un gran conjunto de datos de entrenamiento que contenga simulaciones de

incendios de diferentes clases de bosques (homogéneo, heterogéneo, ciertos tipos de combustible/climas, etc.)

2. El VaR relevante se calcula utilizando el método expuesto
3. Utilizando los datos de la instancia como entradas, se entrena un modelo de Deep Learning para estimar el valor del VaR de la instancia, actuando como una etiqueta para la muestra.
4. Una vez que el modelo alcanza un buen desempeño, se usa como un indicador para calcular el VaR de una instancia “sobre la marcha”, corrigiendo los valores originales cada nuevo período . La idea es aumentar el tamaño del conjunto de datos con cada nuevo incendio simulado, mejorando el rendimiento del modelo a lo largo del tiempo.

De manera similar, el espacio de acción se ampliará en futuras investigaciones, desde un entorno de cosecha pura/binaria hasta una versión flexible que incluya múltiples acciones de manejo como la poda, adelgazamiento o la aplicación de diferentes tratamientos (por ejemplo, uso de retardantes de fuego) con el objetivo de desarrollar un Modelo de decisión aún más realista.

# Bibliografía

- [1] ACUÑA, M., PALMA, C., CUI, W., MARTELL, D., AND WEINTRAUB, A. Integrated spatial fire and forest management planning. *NRC Research Press* (2010).
- [2] ALBINI, F. A. Estimating wildfire behavior and effects. *Gen. Tech. Rep. INT-GTR-30. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p. 30* (1976).
- [3] ÁLVAREZ-MIRANDA, E., LJUBIĆ, I., AND MUTZEL, P. The maximum weight connected subgraph problem. In *Facets of Combinatorial Optimization*. Springer, 2013, pp. 245–270.
- [4] ANDERSON, D., CATCHPOLE, E., DE MESTRE, N., AND PARKES, T. Modeling the spread of grass fires. *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics 23* (04 1982), 451 – 466.
- [5] ANDREWS, P. L. *The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation*. General technical report RMRS. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2018.
- [6] BURGAN, R. E., AND ROTHERMEL, R. C. Behave: fire behavior prediction and fuel modeling system–fuel subsystem. *General Technical Report INT-167. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p. 167* (1984).
- [7] CARRASCO, J., PAIS, C., SHEN, Z.-J. M., AND WEINTRAUB, A. Adjusting rate of spread factors through derivative-free optimization: A new methodology to

- 
- improve the performance of forest fire simulators. *arXiv preprint arXiv:1909.05949* (2019).
- [8] CARRASCO BARRA, J. A. *Advanced techniques in forest management under conditions of fire uncertainty*. PhD thesis, Universidad de Chile, 2019.
- [9] CARVAJAL, R., CONSTANTINO, M., GOYCOOLEA, M., VIELMA, J. P., AND WEINTRAUB, A. Imposing connectivity constraints in forest planning models. *Operations Research* 61, 4 (2013), 824–836.
- [10] CHUNG, W. Optimizing fuel treatments to reduce wildland fire risk. *Current Forestry Reports* 1, 1 (2015), 44–51.
- [11] CLARKE, K. C., BRASS, J. A., AND RIGGAN, P. J. A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60 (11): 1355-1367 60, 11 (1994), 1355–1367.
- [12] CONAF. Sector forestal chileno: Desafíos y visión 2015-2035. documento guía para la formulación de la política forestal chilena. Tech. rep., Ministerio de Agricultura, 2015.
- [13] CONAF. Análisis de la afectación y severidad de los incendios forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de coquimbo y los ríos de Chile. Tech. rep., Ministerio de Agricultura, 2017.
- [14] CONRAD, J. M., GOMES, C. P., VAN HOEVE, W.-J., SABHARWAL, A., AND SUTER, J. F. Wildlife corridors as a connected subgraph problem. *Journal of Environmental Economics and Management* 63, 1 (2012), 1–18.
- [15] EDWARDS, W. P. The new normal: Living with wildland fire. *Natural Resources & Environment* 33, 3 (2019), 30–33.
- [16] FINNEY, M. A. Farsite: A fire area simulator for fire managers1. *Forest Service, U.S. Department of Agriculture* (01 1994), 55–56.
- [17] FINNEY, M. A. Farsite: Fire area simulator—model development and evaluation. *USDA Forest Service - Research Papers RMRS* (03 1998).

- 
- [18] FINNEY, M. A. Design of regular landscape fuel treatment patterns for modifying fire growth and behavior. *Forest Science* 47, 2 (2001), 219–228.
- [19] FINNEY, M. A. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management* 211 (06 2005), 97–108.
- [20] FINNEY, M. A., MCHUGH, C. W., GRENFELL, I. C., RILEY, K. L., AND SHORT, K. C. A simulation of probabilistic wildfire risk components for the continental united states. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25, 7 (2011), 973–1000.
- [21] FRANDBEN, W. H. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame* 16, 1 (1971), 9–16.
- [22] FREEMAN, L. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry* 40 (1977), 35–41.
- [23] GILL, A. M., STEPHENS, S. L., AND CARY, G. J. The worldwide “wildfire” problem. *Ecological applications* 23, 2 (2013), 438–454.
- [24] GRAY, M., AND DICKSON, B. Applying fire connectivity and centrality measures to mitigate the cheatgrass-fire cycle in the arid west, usa. *Landscape Ecology* 31 (2016), 1–16.
- [25] GROUP, F. D. *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behaviour System*. Forestry Canada, 1992.
- [26] GYSLING, A., ET AL. Anuario forestal 2018. Tech. rep., Ministerio de Agricultura and INFOR: Instituto Forestal, 2018.
- [27] HIRSCH, K., KAFKA, V., TYMSTRA, C., MCALPINE, R., HAWKES, B., STEGEHUIS, H., QUINTILIO, S., GAUTHIER, S., AND PECK, K. Fire-smart forest management: a pragmatic approach to sustainable forest management in fire-dominated ecosystems. *The Forestry Chronicle* 77, 2 (2001), 357–363.
- [28] HUYGENS, C. *Traité de la lumière, où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la réflexion, et dans la réfraction, et particulièrement dans l'étrange réfraction du cristal d'Islande: Avec un discours de la cause de la pesanteur*. Pierre

- van der Aa, 1690.
- [29] JOHNSON, D. S. The np-completeness column: an ongoing guide. *Journal of Algorithms* 6, 3 (1985), 434–451.
- [30] JULIO, G., PEDERNERA, P., AND CASTILLO, E. Diseño funcional de simulador de incendios forestales. *Actas Taller Internacional. Proyecto FONDEF FI-13. Santiago* (1995), 182–204.
- [31] KARAFYLLIDIS, I., AND THANAILAKIS, A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling* 99 (06 1997), 87–97.
- [32] LIU, Z., YANG, J., AND HE, H. S. Studying the effects of fuel treatment based on burn probability on a boreal forest landscape. *Journal of environmental management* 115 (2013), 42–52.
- [33] MATSYPURA, D., PROKOPYEV, O. A., AND ZAHAR, A. Wildfire fuel management: network-based models and optimization of prescribed burning. *European Journal of Operational Research* 264, 2 (2018), 774–796.
- [34] MILLER, C., PARISIEN, M., AGER, A., AND FINNEY, M. Evaluating spatially explicit burn probabilities for strategic fire management planning. *Transactions on Ecology and the Environment* 19 (2008), 245–252.
- [35] NTAIMO, L., AND ZEIGLER, B. Expression of a forest cell model in parallel devts and timed cell-devts formalisms, 2004.
- [36] NYLAND, R. D. *Silviculture: concepts and applications*. Waveland Press, 2016.
- [37] PAIS, C., CARRASCO, J., MARTELL, D. L., WEINTRAUB, A., AND WOODRUFF, D. L. Cell2fire: A cell based forest fire growth model. *arXiv preprint arXiv:1905.09317* (2019).
- [38] PALMA, C., CUI, W., MARTELL, D., ROBAK, D., AND WEINTRAUB, A. Assessing the impact of stand-level harvests on the flammability of forest landscapes. *International Journal of Wildland Fire* 16 (2007), 584–592.
- [39] PAPADOPOULOS, G., AND PAVLIDOU, F.-N. A comparative review on wildfire

- simulators. *IEEE Systems Journal* 5, 2 (2011), 233–243.
- [40] PARISIEN, M.-A., KAFKA, V., HIRSCH, K., B. TODD, J., G. LAVOIE, S., AND D. MACZEK, P. Mapping wildfire susceptibility with the burn-p3 simulation model. Tech. rep., Canadian Forest Service, 2005.
- [41] PARISIEN, M.-A., PARKS, S. A., MILLER, C., KRAWCHUK, M. A., HEATHCOTT, M., AND MORITZ, M. A. Contributions of ignitions, fuels, and weather to the spatial patterns of burn probability of a boreal landscape. *Ecosystems* 14, 7 (2011), 1141–1155.
- [42] RIDEOUT, D., LOOMIS, J., AND N. OMI, P. Incorporating non-market values in fire management planning 1. In *Proceedings of the Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Bottom Lines* (04 1999), United States Department of Agriculture Forest Service, pp. 217–225.
- [43] ROTHERMEL, R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wild land fuels. *USDA Forest Service Research Paper 115* (01 1972).
- [44] ROTHERMEL, R. C. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Tech. rep., USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 06 1983.
- [45] RUNNING, S. M. Is global warming causing more large wildfires? *Science* 313 (2006), 927–928.
- [46] RUSSO, L., RUSSO, P., EVAGGELIDIS, I., AND SIETTOS, C. Complex network statistics to the design of fire breaks for the control of fire spreading. *Chemical Engineering Transactions* (2015).
- [47] RUSSO, L., RUSSO, P., AND SIETTOS, C. I. A complex network theory approach for the spatial distribution of fire breaks in heterogeneous forest landscapes for the control of wildland fires. *PLoS one* 11, 10 (2016), e0163226.
- [48] SALIS, M., LACONI, M., AGER, A. A., ALCASENA, F. J., ARCA, B., LOZANO, O., DE OLIVEIRA, A. F., AND SPANO, D. Evaluating alternative fuel treatment strategies to reduce wildfire losses in a mediterranean area. *Forest Ecology and Management* 368 (2016), 207–221.



- 
- [49] STEPHENS, S., AND MOGHADDAS, J. Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a california mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management* 215 (2005), 21–36.
- [50] SULLIVAN, A. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire* 18 (07 2009), 349–368.
- [51] SULLIVAN, A. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire* 18 (07 2009), 369–386.
- [52] SULLIVAN, A. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire* 18 (07 2009), 387–403.
- [53] TAYLOR, S. W., AND ALEXANDER, M. E. Science, technology, and human factors in fire danger rating: the canadian experience. *International Journal of Wildland Fire* 15, 1 (2006), 121–135.
- [54] TYMSTRA, C., BRYCE, R., WOTTON, B., TAYLOR, S., AND ARMITAGE, O. Development and structure of prometheus: the canadian wildland fire growth simulation model. Tech. rep., Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2010.
- [55] VAN WAGNER, C. A simple fire-growth model. *The Forestry Chronicle* 45, 2 (1969), 103–104.
- [56] VON NEUMANN, J. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA, 1966.
- [57] WESTERLING, A. L. Increasing western us forest wildfire activity: sensitivity to changes in the timing of spring. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371, 20150178 (2016).
- [58] WESTERLING, A. L., HIDALGO, H. G., CAYAN, D. R., AND TW., S. Warming and earlier spring increase western us forest wildfire activity. *Science* 313 (2006), 940–943.

# Anexos

## Anexo A

### Capacidad de aprendizaje

<i>tf</i> %	Sub20						Sub40						Sub100					
	Métrica	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*		Mean	Max	STD	$\Delta$ %*		Mean	Max	STD	$\Delta$ %*			
5 %	BP 10	184.2	271	100.7	0		399.2	1258	308.2	0		687.0	3795	704.9	0.0			
	BP 100	181.6	271	102.1	-1.4		369.4	1258	297.1	-7.5		515.7	2895	506.4	-25.0			
	BC 10	166.8	271	103.4	-9.5		330.7	1208	274.1	-17.5		479.9	2804	480.2	-30.2			
	BC 100	169.0	270	101.9	-8.2		329.4	1181	277.9	-17.5		460.0	2831	498.4	-33.0			
	DPV 10	58.8	157	44.4	-68.1		337.5	1229	292.3	-15.4		486.0	2417	499.3	-29.3			
	DPV 100	47.3	128	39.3	-74.3		274.8	1211	275.6	-31.2		258.0	1415	334.3	-62.4			
10 %	BP 10	162.6	256	102.6	0		309.5	1115	279.8	0		529.9	3089	602.6	0			
	BP 100	161.9	100.9	-0.5	265.7		1068	256.3	-14.1	419.4		2450	459.4	-20.9				
	BC 10	120.7	256	92.9	-25.77		256.3	1000	221.2	-17.2		367.8	2464	438.3	-30.6			
	BC 100	141.9	256	92.9	-25.8		272.8	1077	246.6	-11.9		319.7	2289	415.7	-39.7			
	DPV 10	44.8	128	37.1	-72.5		249.3	1104	250.8	-19.4		332.1	1567	371.5	-37.3			
	DPV 100	33.1	105	31.6	-79.6		186.8	856	228.4	-39.6		170.8	1144	233.2	-67.8			
15 %	BP 10	137.4	240	101.4	-0.6		287.4	1073	274.6	0		446.7	2237	517.5	0			
	BP 100	138.1	240	99.7	0		247.0	1015	244.6	-14.1		390.7	2319	433.3	-12.5			
	BC 10	101.6	239	86.5	-26.4		191.5	837	195.6	-33.4		298.9	2258	407.7	-33.1			
	BC 100	120.9	240	93.5	-12.5		218.7	898	213.0	-23.9		243.5	2120	359.8	-45.5			
	DPV 10	36.6	111	31.2	-73.5		174.2	847	182.4	-39.4		234.0	1377	303.4	-47.6			
	DPV 100	24.6	81	26.3	-82.2		96.7	502	127.3	-66.4		106.9	774	173.8	-76.1			
20 %	BP 10	116.5	225	97.8	-0.4		249.4	1021	262.8	0		391.8	2028	464.5	0			
	BP 100	117.0	225	97.8	0		222.2	919	229.3	-10.9		317.2	2204	399.6	-19.0			
	BC 10	81.5	223	75.0	-30.3		151.2	789	170.9	-39.4		255.4	2077	378.1	-34.8			
	BC 100	88.6	221	83.7	-24.3		162.7	778	170.8	-34.8		205.2	1958	316.4	-47.6			
	DPV 10	28.6	81	26.5	-75.5		121.6	767	146.5	-51.2		186.2	1208	276.1	-52.5			
	DPV 100	18.7	77	22.3	-84.1		71.5	471	104.9	-71.4		86.2	762	159.5	-78.0			
25 %	BP 10	101.8	210	91.8	0		214.6	921	241.2	0		309.0	1916	392.2	0			
	BP 100	101.8	210	92.0	0		206.9	883	222.0	-3.6		279.1	2111	369.0	-9.7			
	BC 10	51.1	129	47.4	-49.8		126.6	742	151.6	-41.0		233.0	1899	357.5	-24.6			
	BC 100	69.4	204	71.6	-31.8		138.4	718	154.6	-35.5		170.4	1807	285.6	-44.8			
	DPV 10	21.8	77	23.8	-78.6		100.4	715	128.7	-53.2		153.6	973	237.5	-50.4			
	DPV 100	15.1	69	19.7	-85.2		58.4	447	94.1	-72.8		56.6	525	121.4	-81.7			

Tabla A.1: Experimentos de resistencia al fuego para las instancias Sub20, Sub40 y Sub100 instances. \*La diferencia de rendimiento *Delta* % se calcula para cada nivel de tratamiento *tf* con respecto al peor rendimiento (mayor número promedio de celdas quemadas) obtenidas entre todas las métricas.

<i>tf</i> %	Dogrib					Mica Creek					Central Kootenay				
	Métrica	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*		
5%	BP 10	358.5	1407	370.4	0	590.6	1969	519.0	0	525.5	2459	605.5	0		
	BP 100	350.0	1382	359.9	-2.4	574.4	1969	520.3	-2.7	460.4	2047	503.8	-12.4		
	BC 10	325.4	1292	316.1	-9.2	536.2	1953	518.9	-9.2	439.5	2131	518.8	-16.4		
	BC 100	228.8	806	217.3	-36.2	495.1	1648	406.8	-16.2	404.9	1637	390.9	-23.0		
	DPV 10	311.4	1248	319.8	-13.2	495.8	1878	495.2	-16.0	437.4	2091	516.8	-16.8		
	DPV 100	177.0	688	166.8	-50.6	409.2	1595	340.5	-30.7	363.6	2508	494.9	-30.8		
10%	BP 10	321.3	1297	338.5	0	510.5	1956	535.4	-0.9	493.8	2352	577.9	0		
	BP 100	291.5	1224	318.4	-9.3	525.1	1969	538.6	0	380.2	1516	384.0	-23.0		
	BC 10	271.9	1095	270.0	-15.4	467.9	1884	513.9	-10.9	378.7	1961	503.3	-23.3		
	BC 100	141.4	488	145.5	-56.0	406.6	1517	362.0	-22.6	314.7	1207	280.8	-36.3		
	DPV 10	257.7	840	257.9	-19.8	429.1	1866	518.2	-18.3	383.3	1976	506.3	-22.4		
	DPV 100	124.0	497	131.9	-61.4	271.1	973	242.2	-48.4	189.5	1059	208.6	-61.6		
15%	BP 10	282.2	1189	318.1	0	479.1	1913	524.8	0	431.3	2125	522.3	0		
	BP 100	258.7	1121	290.1	-8.3	464.1	1883	515.3	-3.1	306.5	1291	312.3	-28.9		
	BC 10	227.7	882	238.4	-19.3	429.5	1853	509.4	-10.4	357.6	1810	481.2	-17.1		
	BC 100	104.3	418	119.7	-63.0	326.4	1309	294.9	-31.9	240.1	997	228.4	-44.3		
	DPV 10	199.0	730	217.2	-29.5	402.1	1856	524.3	-16.1	359.2	1821	484.6	-16.7		
	DPV 100	108.2	484	119.7	-63.0	202.8	913	213.6	-57.7	121.9	653	156.5	-71.8		
20%	BP 10	257.4	1081	309.1	0	417.0	1774	489.8	0	369.9	1805	476.8	0		
	BP 100	226.5	1000	261.5	-12.0	396.2	1705	468.4	-5.0	230.6	1025	266.2	-37.7		
	BC 10	185.4	771	211.6	-28.0	395.1	1837	517.1	-5.3	346.9	1765	475.8	-6.2		
	BC 100	90.7	346	105.4	-64.8	263.3	1155	256.9	-36.9	184.1	587	182.6	-50.2		
	DPV 10	162.4	652	188.3	-36.9	383.6	1840	526.0	-8.0	352.3	1789	480.2	-4.73		
	DPV 100	77.2	407	107.0	-70.0	116.1	555	148.0	-72.2	99.5	506	134.4	-73.1		
25%	BP 10	230.5	955	283.6	0	391.7	1774	496.5	0	357.1	1782	476.8	0		
	BP 100	190.7	898	228.5	-17.3	337.3	1545	421.4	-13.9	205.4	1025	258.8	-42.5		
	BC 10	156.5	648	193.2	-32.1	374.0	1817	519.8	-4.5	342.9	1757	476.8	-3.99		
	BC 100	64.0	249	76.6	-72.3	224.9	1002	229.9	-42.6	154.3	529	155.7	-56.8		
	DPV 10	128.4	502	152.0	-44.3	359.3	1812	523.3	-8.3	342.7	1757	476.9	-4.1		
	DPV 100	62.3	360	100.2	-73.0	95.6	550	136.0	-75.6	73.8	384	105.5	-79.3		

Tabla A.2: Experimentos de resistencia al fuego para las instancias Dogrib, Mica Creek, y Central Kootenay instances. \*La diferencia de rendimiento *Delta* % se calcula para cada nivel de tratamiento *tf* con respecto al peor rendimiento (mayor número promedio de celdas quemadas) obtenidas entre todas las métricas.

<i>tf</i> %	Revelstoke					Arrowhead					Glacier National Park						
	Métrica	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*	Mean	Max	STD	$\Delta$ %*
5 %	BP 10	729.1	1579	466.0	0	1387.1	4666	1277.5	0	1100.3	3192	757.4	0	1100.3	3192	757.4	0
	BP 100	599.0	1617	417.6	-17.9	1348.3	4671	1241.5	-2.8	1035.8	3107	777.0	-5.9	1035.8	3107	777.0	-5.9
	BC 10	556.6	1506	400.0	-23.7	997.7	2686	765.7	-28.1	916.0	2893	687.8	-16.8	916.0	2893	687.8	-16.8
	BC 100	543.3	1466	370.1	-25.5	905.7	3093	883.6	-34.7	850.9	2424	649.0	-22.7	850.9	2424	649.0	-22.7
	DPV 10	564.4	1487	403.0	-22.6	867.5	2256	748.1	-37.5	813.3	2676	607.7	-26.1	813.3	2676	607.7	-26.1
	DPV 100	450.9	1488	353.8	-38.2	702.4	3054	824.5	-49.4	649.6	1674	538.0	-41.0	649.6	1674	538.0	-41.0
10 %	BP 10	636.3	1531	451.7	0	1248.5	4324	1155.2	0	1001.0	3112	772.8	0	1001.0	3112	772.8	0
	BP 100	527.2	1563	383.2	-17.1	1168.0	4657	1207.3	-6.4	928.7	2881	742.9	-7.2	928.7	2881	742.9	-7.2
	BC 10	513.3	1497	401.4	-19.3	766.4	2243	679.2	-38.6	765.4	2807	691.4	-23.5	765.4	2807	691.4	-23.5
	BC 100	430.6	1269	309.1	-32.3	626.5	2772	709.3	-49.8	593.3	1794	519.5	-40.7	593.3	1794	519.5	-40.7
	DPV 10	495.5	1444	402.8	-22.12	597.6	1883	509.3	-52.1	621.8	2496	552.4	-37.9	621.8	2496	552.4	-37.9
	DPV 100	300.1	1061	280.9	-52.7	505.0	2281	728.1	-59.6	403.2	1420	441.5	-59.7	403.2	1420	441.5	-59.7
15 %	BP 10	560.5	1506	432.4	0	1111.2	3990	1048.0	0	909.8	3012	773.0	0	909.8	3012	773.0	0
	BP 100	414.1	1398	346.8	-26.0	1057.8	4604	1190.9	-4.8	769.5	2366	671.4	-15.4	769.5	2366	671.4	-15.4
	BC 10	455.1	1483	398.2	-18.8	597.1	1877	575.3	-46.3	701.2	2752	695.7	-22.9	701.2	2752	695.7	-22.9
	BC 100	350.8	885	274.6	-37.4	491.6	1800	453.3	-58.3	417.5	1507	419.2	-54.1	417.5	1507	419.2	-54.1
	DPV 10	456.8	1432	392.9	-18.5	463.8	1800	453.3	-58.3	516.8	2280	528.7	-43.2	516.8	2280	528.7	-43.2
	DPV 100	210.8	793	216.3	-62.4	324.2	1930	548.3	-70.8	216.2	1090	285.0	-76.2	216.2	1090	285.0	-76.2
20 %	BP 10	464.4	1481	412.8	0	960.1	3506	935.8	0	858.3	3012	772.1	0	858.3	3012	772.1	0
	BP 100	363.8	1232	316.4	-21.7	948.6	4540	1169.7	-1.2	685.1	2366	666.3	-20.2	685.1	2366	666.3	-20.2
	BC 10	406.7	1437	396.2	-12.4	454.0	1776	430.0	-52.7	650.5	2541	682.3	-24.2	650.5	2541	682.3	-24.2
	BC 100	263.1	730	245.5	-43.3	347.3	2123	516.9	-63.8	266.3	1242	322.5	-69.0	266.3	1242	322.5	-69.0
	DPV 10	409.0	1407	382.7	-11.9	340.7	1779	378.6	-64.5	398.3	2112	486.0	-53.6	398.3	2112	486.0	-53.6
	DPV 100	159.4	642	183.1	-65.7	127.2	805	231.0	-86.8	135.4	1053	221.9	-84.2	135.4	1053	221.9	-84.2
25 %	BP 10	418.2	1446	392.8	0	791.1	3080	911.0	-2.4	800.5	2992	760.3	0	800.5	2992	760.3	0
	BP 100	310.6	979	277.3	-25.7	810.7	4331	1096.1	0	640.1	2359	666.7	-20.0	640.1	2359	666.7	-20.0
	BC 10	364.3	1402	395.3	-12.8	374.4	1756	396.3	-53.8	577.9	2564	663.0	-27.8	577.9	2564	663.0	-27.8
	BC 100	201.3	698	146.6	-75.5	274.8	1937	427.9	-66.1	220.8	1150	284.8	-72.4	220.8	1150	284.8	-72.4
	DPV 10	370.5	1366	383.2	-11.4	281.1	1737	348.0	-65.3	349.1	1919	453.3	-56.4	349.1	1919	453.3	-56.4
	DPV 100	102.6	630	146.6	-75.5	58.4	632	139.1	-92.8	111.3	917	198.5	-86.1	111.3	917	198.5	-86.1

Tabla A.3: Experimentos de resistencia al fuego para las instancias Revelstoke, Arrowhead, y Glacier National Park. \*La diferencia de rendimiento  $\Delta$  se calcula para cada nivel de tratamiento  $tf$  con respecto al peor rendimiento (mayor número promedio de celdas quemadas) obtenidas entre todas las métricas.

# Anexo B

## Resultados experimentos

Escenario	R	Random					BP					BC					FPV					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
<i>RW - RI</i>	10	94.8	87.2	84.0	60.4	37.6	99.5	88.7	58.8	17.7	12.6	65.0	38.1	31.9	17.0	7.2	55.3	30.5	23.9	29.8	20.8	42.1	34.5	24.4	28.6	13.2
	100	84.8	70.3	60.2	46.6	32.0	74.9	67.4	54.1	27.0	12.0	67.5	58.8	40.9	15.1	5.0	62.6	51.5	35.6	16.0	4.8	57.0	47.6	30.3	13.8	5.7
	1000	82.2	71.1	60.4	48.3	30.2	74.3	67.7	51.6	28.8	8.7	67.5	59.3	44.8	19.5	5.0	66.8	51.4	35.1	14.7	5.8	62.1	52.6	32.8	13.0	5.6
<i>RW - FI</i>	10	72.3	74.2	71.1	58.3	28.4	60.3	51.2	0	0	0	20.7	13.7	1.6	0	0	19.2	7.2	3.5	0	0	7.2	4.6	0	0	0
	100	74.2	76.3	73.7	62.8	30.6	60.6	48.0	0.3	0	0	35.3	13.4	4.3	0.3	0	37.6	13.0	3.8	0	0	10.2	3.6	0.1	0	0
	1000	69.7	71.8	69.5	60.6	29.4	55.8	43.1	0.3	0.1	0	35.5	13.0	4.5	0.2	0	23.3	13.9	3.4	0	0	12.4	3.1	0	0	0
<i>FW - RI</i>	10	94.8	87.2	84.0	60.4	37.6	99.5	88.7	58.8	17.7	12.6	65.0	38.1	31.9	17.0	7.2	55.3	30.5	23.9	29.8	20.8	42.1	34.5	24.4	28.6	13.2
	100	84.8	70.3	60.2	46.6	32.0	74.9	67.4	54.1	27.0	12.0	67.5	58.8	40.9	15.1	5.0	62.3	51.5	35.6	16.0	4.8	56.9	47.6	30.2	13.8	5.7
	1000	82.2	71.1	60.4	48.3	30.2	74.3	67.7	51.6	28.8	8.7	67.5	59.3	44.8	19.5	5.0	66.8	51.4	35.1	14.6	5.8	62.1	52.6	32.8	13.0	5.6
<i>FW - FI</i>	10	72.3	74.2	71.1	58.3	28.4	60.3	51.2	0	0	0	20.7	13.7	1.6	0	0	19.2	7.2	3.5	0	0	7.2	4.6	0	0	0
	100	74.2	76.3	73.73	62.8	30.6	60.6	48.0	0.3	0	0	35.3	13.4	4.3	0.3	0	37.6	13.0	3.8	0	0	10.2	3.6	0.1	0	0
	1000	69.7	71.8	69.5	60.6	29.4	55.8	43.1	0.3	0.1	0	35.5	13.0	4.5	0.2	0	23.3	13.9	3.4	0	0	12.4	3.1	0	0	0
AVG																										

Tabla B.1: Resultados de la instancia Sub20x20. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
<i>RW - RI</i>	10	454.7	433.1	419.7	336.7	172.3	367.1	284.8	190.6	316	159.6	293.9	267.5	235.7	131.4	8.5	401.8	361.4	290.1	115.4	32.8
	100	470.4	452.6	447.2	361.6	198.4	391.6	299.8	250.8	142.3	117.0	351.2	302.0	205.3	111.8	31.9	375.9	322.8	145.0	86.7	28.2
	1000	481.8	463.5	455.6	364.8	203.7	402.9	284.4	246.7	160.6	114.8	359.8	328.8	248.7	138.4	58.0	308.9	278.9	157.2	73.0	18.5
<i>RW - FI</i>	10	330.6	284.9	0	0	0	140.6	114.3	80.3	0	0	84.6	72.3	0	0	0	6.7	0	0	0	0
	100	271.3	223.1	1.0	0	0	68.2	48.4	5.7	0.3	0.3	100.2	24.6	6.4	0.9	0.1	43.5	6.0	1.3	0	0
	1000	254.6	199.8	1.2	0	0	73.8	47.4	9.6	0.2	0.2	233.1	165.3	23.1	6.3	1.2	44.1	11.2	0.5	0.1	0
<i>FW - RI</i>	10	254.2	254.2	254.5	185.3	59.2	189	157.7	79	59.3	146.6	133.5	130.6	97.8	49.1	39.2	134.8	133.4	178.4	167.8	124.8
	100	264.69	262.49	251.99	173.99	87.38	205.83	182.1	146.1	92.2	65.0	208.4	134.6	73	49.9	23.0	176.3	140.5	92.4	47.8	16.8
	1000	244.2	241.8	239.6	174.0	86.1	204.7	174.3	141.4	91.5	48.1	175.4	138.0	69.1	38.1	14.2	159.6	128.1	82.0	30.1	14.9
<i>FW - FI</i>	10	17.6	16.9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	18.5	15.7	0.2	0	0	1.8	0.2	0.2	0	0	3.52	0.3	0.2	0	0	0.92	0.2	0.2	0	0
	1000	17.4	13.8	0.1	0	0	1.8	0.2	0.1	0	0	4.1	0.2	0.2	0	0	1.3	0.1	0.1	0	0

Tabla B.2: Resultados de la instancia Sub40x40. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Anexo B. Resultados experimentos

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
RW – RI	10	749.5	744.9	568.6	401.1	331.0	732.4	582.8	428.4	356.5	311.9	447.3	416.1	346.6	47.6	127.2	492.8	329.1	306.0	47.4	9.5
	100	733.6	734.4	660.7	488.4	272.1	530.1	452.2	378.3	251.0	275.6	511.9	425.2	264.0	168.1	66.2	441.3	317.6	204.7	61.1	29.8
	1000	720.9	729.3	668.0	488.2	241.9	590.3	486.0	389.9	262.8	105.9	625.8	460.7	285.8	149.6	50.1	476.4	345.5	208.9	61.8	24.4
RW – FI	10	1662.3	1660.4	1511.8	309.3	0	803.2	0	0	0	0	300.4	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	1641.5	1651.8	1435.2	128.2	0	0	0	0	0	0	184.6	54.0	0	0	0	6.0	0	0	0	0
	1000	1763.3	1758.8	1468.0	107.4	0	0	0	0	0	0	940.4	233.3	0.8	0	0	9.7	0	0	0	0
FW – RI	10	446.1	377.7	232.2	129.3	254.7	377.4	330.9	314.3	128.8	41.6	357.3	287.8	166.4	128.8	3.0	368.2	338.4	268.2	128.8	41.6
	100	483.0	465.7	388.9	232.1	178.7	432.3	378.0	283.3	179.9	127.3	329.8	306.9	236.3	114.9	40.3	298.5	241.0	161.6	91.1	54.0
	1000	497.0	477.2	407.9	257.0	144.5	449.0	394.7	278.9	151.1	62.9	376.1	223.6	109.1	63.4	25.0	323.1	252.0	128.2	97.5	20.3
FW – FI	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	626.5	627.3	516.9	10.1	0	273.9	23.5	0	0	0	3.9	0.3	0	0	0	0.7	0	0	0	0
	1000	644.8	645.7	526.2	9.5	0	293.8	32.4	0	0	0	4.3	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0	0

Tabla B.3: Resultados de la instancia Sub100x100. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
RW – RI	10	299.5	277.0	125.3	124.6	54.4	511.0	468.7	338.7	187.0	60.8	488.7	425.4	201.5	142.7	48.3	132.8	131.0	236.3	126.2	61.0
	100	431.0	437.2	433.4	219.3	52.3	397.8	365.4	284.1	130.2	32.5	276.7	194.0	100.5	63.8	24.9	236.1	192.8	136.3	43.5	25.6
	1000	378.5	374.5	345.0	204.5	63.4	349.8	314.2	235.8	102.8	33.9	307.2	214.3	116.0	53.6	22.9	248.0	197.5	123.5	46.4	24.8
RW – FI	10	1036.9	986.3	493.2	0	0	962.3	577.2	223.0	45.0	0	386.8	216.5	63.4	12.2	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0
	100	1174.3	1113.3	280.6	0	0	1064.2	744.3	183.1	66.9	0	397.9	141.1	21.7	2.0	0	58.7	0.3	0.1	0	0
	1000	1261.0	1194.4	335.2	0	0	1144.7	827.4	222.9	76.0	0	487.0	198.7	47.5	4.4	0	35.3	0.2	0.1	0.1	0
FW – RI	10	299.5	277.0	125.3	124.6	54.4	511.0	468.7	338.7	187.0	60.8	488.7	425.4	201.5	142.7	48.3	132.8	131.0	236.3	126.2	61.0
	100	431.0	437.2	433.4	219.3	52.3	397.8	365.4	284.1	130.2	32.5	276.7	194.0	100.5	63.8	24.9	236.1	192.8	136.3	43.5	25.6
	1000	378.5	374.5	345.0	204.5	63.4	349.8	314.3	235.8	102.8	33.9	307.2	214.3	116.0	53.6	22.9	248.0	197.5	123.5	46.4	24.8
FW – FI	10	1036.9	986.3	493.2	0	0	962.3	577.2	223.0	45.0	0	386.8	216.5	63.4	12.2	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0
	100	1174.3	1113.3	280.6	0	0	1064.2	744.3	183.1	66.9	0	650.0	315.1	56.8	3.7	0	58.7	0.3	0.1	0	0
	1000	1261.0	1194.4	335.2	0	0	1144.7	827.4	222.5	76.0	0	487.0	198.7	47.5	4.4	0	35.3	0.2	0.1	0.1	0

Tabla B.4: Resultados de la instancia Dogrid. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
RW – RI	10	438.9	620.4	531.1	1111.7	566.3	324.8	220.1	311.0	763.4	919.4	259.5	285.1	155.0	318.4	601.7	378.2	348.2	396.8	774.2	924.6
	100	925.0	982.4	904.2	824.3	445.5	718.7	682.6	486.5	321.6	86.1	731.9	639.7	366.1	107.5	37.8	537.0	379.0	120.7	64.2	21.6
	1000	966.8	991.6	960.7	847.0	501.0	881.9	789.3	550.1	268.3	103.6	805.0	600.1	274.8	144.1	56.9	677.1	456.8	182.5	59.4	30.9
RW – FI	10	2026.1	1942.8	977.5	0	0	2217.7	1383.5	494.9	151.3	0	1976.6	1452.7	508.3	52.8	0	0.2	0.2	0.2	0	0
	100	2008.4	1801.6	288.4	0	0	2046.4	1512.6	181.3	86.0	0	1673.7	1163.6	365.5	16.6	0	64.9	0.3	0.2	0.1	0
	1000	2010.0	1720.5	280.2	0	0	2055.5	1523.5	362.3	135.3	0	1628.7	1186.6	424.6	25.1	0	35.4	0.6	0.2	0.1	0
FW – RI	10	438.9	620.4	531.1	1111.7	566.3	324.8	220.1	311.0	763.4	919.2	259.5	285.1	155.0	318.4	601.7	378.2	348.2	396.8	774.2	924.6
	100	925.0	982.4	904.2	824.3	445.5	718.7	682.6	486.5	321.6	86.1	731.9	639.7	366.1	107.5	37.8	537.0	379.0	120.7	64.2	21.6
	1000	966.8	991.6	960.7	847.0	501.0	881.9	789.3	550.1	268.3	103.6	805.0	600.1	274.8	144.1	56.9	677.1	456.8	182.5	59.4	30.9
FW – FI	10	2026.1	1942.8	877.5	0	0	2217.7	1383.5	494.9	151.3	0	1976.6	1452.7	508.3	52.8	0	0.2	0.2	0.2	0	0
	100	2008.4	1801.6	288.4	0	0	2046.4	1512.6	181.3	86.0	0	1575.0	1317.2	783.9	266.6	15.9	63.9	0.3	0.2	0.2	0
	1000	2010.0	1720.5	280.2	0	0	2055.5	1523.5	362.3	135.3	0	1628.7	1186.6	424.6	25.1	0	35.4	0.6	0.2	0.1	0

Tabla B.5: Resultados de la instancia Mica Greek. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada



Anexo B. Resultados experimentos

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
RW – RI	10	290.0	289.0	192.7	34.9	32.9	303.3	206.2	119.1	445.8	92.9	34.0	107.1	119.1	94.8	36.1	90.4	119.1	119.1	376.3	92.1
	100	947.6	957.8	806.9	388.8	97.8	818.6	647.3	390.0	225.4	54.6	740.2	452.8	153.7	40.8	23.6	557.7	256.8	91.3	36.1	14.4
	1000	797.9	767.8	636.5	314.5	71.8	636.8	521.3	342.2	154.8	71.4	619.2	353.0	161.7	49.6	12.3	522.8	317.4	99.9	34.6	16.6
RW – FI	10	1924.7	1828.4	869.9	811.4	0	1876.1	1748.5	1383.5	615.8	0	1131.4	163.6	4.6	0	0	1.9	1.8	1.6	0	0
	100	2148.8	2075.1	1425.8	921.5	0	2025.4	1834.4	1390.0	223.7	0	611.2	261.3	2.5	0.2	0	89.2	12.1	0.4	0	0
	1000	2298.3	2220.0	1543.5	989.0	0	1936.1	1787.8	1214.0	0	0	1516.0	504.7	14.9	0.1	0	144.5	15.2	0.4	0	0
FW – RI	10	290.0	289.0	192.7	34.9	32.9	303.3	206.2	119.1	445.8	92.9	34.0	107.1	119.1	94.8	36.1	90.4	119.1	119.1	376.3	92.1
	100	947.6	957.8	806.9	388.8	97.8	818.6	647.3	390.0	225.4	54.6	740.2	452.8	153.7	40.8	23.6	557.7	256.8	91.3	36.1	14.4
	1000	797.9	767.8	636.5	314.5	71.8	636.8	521.3	342.2	154.8	71.4	619.2	353.0	161.7	49.5	12.3	522.8	317.4	99.9	34.6	16.6
FW – FI	10	1924.7	1828.4	869.9	811.4	0	1876.1	1748.5	1383.5	615.8	0	1131.4	163.6	4.6	0	0	1.9	1.8	1.6	0	0
	100	2148.8	2075.1	1425.8	921.5	0	2025.4	1834.4	1390.0	223.7	0	611.2	261.0	2.5	0.2	0	89.2	12.1	0.4	0	0
	1000	2298.3	2220.0	1543.5	989.0	0	1936.1	1787.8	1214.0	0	0	1516.0	504.7	14.9	0.1	0	144.5	15.2	0.4	0	0

Tabla B.6: Resultados de la instancia Central Kootenay. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
RW – RI	10	591.9	428.0	326.1	162.3	111.7	552.1	431.1	187.3	16.2	1.0	258.5	240.1	193.1	187.3	1.0	247.8	220.1	187.3	187.3	1.0
	100	449.7	444.2	400.5	276.1	136.8	399.9	352.3	262.1	204.3	118.5	372.4	306.8	140.4	69.0	35.6	258.9	187.9	62.9	35.0	33.6
	1000	534.5	513.1	437.2	244.2	127.0	458.4	407.3	298.3	168.4	102.9	399.2	332.5	177.8	73.4	22.8	399.6	260.2	140.9	44.4	10.1
RW – FI	10	1251.7	1338	1212.5	86.3	0	1088.2	718.9	96.4	0	0	498	143.9	20.3	0	0	0.1	0	0	0	0
	100	1324.0	1433.8	1315.9	34.3	0	1089.0	551.2	74.0	0	0	406.7	85.5	6.7	0	0	25.2	2.7	0	0	0
	1000	1344.2	1456.0	1333.8	35.5	0	1101.8	572.0	79.3	0	0	199.6	90.9	4.0	0	0	44.3	2.1	0	0	0
FW – RI	10	591.9	428.0	326.1	162.3	111.7	552.1	431.1	187.3	16.2	1.0	258.5	240.1	193.1	187.3	1.0	247.8	220.1	187.3	187.3	1.0
	100	449.7	444.2	400.5	276.1	136.8	399.9	352.3	262.1	204.3	118.5	372.4	306.8	140.4	69.0	35.6	258.9	187.9	62.9	35.0	33.6
	1000	534.5	513.1	437.2	244.2	127.0	458.4	407.3	298.3	168.4	102.9	399.2	332.5	177.8	73.4	22.8	400.0	260.2	140.9	44.4	10.1
FW – FI	10	1251.7	1338	1212.5	86.3	0	1088.2	718.9	96.4	0	0	498.0	143.9	20.3	0	0	0.1	0	0	0	0
	100	1324.0	1433.8	1315.9	34.3	0	1089.0	551.2	74.0	0	0	406.7	85.5	6.7	0	0	25.2	2.7	0	0	0
	1000	1344.2	1456.0	1333.8	35.5	0	1101.8	572.0	79.3	0	0	199.6	90.9	4.0	0	0	44.3	2.1	0	0	0

Tabla B.7: Resultados de la instancia Revelstoke. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
RW – RI	10	3712.2	3574.3	4399.8	3411.8	1607.7	3343	2926	1475.7	743.5	151.2	1720.2	1382.2	740.9	494.5	33.3	807.8	614.2	591.6	448.5	135
	100	2364.3	2397.2	2444.0	2203.9	1140.9	2102.2	1789.1	1382.8	942.0	363.2	1255.7	903.4	526.7	193.3	80.3	1270.1	999.0	297.9	118.6	72.2
	1000																				
RW – FI	10	8915.8	8682.4	7628.1	4905.3	2125.6	8316.0	7610.1	5323.0	1773.8	0	1846.2	280.0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	8829.3	8597.9	7553.6	4850.9	2080.8	8131.3	7260.1	4744.9	690.6	0	1634.9	324.3	0	0	0	0	0	0	0	0
	1000																				
FW – RI	10	3712.2	3574.3	4399.8	3411.8	1607.7	3343.0	2926.0	1475.7	743.5	151.2	1720.2	1382.2	740.9	494.5	33.3	807.8	614.2	591.6	448.5	135.0
	100	2364.3	2397.2	2444.0	2203.7	1140.9	2102.2	1789.1	1382.8	942.0	363.2	1257.7	902.8	527.0	194.0	81.6	1279.3	959.2	290.8	117.5	72.7
	1000	2734.3	2742.4	2704.9	2080.6	1205.7	2309.5	2029.3	1611.6	937.2	355.9	1647.3	1234.0	665.9	273.7	70.4	1284.8	955.4	439.6	149.2	45.4
FW – FI	10	8915.8	8682.4	7628.1	4905.3	2125.6	8316.0	7610.1	5323.0	1773.8	0	1846.2	280.0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	8829.3	8597.9	7553.6	4850.9	2080.8	8131.3	7260.1	4744.9	690.6	0	1634.9	324.3	0	0	0	0	0	0	0	0
	1000																				

Tabla B.8: Resultados de la instancia Arrowhead. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada

Escenario	R	Random					BP					BC					DPV				
		5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75	5	10	25	50	75
<i>RW - RI</i>	10	1166.5	1039.5	1270.1	1749.0	1272.7	1034.1	1254.1	902.6	963.4	921.2	801.2	636.2	634.4	496.8	404.6	1209.9	788.0	927.4	762.0	901.2
	100	1512.9	1543.7	1432.3	1132.0	612.6	1547.6	1541.2	1237.9	749.6	246.1	1090.6	697.2	367.2	147.5	39.1	883.1	544.0	172.9	67.5	67.7
	1000	1481.2	1452.9	1402.4	1059.6	646.8	1413.0	1345.0	1002.0	673.7	270.2	1211.9	779.8	402.1	225.7	67.3	991.9	540.3	228.9	54.4	21.2
<i>RW - FI</i>	10	5010.9	5034.5	3861.0	0	0	4761.3	3872.8	615.0	37.0	0	1085.4	349.4	36.9	18.0	0	0	0	0	0	
	100	5350.8	5413.0	4050.5	0	0	4261.8	3103.0	46.3	15.7	0	1515.0	586.0	218.6	32.8	0	22.7	0	0	0	0
	1000	5289.7	5350.1	3985.2	0	0	4192.6	3016.9	52.0	1.3	0	2586.6	1301.0	235.8	34.5	0	8.1	0	0	0	0
<i>FW - RI</i>	10	1166.5	1039.5	1270.1	1749.0	1272.7	1034.1	1254.1	902.6	963.4	921.2	801.2	636.2	634.4	496.8	404.6	1209.9	788.0	927.4	762.0	901.2
	100	1512.9	1543.7	1432.26	1132.0	612.6	1547.6	1541.2	1237.9	749.6	246.1	1090.6	697.2	367.2	147.5	39.1	883.1	544.0	172.9	67.5	67.7
	1000	1481.2	1452.9	1402.4	1059.6	646.8	1413.0	1345.0	1002.0	673.7	270.2	1211.9	779.8	402.1	225.7	67.3	991.9	540.3	228.9	54.4	21.2
<i>FW - FI</i>	10	5010.9	5034.5	3861.0	0	0	4761.3	3872.8	615.0	37.0	0	1085.4	349.4	36.9	18.0	0	0	0	0	0	
	100	5350.8	5413.0	4050.5	0	0	4261.8	3103.0	46.3	15.7	0	1515.0	586.0	218.6	32.8	0	22.7	0	0	0	0
	1000																				

Tabla B.9: Resultados de la instancia Glacier National Park. Promedio del número de celdas quemadas según nivel de tratamiento ( $tf$ ), escenarios, número de repeticiones y métrica usada