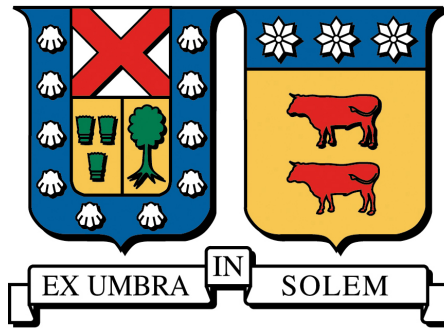




**MODELO DE TIEMPO CONTINUO PARA LA INTERACCIÓN LOCAL EN LA
PROPAGACIÓN DE UN INCENDIO FORESTAL**

Tesis de Grado presentada por

MIGUEL ALFONSO BECERRA DE LA CRUZ

como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial

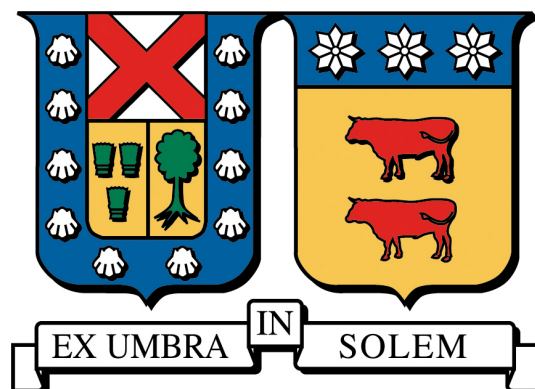
y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial

Profesor Guía:

Dr. ANDRÉS HERNÁN FUENTES CASTILLO

Valparaíso, 2016

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS



**MODELO DE TIEMPO CONTINUO PARA LA INTERACCIÓN LOCAL EN LA
PROPAGACIÓN DE UN INCENDIO FORESTAL**

Tesis de Grado presentada por

MIGUEL ALFONSO BECERRA DE LA CRUZ

como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial

y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial

Profesor Guía:

Dr. ANDRÉS HERNÁN FUENTES CASTILLO

Noviembre, 2016

TÍTULO DE LA TESIS:

**MODELO DE TIEMPO CONTINUO PARA LA INTERACCIÓN LOCAL EN LA
PROPAGACIÓN DE UN INCENDIO FORESTAL**

AUTOR:

MIGUEL ALFONSO BECERRA DE LA CRUZ

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Andrés Fuentes Castillo

Dr. Rodrigo Demarco Bull

Dr. Pedro Reszka

Valparaíso, Chile. Noviembre de 2016



*“It was a pleasure to burn. It was a special
pleasure to see things eaten, to see things
blackened and changed...”*

Fahrenheit 451, 1953

AGRADECIMIENTOS

En este largo camino llamado “carrera universitaria” he conocido muchas personas, diferentes lugares y culturas (gracias a mis andanzas alrededor del globo). Mirando en retrospectiva, puedo decir que me siento un afortunado, y simplemente le doy gracias a Diosito por las oportunidades otorgadas, por darme el empujón final en diversas instancias y ayudarme a tomar buenas decisiones en momentos clave.

Por otra parte, este logro no pudo haber sido posible sin el apoyo de mi familia. Gracias por estar conmigo en todo momento (sobre todo al final del tercer semestre, donde aprendí que todo es posible, jajajaja). Incluyo en este grupo a mis queridas mascotas, que siempre me recibieron con una alegría tremenda cuando viajaba a mi hogar. Siempre las llevaré conmigo en mi cucharón.

Otro grupo importante son *Los Perros*, jajajaja. Muchos civiles, pocos industriales, siempre se pasó excelente. Gracias por compartir conmigo los partidos de Chile, celebrar cumpleaños, o simplemente organizar juntas para relajarse después de una tanda de certámenes.

Ya más en el ocaso mi proceso, se merecen una muy especial mención la gente del grupo EC2G. Llegué a la *office* siendo un “tesista refugiado”, jajajaja. Siempre con buenas caras, me acogieron de gran manera y nunca me sentí un foráneo (a excepción cuando me decían “sangre sucia”, jajajajajaja). Tardes agradables de café, ping pong, una pichanga... quizá ahora me queda más claro el porqué me demoré tanto en salir, jajajaja.

Finalmente, pero no menos por ello menos importante, agradezco a Juan Váldez por proporcionarme más horas de vigilia y así terminar todos los códigos, escritos, figuras, etc. Sin estas múltiples inyecciones de cafeína, el camino se hubiera hecho muuuucho más largo.

RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo de propagación de incendio forestal continuo en el tiempo. Dicho modelo consiste en un conjunto de ecuaciones diferenciales que, al relacionarse entre sí, gobiernan la evolución del frente del incendio. Esta dinámica se dividió en tres etapas: ignición, auto-degradación e interacción entre los diferentes sitios de la malla (árboles). Esto entrega una manera formal, y computacionalmente rápida, de estudiar el fenómeno de propagación. Este enfoque fue diseñado con el fin de simular patrones de incendios en terrenos reales y con vegetación heterogénea. El modelo fue testeado mediante la simulación de diversos escenarios, los cuales poseían un rango de inclinaciones y una gama diversa de probabilidades de ocupación. Con dichos resultados, se analizaron las métricas más importantes del proceso de propagación. Finalmente, el modelo fue utilizado para recrear incendios reales y comparar los resultados con las mediciones obtenidas por brigadistas.

Palabras Clave: Propagación de un incendio forestal, Modelo de tiempo continuo, Llama sólida, Flujo de calor crítico, Tasa de combustión

ABSTRACT

A forest fire propagation model in continuous time is presented. The model consists on a set of coupled differential equations governing the evolution of the fire front which is divided into three stages: ignition, self-degradation and interaction between sites. This provides a formal and a computationally fast way to study the propagation phenomena. This approach was designed to simulate fire patterns in real, heterogeneous landscapes. The model was tested against simulated forest fire scenarios presenting a range of slopes and occupancy probabilities, where the most relevant metrics of the spreading process were investigated. Finally, the model was tested against data collected from real wildfire scenarios.

Keywords: Forest Fire propagation, Continuous-time model, Solid flame, Critical heat flux, Burning rate

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CONTEXTO DEL ESTUDIO	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. MOTIVACIÓN	4
1.3. ALCANCE	6
1.4. OBJETIVOS	7
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	7
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. GENERALIDADES DE UN INCENDIO FORESTAL	9
2.1.1. CROWNING	10
2.1.2. SPOTTING	11
2.2. CLASIFICACIÓN	11
2.2.1. MODELOS DETERMINISTAS	11
2.2.2. MODELOS ESTOCÁSTICOS	14
2.3. MÉTRICAS EN UN INCENDIO FORESTAL	18
2.3.1. RATE OF SPREAD (ROS)	18
2.3.2. ÁREA QUEMADA	21
2.3.3. TIEMPO TOTAL	23
3. MODELO PROPUESTO	27
3.1. SUPUESTOS IMPLEMENTADOS	29
3.1.1. MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	29
3.1.2. Evolución de los sitios	30
3.2. CALOR TRANSFERIDO Y ABSORCIÓN	32
3.3. INTERACCIÓN ENTRE SITIOS	36
3.3.1. ENERGÍA TOTAL EMITIDA	38
3.3.2. FACTOR DE FORMA GEOMÉTRICO	39
3.3.3. FRACCIÓN RADIATIVA	41
3.3.4. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	43
3.4. IGNICIÓN	45
3.5. AUTO-DEGRADACIÓN	47
3.6. DINÁMICA DE PROPAGACIÓN	50
3.7. CONSIDERACIONES NUMÉRICAS	51
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	53
4.1. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	54
4.1.1. SIMULACIÓN DE CUATRO SITIOS	55
4.1.2. COMPORTAMIENTO CON PENDIENTE	58

4.1.3. MÉTRICAS IMPORTANTES	59
4.2. SENSIBILIDAD DEL MODELO	62
4.2.1. ANÁLISIS ESTÁTICO	63
4.2.2. ANÁLISIS DINÁMICO	67
4.3. VALIDACIONES	69
4.3.1. EXPERIMENTO LOCAL (UN SITIO)	69
4.3.2. EXPERIMENTO ESCALA LABORATORIO	70
4.3.3. EXPERIMENTO MEDIANA ESCALA	73
4.3.4. EXPERIMENTO ESCALA MEGA-INCENDIO	76
5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	83
Bibliografía	85
A. TABLAS	91
B. AUTÓMATA CELULAR	95
C. CÁLCULO DE TROZO	101

ÍNDICE DE TABLAS

A.1.	participación en la producción mundial de madera en trozas. Los porcentajes están sobre la base de una producción total de 1.577.974.000 m^3 . <i>Fuente:</i> Anuario Forestal FAO 2011, Productos forestales, pág. 22–24. . .	91
A.2.	participación en la producción mundial de pulpa de madera. Los porcentajes están sobre la base de una producción total de 153.296.000 <i>ton</i> . <i>Fuente:</i> Anuario Forestal FAO 2011, Productos forestales, pág. 144–145.	92
A.3.	participación en las exportaciones de productos forestales. Los porcentajes están sobre la base de una exportación total equivalente a 255.932 millones de USD. <i>Fuente:</i> Anuario Forestal FAO 2011, Productos forestales, pág. 74–76. . .	92
A.4.	extracto del análisis de varianza para la regresión múltiple de los resultados arrojados con el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 100 simulaciones.	93
A.5.	resumen de los resultados que arroja la regresión múltiple para las variables del modelo, teniendo como data las simulaciones hechas mediante el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 100 instancias. .	93
A.6.	extracto del análisis de varianza para la regresión múltiple de los resultados arrojados con el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 1.000 simulaciones.	93
A.7.	resumen de los resultados que arroja la regresión múltiple para las variables del modelo, teniendo como data las simulaciones hechas mediante el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 1.000 instancias.	93
A.8.	comparativa de la rapidez de propagación entre los experimentos realizados por Weise et al. y los entregados por el modelo propuesto en la presente investigación. Para cada caso, la columna de la izquierda muestra el ROS expresado en cms^{-1} , mientras que la columna de la derecha indica el error estándar para dichas mediciones.	94
A.9.	comparación realizada entre las mediciones hechas por los brigadistas en el incendio de Lançon (2005), y los resultados obtenidos de la simulación utilizando el modelo propuesto.	94



ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	vista del paisaje post-incendio.	11
2.2.	esquema inicial de un modelo de pequeño mundo aplicado a un incendio forestal.	17
2.3.	esquema mejorado de un modelo de pequeño mundo, tomando en cuenta la física que subyace al problema (modelo radiativo).	17
2.4.	esquema que ilustra los diferentes frentes que se dan en un incendio. Se ha de poner énfasis en lo que el frente de avanzada (<i>heading fire</i>) y en frente de atrás (<i>backing fire</i>).	19
2.5.	esquema de los diferentes frentes del incendio C064, tomadas en el estudio de Cheney et al. en Australia.	20
2.6.	esquema de cómo se determina el avance máximo del frente de fuego. En particular se trata del incendio experimental F019, hecho en 1993 en Australia.	22
2.7.	representación de la anatomía de un incendio forestal. Claramente, no es necesario que posea todas las características aquí expuestas, pudiendo no presentarse islas, puntos de <i>spotting</i> , o ramificaciones (<i>fingers</i>).	25
3.1.	gráfico en el cual se puede apreciar el decaimiento potencial que sufre el coeficiente de convección a medida que el tamaño de partícula aumenta. En particular, se trata de la relación volumen/superficie.	30
3.2.	gráfico en el cual se muestra el flujo energético tanto por radiación como por convección durante un incendio de tipo <i>crowning</i> . Además, en la parte superior se puede ver los efectos de calentamiento y el enfriamiento que se producen dado el flujo convectivo de energía.	31
3.3.	esquema simplificado de la Let de Bouguer-Lambert-Beer.	33
3.4.	gráfico en el cual se muestra la influencia que tiene la porosidad y la absorción, respectivamente α_k y σ_k , sobre el factor de atenuación de la radiación incidente.	35
3.5.	diferentes especies estudiadas en la literatura de incendios forestales, dada que componen numerosos bosques de tipo mediterráneo. La imagen de la izquierda corresponde a una variedad de pino (<i>Pinus pinaster</i>), así como a la derecha se encuentra un tipo de roble (<i>Quercus coccifera</i>).	36
3.6.	esquema de la radiación siendo emitida por una llama sólida y recibida a su vez un un blanco cilíndrico.	40

3.7.	gráfico en el cual se ve la relación que existe entre la fracción radiativa de la combustión completa de diferentes compuestos, y el flujo de calor liberado por unidad de área. En particular, los datos fueron obtenidos de un <i>pool fire</i> , en el cual se hace la distinción de diferentes alturas de borde del recipiente(<i>lip</i>). Finalmente, los símbolos vacíos corresponden a un radio de <i>pool</i> igual a 0,19 m, en tanto los símbolos rellenos (grises) poseen un radio de 0,38 m.	42
3.8.	gráfico en el cual se puede apreciar el impacto que tiene la distancia y la diferencia de altura (dz) al momento de evaluar diferentes factores de formas.	44
3.9.	gráfico en el que se muestra la evolución de algunos parámetros relevantes a medida que el árbol va degradándose: tiempo de ignición, índice de O_2 y pérdida de masa. El flujo radiativo al cual fue sometido el árbol de dicho estudio (<i>Maritime Pine</i>) fue de 30 kWm^{-2}	45
3.10.	gráfico en el cual se registra el tiempo de ignición para diferentes especies vegetales, utilizando para ello un rango de flujos de calor.	46
3.11.	gráfico en el que se muestra diferentes tiempos de ignición. Este tiempo es obtenido por medio de la interacción de dos sitios, midiendo la radiación liberada por uno de ellos, hasta que el punto en que el umbral impuesto es alcanzada (en el sitio vecino).	48
3.12.	fotografía que muestra el arreglo dispuesto para la quema de un árbol de 2 m de altura. En particular, se destaca el sistema tipo anillo que sirve para producir la ignición de la copa.	49
3.13.	las imágenes muestran la evolución característica de la quema de un árbol. En primera instancia la ignición sucede y la llama se propaga hacia arriba. Luego, la copa es rodeada en su totalidad por la llama mientras se quema, ocurriendo el <i>peak</i> de rapidez de la pérdida de masa. Finalmente, la llama descende hasta sólo existir en la primera mitad del árbol. Se puede apreciar que el follaje ha sido completamente consumido, quedando sólo las brasas en la copa.	49
3.14.	(a) Resultados del experimento hecho por Mell et al., en el cual se registra la degradación de un árbol de 2,4 m de altura, con distintos contenidos de humedad (48 %, 49 % y 50 %). (b) Se muestra la derivada de la degradación, vale decir, el <i>burning rate</i> promedio para las tres pruebas realizadas. Las líneas verticales representan la desviación estándar del total de datos recopilados.	50
3.15.	esquema que muestra los diferentes factores que se han modelado para estar presentes en el fenómeno de propagación.	51
4.1.	representación del esquema utilizado para el estudio sobre la interacción de cuatro sitios. Dos casos son considerados: un terreno plano y una superficie inclinada ($\alpha = 20^\circ$).	56
4.2.	gráfico en el que se muestra la evolución de la masa remanente normalizada $C_i(t)$ para todos los sitios, en ambas configuraciones.	57
4.3.	gráfico en el cual se muestra la tasa de degradación de los cuatro sitios para el escenario con pendiente.	58
4.4.	gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores de la constante de proporcionalidad η . El error normalizado se presenta para cada <i>set</i> de mediciones.	64

4.5.	gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores del inverso del tiempo crítico τ . El error normalizado se presenta para cada <i>set</i> de mediciones.	64
4.6.	gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores del tiempo de vida media U_i . El error normalizado se presenta para cada <i>set</i> de mediciones.	66
4.7.	gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores de la fracción radiativa r . El error normalizado se presenta para cada <i>set</i> de mediciones.	66
4.8.	gráfico que muestra el <i>burning rate</i> para un sitio en solitario. Una comparación con datos experimentales obtenida de Mell et al. es realizada, tomando en cuenta diferentes porcentajes de humedad para la vegetación.	71
4.9.	gráfico en el cual se puede ver la comparación entre la evolución de la rapidez de propagación en el experimento C064 de Cheney et al. y los resultados obtenidos por una serie de simulaciones realizadas con el modelo propuesto en el presente trabajo. Además, se expone una barra de error para el set de mediciones que posee el mayor de estos valores.	75
4.10.	gráfico en el que se expone la evolución de la velocidad del viento, correspondiente a las cuatro esquinas del terreno en el cual el experimento C064 realizado por Cheney et al. se llevó a cabo.	76
4.11.	vista aérea de la disposición de la vegetación en Lançon.	78
4.12.	representación isométrica de la topografía del terreno de Lançon.	79
4.13.	esta serie de imágenes muestra la evolución de los patrones dejados por un incendio. La densidad de ocupación corresponde a $\rho = 0,90$. La columna derecha muestra la evolución en un terreno plano, mientras que la izquierda presenta la diferencia de tener una pendiente de $\alpha = 20^\circ$. El área quemada es de color gris, mientras que los sitios que tienen la totalidad de su combustible intacto son negros (las celdas en blanco implican ausencia de combustible). En ambos casos, el intervalo que existe entre las imágenes de cada secuencia es igual a 500 s.	81
4.14.	este grupo de gráficos resume el comportamiento de las métricas más importantes de un incendio forestal cuando se varían la pendiente α (columna izquierda) y la densidad de ocupación ρ (columna de la derecha).	82
B.1.	esquema del CA bidimensional. En el cuadrante remarcado se muestra una célula viva, rodeada por su vecindad que se compone por otras 8 células.	95
B.2.	muerte de una célula, la cual posee tan sólo un vecino vivo.	97
B.3.	nacimiento de una célula, la cual posee exactamente tres vecinos vivos.	97
B.4.	diferentes configuraciones que se mantienen invariantes en el CA “El juego de la vida”.	98
B.5.	diferentes configuraciones intermitentes que se dan en el CA “El juego de la vida”.	99
B.6.	diferentes configuraciones que dan el efecto de desplazarse a través del sistema en el CA “El juego de la vida”.	100
C.1.	esquema que muestra las diferentes medidas de un árbol que será talado y usado comercialmente.	102
C.2.	forma estándar que posee un tronco en su extremo inferior (izquierda) y en su extremo superior (derecha).	103



CAPÍTULO 1

CONTEXTO DEL ESTUDIO

Los incendios forestales representan un grave problema ambiental, tanto por la deforestación de las cada vez más escasas áreas verdes, como por la contribución a la contaminación del aire. Además, existen efectos económicos indirectos que afectan a la sociedad, en particular a las comunidades que pertenecen a su entorno más inmediato [1]. Vale decir, estos fenómenos poseen implicancias transversales a nivel global.

Chile no escapa de esta realidad. El ecosistema mediterráneo que posee en diversas zonas, y su clara estacionalidad climática (intensas sequías en verano), dan lugar a condiciones ideales para este tipo de fenómenos. En concordancia con lo presentado en estudios internacionales, los incendios no sólo significan una pérdida económica y patrimonial invaluable, sino que en materia de contaminación ambiental constituyen un aporte significativo. Por ejemplo, en la región Austral del país el aporte polutivo por parte de los incendios es inclusive mayor que el de las industrias que allí se encuentran [2]. Cabe destacar también, que el factor humano inside de manera radical en el inicio de los focos incendiarios (más del 95 % de los incendios son antrópicos, vale decir, causados por el hombre ¹), siendo su propagación una parte no menor del problema a atacar.

En general, los incendios forestales en el país poseen características muy variables en cuanto a la superficie afectada. En los últimos 50 años ² estos han cubierto alrededor de 2.270.114 *ha* en todo el territorio nacional. Anualmente se registran más de 4.000

¹ Theo Oberhubert, Coordinador de campañas contra incendios de la ONG Ecologistas en Acción

² periodo comprendido entre 1963–2013

emergencias, pero en más del 90 % de estos casos el incendio no alcanza las 5 *ha* [3]. Por si fuera poco, según estadísticas de la CONAF³ (Corporación Nacional Forestal), menos del 1 % de los incendios contribuyen en más del 60 % del total de terreno afectado.

Esto último se presenta como un punto de importancia debido a la clásica distribución tipo Pareto que muestra la estadística. Se hace imprescindible el poder controlar estos “mega incendios”(más de 1.000 *ha* por evento). Para ello se ha de gestionar de mejor manera los limitados recursos que se tienen al momento de combatir el siniestro, y así evitar su propagación de manera temprana. Una herramienta que permita anticipar su evolución es de alto interés por esta misma razón. Es en este punto donde yace el interés de la presente investigación.

1.1. ANTECEDENTES

Un incendio forestal es un fenómeno complejo en su descripción. En primera instancia, se diferencia de un incendio normal debido al lugar donde ocurre: terrenos rurales, donde la principal fuente de combustible es la vegetación allí existente. Además, la magnitud de la superficie que abarca, así como la gran rapidez de su propagación⁴, hacen que sean fenómenos únicos. Una clasificación detallada sobre los diferentes modelos de incendios forestales se abordará en la Sección 2.2 del presente trabajo. Por lo pronto, una breve reseña del trabajo científico realizado sobre este tema se presentará a continuación.

El estudio de estos fenómenos se remonta a la década de los 40', con un trabajo realizado por Fons [4]. En él se describe el proceso de combustión de un *fuel bed*⁵, desde un punto de vista físico, considerando variables tales como: ratio superficie-volumen, densidad de las partículas de combustible, porosidad del medio, espesor del estrato y humedad que este posea.

A mediados y finales de la década de los 60', Hottel y Williams [5] propusieron una serie de modelos matemáticos que tenían por foco explicar los efectos de la humedad presente en un estrato vegetal, por medio de la variación de la intensidad del flujo radiativo

³ <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>

⁴ un incendio forestal puede alcanzar una rapidez de propagación de hasta los 23 *km/h*

⁵ estrato vegetal

de la fuente a la cual eran sometidos, y sus implicancias sobre la velocidad de propagación del incendio. Asimismo, autores tales como Emmos [6] y Albini [7] propusieron modelos de propagación para estratos vegetales y arbustos, ampliando el conjunto de estudio clásico. Durante esta misma época, Thomas [8] investigaba incendios en terrenos abiertos, poniendo especial énfasis en el comportamiento de la llama: tamaño, tasas de crecimiento y efectos del viento sobre esta (principalmente aerodinámicos). Todo esto asentó las bases teóricas y prácticas de lo que sería los trabajos posteriores.

En la siguiente década, un estudio de gran relevancia surgió. En 1972, Rothermel [9] propuso un modelo matemático que no solo caracterizaba la combustión del estrato vegetal, sino que también predecía la velocidad de propagación. El modelo tenía la ventaja de aplicarse a diferentes esquemas de bosque: pastizales, arbustos, árboles (copas), entre otros. Además, requería como *input*⁶ ciertas condiciones del entorno, tales como la velocidad del viento y la inclinación del terreno. Un punto importante es que el trabajo poseía tabulados todos los parámetros de entrada (para una gran gama de combustibles), dejando de lado la necesidad de nuevas mediciones. Esto popularizó su implementación, dando lugar a ser ampliamente usado en Estados Unidos y otros países.

En los siguientes años, la comunidad científica siguió ahondando en la descripción del fenómeno. Podemos encontrar diversos trabajos que abordan temas más específicos de un incendio forestal. Por ejemplo, Pagni et al. [10] incluyó la porosidad del estrato vegetal e investigó cómo afectaba esto a la propagación, Williams [11] estudió y diferenció sistemáticamente los mecanismos de transferencia de calor que se suscitan en un incendio. También se describió cualitativamente el potencial peligro de un incendio (trabajo hecho por McArthur [12]), del cual Noble et al. obtuvo las ecuaciones correspondientes [13], lo que permitió una evaluación sistemática y objetiva del riesgo incendiario de un determinado predio. Finalmente, surgieron contribuciones sobre la forma de los patrones post-incendio (aporte hecho por Green [14]), así como aparecieron los primeros estudios extensivos sobre la evolución del frente de fuego (Grisin [15]), durante un incendio forestal.

Ya a finales de los 90' y durante la última década los trabajos se han extendido a investigar al bosque como un sistema compuesto por diferentes entidades que de alguna

⁶ información de entrada

manera interactúan, dependiendo del modelo propuesto. Así, diversas técnicas se han aplicado con el fin de caracterizar el cómo se relacionan los entes (árboles, arbustos, zonas no combustibles) dentro del bosque. Una de las técnicas más populares es la de *cellular automata*, aplicada por primera vez en 1997 [16]. Diversos son los trabajos en que se replica esta forma de modelamiento, ya sea mediante variantes de la aproximación original o en conjunto con otra metodología [17, 18, 19, 18, 20].

Por último, en 2005 Porterie et al. formulan por primera vez un modelo de incendio forestal basado en una red de pequeño mundo [21]. Es en este artículo donde radica la inspiración para el modelo que se desarrolla en la presente investigación.

1.2. MOTIVACIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno que involucra una gran cantidad de problemáticas. Desde un punto de vista de la modelación, el proceso de combustión de un estrato vegetal presenta una gama importante de subprocesos termodinámicos, químicos y físicos. Además, se tiene que tomar en cuenta que ocurre en condiciones no controladas, razón por la cual están sujetos a una variabilidad importante. Para precisar, los parámetros ambientales preponderantes son: la humedad, el viento, el tipo de vegetación y la topografía.

Por otra parte, existe un alto interés a nivel de gobierno, entidad que debe velar por la preservación del patrimonio natural, vale decir: reservas nacionales, parques nacionales y monumentos naturales. Es más, a nivel internacional Chile se ha comprometido a preservar siete áreas de su territorio, dada sus características únicas en el planeta. Es así como hoy en día Chile debe velar y proteger las siguientes locaciones:

- Parque Fray Jorge
- Isla de Juan Fernández
- Parque La Campana-Peñuelas
- Laguna San Rafael
- Laguna del Lauca

- Torres del Paine
- Parque Las Araucarias

Este compromiso se enmarca dentro del programa “El hombre y la biosfera” (MAB por su sigla en inglés), perteneciente a la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por su sigla en inglés) ⁷. Este programa fundado en 1995, siendo Chile elegido para presidirlo durante el periodo 2012–2014.

Asimismo, el sector privado no se queda atrás. La industria de la madera en Chile aporta un total de 2,7 % del Producto Interno Bruto (PIB). Es el tercer sector productivo con mayor cantidad de exportaciones (8,1 %, correspondiente a 6.000 millones de USD), después de la minería y la industria manufacturera ⁸. En el concierto internacional se sitúa en un relevante décimo lugar en cuanto a la producción de trozas de madera y en un noveno puesto en cuanto a pulpa ⁹. Además, si se toma el total de exportaciones forestales como criterio de clasificación, Chile ocupa el décimo tercer lugar en el escalafón (para más detalles, ver Tablas A.1, A.2 y A.3).

Por todo lo anterior es que el manejo y cuidado de los bosques es un tema de gran relevancia. Los incendios forestales representan un peligro constante para la industria, siendo natural que surja el interés de poder evitarlos. Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de estos desastres siempre es alta, por lo cual es más que deseable tener un plan de contingencia para su control oportuno. Es por ello que la comunidad científica se ha encargado de investigar tan arduamente el tema, como se vio en la Sección 1.1. Es así como un trabajo innovador que vaya enfocado al mejor entendimiento de la propagación de incendios se convertirá en un aporte transversal. Tendrá valor desde el punto de vista científico: generando nuevo conocimiento; y será de utilidad para la industria: elaborando una herramienta apta para la simulación de incendios, que entregue información valiosa para el combate de este tipo de desastre natural.

⁷ <http://www.unesco.org/new/es/santiago/natural-sciences/man-and-the-biosphere-mab-programme-biosphere-reserves/man-and-the-biosphere-programme-mab-more-information/>

⁸ <http://www.corma.cl/perfil-del-sector/aportes-a-la-economia/exportaciones>

⁹ la pulpa corresponde al 95 % del total de materias primas que se utilizan para la confección de celulosa, principal material para la producción de papel

1.3. ALCANCE

Este trabajo de investigación se enmarca en la problemática del entendimiento de la propagación de incendios forestales. Se busca poder describir los diferentes procesos que ocurren en un árbol al momento de un incendio, como lo son: la absorción de calor, la pirólisis y futura degradación que sufre el material combustible (situado en la copa de los árboles), una vez este se ha encendido. Por otra parte, también es de interés la transferencia de calor hacia una vecindad de árboles circundantes, así como la generación del efecto de *spotting* ¹⁰ hacia lugares no tan cercanos [22]. Se ha registrado que el efecto de *spotting* puede cubrir incluso decenas de kilómetros ¹¹.

El objetivo es encontrar expresiones sencillas de estos procesos, para que la posterior simulación pueda llevarse a cabo en tiempos relativamente cortos (escala en minutos). Aunando dichas expresiones, se obtendría una ecuación que dé lugar a una correcta descripción de la evolución de un incendio, con lo cual una correcta simulación es posible.

Luego, será objeto de estudio el caracterizar las métricas más importantes dentro del marco de un incendio forestal. En particular, se busca estimar la velocidad de propagación (ROS por su sigla en inglés) y el área quemada total. Con ello se puede evaluar el posible daño de un incendio forestal, dado un conjunto de condiciones iniciales, y crear planes de contingencia para su combate.

Un punto importante es la cualidad operativa que se obtiene de esta propuesta. Esto dado que la rapidez del avance del frente de fuego de un incendio es una constante preocupación para los brigadistas ¹². No es poco frecuente que el incendio los rodee, debiendo escapar a quebradas para luego pedir socorro al personal aéreo. Para no ir más lejos, en el año 2003 cuatro brigadistas de CONAF perdieron su vida en el incendio forestal de Guarilhue, comuna de Tomé, VIII región ¹³.

¹⁰ fenómeno en el cual brasas son eyectadas desde las copas de los árboles, siendo trasladadas por el viento y provocando nuevos focos incendiarios

¹¹ <http://www2.famaf.unc.edu.ar/institucional/biblioteca/trabajos/638/15503.pdf>

¹² persona entrenada para combatir un incendio forestal

¹³ <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/martires/>

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es generar un modelo que en tiempos operacionales (minutos), logre simular la evolución de un incendio forestal. Para ello se tendrá que construir un modelo físico/matemático que responda de manera fidedigna a este fin. Este modelo deberá ser capaz de tomar en cuenta la vegetación de la cual se compone el bosque (geometría de las copas, tiempos de degradación del combustible, modo de ignición, etc.), la topografía del terreno y los diferentes enlaces que existan entre los árboles, tomando como base una red de tipo *lsw*¹⁴.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos reúnen lo que se espera obtener al final de cada unas de las diferentes actividades que componen el trabajo de tesis. En particular, se espera:

1. Obtener una ecuación diferencial que describa cómo se degrada un árbol en el tiempo, contemplando tanto la interacción con otros árboles, como la degradación que sufra por causa propia.
2. Realizar una validación local de la expresión encontrada, contrastando los resultados entre una simulación hecha con un *setup* de un árbol con datos reales.
3. Comprobar el correcto funcionamiento de la interacción del modelo en cuanto al aspecto de la radiación entre árboles vecinos, para un *setup* de cuatro sitios en un terreno plano.
4. Comprobar si el modelo es capaz de recrear el comportamiento de un incendio en terrenos inclinados, utilizando un *setup* de cuatro sitios en un terreno con cierto grado de inclinación.
5. Establecer el comportamiento de las métricas más importantes de un incendio forestal: velocidad de propagación (ROS), área total quemada y tiempo característico de

¹⁴ local small-world network, o red local de pequeño mundo en su traducción al español

percolación, variando aspectos intrínsecos del bosque, tales como la densidad de ocupación y la inclinación del terreno.

6. Corroborar la capacidad de simulación del modelo, estableciendo un *benchmarking* de las métricas con un incendio forestal real.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES DE UN INCENDIO FORESTAL

Como se vio en el Capítulo 1, en términos físicos un incendio forestal es un fenómeno complejo. Por ende, el describir cómo funciona este proceso de propagación es primordial. Esto con el fin de entender las distintas etapas que se van sucediendo al momento de analizar un incendio forestal. No obstante lo anterior, la física inherente a cada etapa será abordada en el Capítulo 3, momento en el cual se profundizará el modelo propuesto en este trabajo.

Clásicamente, un incendio forestal comienza con la aparición de un foco incendiario. Este se puede producir debido a una causa natural ¹⁵ como la caída de un rayo, o bien tiene un origen relacionado a la acción humana. En más de la mitad de los ocasiones los incendios son producidos de manera intencional¹⁶. Dada esta característica, el foco suele darse en el sotobosque ¹⁷, lugar donde interactúan las personas con la vegetación.

Una vez iniciado el foco incendiario, este se propagará por el suelo del bosque. Este tipo de propagación se denomina *surface fire*, dado que se desarrolla en la superficie del bosque. Eventualmente el fuego logrará propagarse a la copa de los árboles, ya sea por efecto de la radiación o la convección que se genera. Otra posibilidad es que el fuego escale

¹⁵ menos del 2 % de los incendios forestales tiene como origen una causa natural; *Fire Management Notes*, Volumen 57, 1997

¹⁶ Estadísticas de Incendios Forestales 2011, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España

¹⁷ corresponde al estrato vegetal que crece más cerca del suelo

por los troncos de los árboles. Lo anterior es interesante, dado que es esta situación la que genera que a la corteza seca de los árboles se le denomine *ladder fuel*, por su característica de servir de ayuda para que el fuego trepe hasta la copa. Es aquí donde sucede la ignición de la *canopy* ¹⁸, proceso en el que se generan dos fenómenos que tendrán gran repercusión en el presente trabajo, los cuales serán expuestos a continuación.

2.1.1. CROWNING

Este fenómeno se da cuando el incendio es transmitido a través del estrato superior del bosque, vale decir, a través de las copas de los árboles. En particular, se dice que este tipo de proceso posee un avance relativamente independiente del incendio que ocurre a nivel del suelo ¹⁹. Además, su velocidad de propagación es mayor dada la incidencia de factores atmosféricos, tales como el viento o la humedad.

Otra característica a destacar es que este tipo de incendio corresponde al de mayor intensidad, debido al material ligero del que se compone el combustible. Se ha de destacar el factor de que a nivel de suelo la humedad suele ser mayor, por lo cual el proceso de pirólisis se ve ralentizado a causa de la mayor cantidad de agua que se debe evaporar previamente.

En este punto resulta importante el aclarar que en un incendio forestal el material que actúa como combustible, y efectivamente se quema, es el conocido como “material ligero”. Este corresponde principalmente al estrato vegetal que yace en el suelo (arbustos, agujas de coníferas, pequeñas ramas, entre otros) y al que se encuentra en las copas de los árboles. Esto queda en evidencia si se aprecia el panorama luego de ocurrido el desastre. Como muestra la Figura 2.1, sólo los “esqueletos” formados por los troncos o ramajes de mayor envergadura subsisten al paso de un incendio.

Finalmente, el proceso de *crowning* posee un efecto secundario: la propagación mediante que se suscita de tipo *spotting*, la cual se tratará en la siguiente sección.

¹⁸ copa de un árbol

¹⁹ <http://www.fs.fed.us/nwacfire/home/terminology.html>



Figura 2.1: vista del paisaje post-incendio.

2.1.2. SPOTTING

El proceso de *spotting* es relativo a la propagación del incendio, en las ocasiones en que recorre grandes distancias en formas de manera imprevista. Cuando una copa está en llamas, se forma un penacho convectivo por el cual suben las brasas²⁰ al ambiente. En esta columna de aire caliente ascendente, las brasas quedan a merced del viento, el cual las acarrea sobrepasando caminos, ríos y quebradas. Las distancias que pueden recorrer estas partículas pueden llegar a ser de varios kilómetros. En Australia se han registrado focos incendiarios producidos por esta causa a 20 *km* del incendio principal [23].

En el marco de este trabajo, con el fin de recrear estas propagaciones a distancias considerables (dado el efecto producido por el *spotting*), se decidió utilizar el modelo de pequeño mundo. En la Sección 2.2.2 se profundizará en cuanto a cómo esta técnica en particular tiene la capacidad de incorporar este tipo de propagación, haciéndola una forma adecuada de modelamiento.

2.2. CLASIFICACIÓN

2.2.1. MODELOS DETERMINISTAS

Dado que este es un fenómeno que lleva estudiándose por más de medio siglo (para mayor detalle, ver la Sección 1.1), existe una cantidad de modelos propuestos que no es menor. Con el fin de realizar un estudio sistemático, un buen acercamiento es establecer una

²⁰ elementos pequeños de material sólido que se encuentran en combustión

clasificación de los diferentes tipos de modelos de incendios forestales. Una aproximación interesante es la hecha por Weber [24], en la cual se diferencian tres tipos de modelos de propagación. El criterio utilizado fue la naturaleza de la evolución impuesta para cada uno de ellos.

MODELOS ESTADÍSTICOS

Este tipo de modelamiento corresponde a aquellas formulaciones que no toman en consideración el aspecto físico de la propagación, por lo que no intentan involucrar de manera alguna las ecuaciones de los diferentes mecanismos de transferencia de calor. Su objetivo radica en la mera predicción de la propagación del incendio a través del bosque. Se basa en modelos econométricos²¹ que toman en consideración diferentes variables intrínsecas del bosque, tales como: humedad, tipo de vegetación, temperatura ambiente, velocidad del viento, entre muchos otros aspectos. Algunos ejemplos de este tipo de modelos se pueden encontrar en el periodo comprendido entre 1980–1985 [13, 14, 25, 26].

El poder predictivo que presentan en ocasiones puede resultar bastante bueno. Esto significa que las variables exógenas seleccionadas dentro del modelo tienen, efectivamente, relación con el proceso de propagación. Si se suma lo anterior con la hipótesis que subyace en cada uno de los modelos, se puede decir que no existe una relación espuria.

Su principal falla es la falta de incorporación de la física involucrada en el fenómeno. Al no tomar en cuenta este punto de vista, difícilmente se puede entender cómo funciona el proceso de combustión, y las medidas que han de ser tomadas para su control y prevención. Es por ello que este tipo de modelos es un buen primer acercamiento, pero su uso ha de ser tomado con la debida precaución.

MODELOS EMPÍRICOS

Esta categoría de modelos deja lugar a aquellos que basan su predicción siguiendo el principio de conservación de la energía. Sin embargo, no diferencian entre los modos de transferencia de calor que se pueden presenciar en un incendio. Esto quiere decir, que no se

²¹ los modelos econométricos responden a la necesidad de explicar fenómenos que no necesariamente competen de manera exclusiva a la economía

indica de manera explícita el modo de transferencia de calor seleccionado ²².

En general se asume que la transferencia de calor es una función empírica (basada meramente en pruebas de laboratorios), que depende de otros parámetros clásicos (humedad, poder calorífico, entre otros). Este procedimiento da lugar a una aproximación bastante acertada del comportamiento de un incendio. Un claro ejemplo de ello es el trabajo hecho por Frandsen en 1971 [27], que mide la propagación en un *fuel bed*, basándose para ello en la conservación del flujo energético. Asimismo, la metodología propuesta por Rothermel en 1972 [9] (anteriormente vista en la Sección 1.1) pertenece a esta misma categoría.

El defecto de este tipo de modelamiento es que eventualmente las funciones no tienen un significado físico claro, razón por la cual se suscitan problemas en algunas interpretaciones. Eventualmente esto se puede reparar mediante factores de corrección, o imponiendo cotas a algunas funciones internas. Esta es una solución bastante pragmática, careciendo de un carácter científico, que es finalmente el trasfondo de este tipo de modelo: explicar sistemáticamente cómo se propaga un incendio forestal.

MODELOS FÍSICOS

Este último grupo contempla a los modelos que diferencian los distintos mecanismos de transferencia de calor. Es así como intentan predecir el avance del incendio usando fundamentos físicos (que poseen un significado particular), además de poseer coherencia en las funciones matemáticas que lo describen.

Usualmente dichos modelamientos son descritos asumiendo que el resultado del proceso de combustión es conocido, vale decir, que las propiedades de los elementos más importantes (llama y partículas de brasas) son establecidos con antelación. Algunas de estas propiedades son la emisividad ²³, temperatura, o simplemente la geometría y dimensiones respectivas.

Es así como finalmente el problema se reduce predecir el avance del incendio mediante la resolución de las ecuaciones referidas a la transferencia de calor y la mecánica de fluidos. Claramente, el grado de complejidad referido al modelo puede ser muy diverso dependiendo

²² existe una gran diversidad de modelos que sólo seleccionan un modo de transferencia, el cual consideran predominante según el tipo de incendio

²³ es la porción de radiación que emite una superficie, dada una determinada temperatura

del tipo de simulación que se desee realizar [28, 29, 30, 31].

Pese a todo lo anterior, esta categoría presenta un problema no menor: el grado de incidencia de la técnica de discretización implementada. Esto se debe a que los parámetros pueden eventualmente perder su significado físico, resultando en la misma falencia de los modelos presentados anteriormente. Por ello, es de suma importancia asegurar que los parámetros de la simulación se encuentren en una zona de independencia numérica. Esto reafirma otra consideración importante: el costo computacional requerido. Dado que la simulación generalmente viene dada por un set de ecuaciones diferenciales a resolver, los costos computacionales serán efectivamente mayores a medida que la precisión de la discretización aumente ²⁴.

2.2.2. MODELOS ESTOCÁSTICOS

Estos modelos, en su gran mayoría, se han desarrollado durante las últimas dos décadas. Su principal característica es la forma aleatoria en que se desarrollan las interacciones, a medida que el incendio evoluciona. A continuación se abordarán las dos técnicas más utilizadas en este tipo de modelos.

AUTÓMATA CELULAR

Se trata de un modelo matemático que describe un sistema que cambia con el correr del tiempo (de manera dinámica), pero evolucionando a pasos discretos. Esta perspectiva surgió mediante la idea de aplicar la auto-reproducción celular a sistemas complejos, siendo llevada a cabo por Von Neumann en 1966 [32]. En la década de los 80' Wolfram [33] presentó un estudio que incluye un modelo de propagación y sus posibles implementaciones (por ejemplo: la diseminación de enfermedades o un incendio forestal). Además, se incorporó apreciaciones sobre posibles alcances relacionados al impacto en algunas métricas fractales. No obstante lo anterior, fue recién a finales de los 90' que esta técnica se masificó.

En términos generales, un autómata celular (CA por su sigla en inglés) consiste en una idealización de la evolución de un sistema, en el cual el tiempo y espacio se discretizan.

²⁴hay que recordar que uno de los objetivos del presente estudio es lograr un modelo que opere en tiempos relativamente cortos

Además, las cantidades físicas involucradas tienen un conjunto finito de posibles valores. Es así como se conforma un conjunto o arreglo (en principio infinito) de células. El sistema se caracteriza por los valores discretos otorgados en un instante de tiempo determinado a cada una de las entidades de dicho arreglo.

La evolución del sistema se da a medida que cada una de las células que lo componen interactúa de manera local. Esto afecta a sus vecinos más cercanos, o bien, puede sólo interactuar con una vecindad delimitada. Es así como el sistema completo se va actualizando simultáneamente a pasos discretos. Cabe destacar que la interacción se da de acuerdo a las reglas impuestas a cada sistema en particular.

Esta metodología es ampliamente usada para representar una infinidad de sistemas físicos. Prácticamente cualquier estructura sistémica, que tenga que satisfacer una serie de ecuaciones diferenciales, puede ser modelada mediante esta técnica. Cuando la dependencia de las variables intrínsecas a cada célula es no lineal, se dice que el autómata compone un sistema no trivial. Este caso también se da cuando el autómata presenta alguna clase de inhibición en el crecimiento de las células activas.

En 1997 fue la primera vez en que esta técnica fue implementada en la modelación de la propagación de un incendio forestal propiamente tal. Este trabajo fue realizado por Karafyllidis y Thanailakis [16], quienes describieron el modelo de la siguiente manera:

“Dado un campo de velocidad escalar $R(x, y)$, el cual representa: la distribución de velocidades de propagación en cada punto de un bosque, el frente de fuego en el tiempo t_1 , la dirección del viento y su velocidad, y la altura y forma del terreno; se puede determinar el frente de fuego en cualquier tiempo $t_2 > t_1$.”

Claramente en el enunciado anterior se puede ver plasmada la idea de un CA. En la descripción de este modelo la vecindad utilizada corresponde a una vecindad de Moore ²⁵, ampliamente utilizada desde su primera aparición en 1970, en “El juego de la vida” [34]. Para una descripción más detallada de los diferentes estados y las reglas que sigue este CA, se puede acudir al Anexo B.

²⁵ en una cuadrícula, corresponde a las ocho células circundantes a cualquier casilla

PEQUEÑO MUNDO

La idea de pequeño mundo nace hacia finales de los 60', mediante un experimento realizado por el sicólogo S. Milgram, en donde él concluye que en Estados Unidos dos personas pueden ser enlazadas con tan sólo 6 conexiones (en promedio) [35]. Basándose en este concepto, en 1998 Watts y Strogatz investigaron más cabalmente este tipo de modelo [36]. Dicho estudio dio lugar a la siguiente definición:

“La red de pequeño mundo corresponde a un modelo en el cual la mayor parte de los nodos del grafo no son vecinos entre sí, teniendo la particularidad de que cualquier par puede comunicarse entre sí con un número relativamente bajo de saltos (arcos).”

Es así como se establecieron dos características básicas para este tipo de redes, a saber:

- El coeficiente de agrupamiento ²⁶ (*clustering coefficient*) debe ser elevado.
- La distancia máxima entre dos nodos crece de manera logarítmica a medida que el número de nodos en la red aumenta.

Una vez sentadas las bases de este modelo, y dada la versatilidad que esta red presenta al momento de modelar diversos problemas, se investigó el potencial de aplicación en diversas áreas. Es así como en 2002 Graham estudia la factibilidad teórica de representar un incendio forestal con este tipo de red [37]. Este estudio se basó en el modelo de incendio forestal propuesto por Bak et al. una década antes [38]. Gracias a esta investigación, se concluyó que un incendio forestal efectivamente presenta las condiciones necesarias para poder ser modelado mediante este tipo de red. De ahí en más, diversos estudios se han llevado a cabo [21, 39, 40], teniendo como finalidad la mejora continua de la física subyacente al fenómeno de incendio forestal, además de su correcta representación en los diferentes modelos numéricos.

La composición básica de este tipo de red, aplicada en un modelo de incendio forestal, es la siguiente: si un sitio se encuentra encendido, este transmitirá calor a sus vecinos más cercanos (*crowning*). Además, eventualmente se materializará una conexión

²⁶este coeficiente indica que si dos nodos no están conectados directamente entre sí, hay una alta probabilidad de que lo hagan a través de otros nodos

a larga distancia con otro sitio dado el proceso de *spotting* (para mayor detalle, ver las Secciones 2.1.1 y 2.1.2).

No obstante lo anterior, una modificación importante es la siguiente: en lugar de considerar tan solo a los vecinos, es mucho más realista instaurar una zona de influencia en donde el sitio transfiere calor a una determinada área (la cual claramente puede abarcar más allá de los vecinos inmediatos). Para un mejor comprensión de esta diferencia, no hay más que comparar las Figuras 2.2 y 2.3.

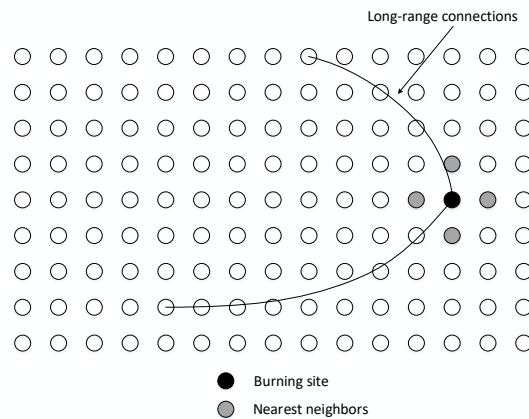


Figura 2.2: esquema inicial de un modelo de pequeño mundo aplicado a un incendio forestal.

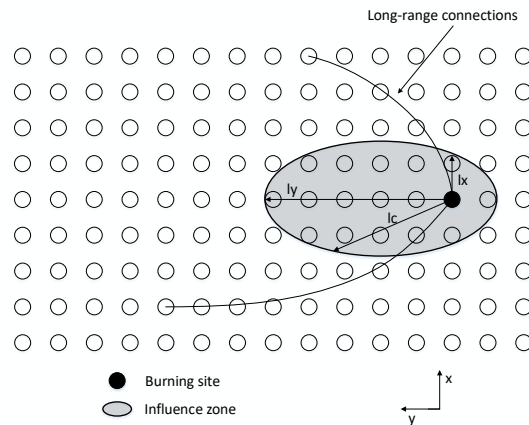


Figura 2.3: esquema mejorado de un modelo de pequeño mundo, tomando en cuenta la física que subyace al problema (modelo radiativo).

2.3. MÉTRICAS EN UN INCENDIO FORESTAL

Un aspecto importante al momento de clasificar un incendio forestal es tener claro cuáles son los *outputs* de mayor interés. Si bien existen una infinidad de datos que se pueden obtener, en esta investigación se hará hincapié a tres aspectos fundamentales: la velocidad de propagación, el área quemada y el tiempo total de duración del incendio.

2.3.1. RATE OF SPREAD (ROS)

Para muchos, la velocidad de propagación (ROS por su sigla en inglés) es el indicador de mayor interés en un incendio forestal. Esto debido a que es uno de los principales parámetros en los que se fundamenta la medición del índice de peligrosidad de un incendio, sino el más importante.

Un ejemplo claro de lo anterior es el sistema de mediciones creado McArthur [12], que utiliza diferentes parámetros como *input* (tales como el viento, la humedad y temperatura ambiente); dando lugar al *Forest Fire Danger Index*²⁷ (FFDI), el cual predice el avance y evolución de diferentes incendios australianos [41, 42]. De esta manera los efectivos que intentan controlar el incendio²⁸ saben qué tan voraz es, pudiendo combatirlo con una mayor seguridad. Esto se traduce en que el ROS es un parámetro vital en cuanto al aspecto operacional, ayudando al combate y control de estos desastres.

Ahora bien, dentro de la literatura se pueden encontrar diferentes definiciones y métodos para medir esta rapidez de propagación. En la gran mayoría de los casos, se hace referencia a la intensidad con la cual el frente de fuego se extiende, aunque también existen definiciones basadas en la tasa de crecimiento del perímetro del incendio, o bien, al crecimiento del área quemada. De acuerdo a la primera (y más utilizada) definición, se pueden hallar dos tipos²⁹:

- *Forward-fire*: es el lugar por donde el incendio se propaga con mayor rapidez. Por lo general corresponde a la zona que se encuentra en la dirección del viento, o en otras

²⁷ índice de peligro de un incendio forestal

²⁸ brigadistas

²⁹ según el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (*USDA Forest Service*), <http://www.fs.fed.us/nwacfire/home/terminology.html> (27.05.2016)

ocasiones a aquella que está a favor de una pendiente. Esto es consecuencia directa de que dichas variables repercuten de manera positiva en el avance de las llamas.

- *Back-fire*: hace referencia al avance que se suscita en la parte posterior de un incendio. Con el fin de establecer objetivamente dónde se encuentra dicho sector, se tendrá por cierto que corresponde a la zona opuesta a la cual existe una mayor tasa de crecimiento del frente de fuego.

Para una mejor comprensión de la descripción anterior, la Figura 2.4 ilustra estos conceptos. Para ello utiliza un incendio que cuente con una condición ambiental de viento durante su propagación. Como se puede apreciar, el frente de propagación del incendio se haya en la misma dirección del viento. Asimismo, en la parte posterior también existe propagación del incendio, pero esta se da de una manera mucho más lenta.

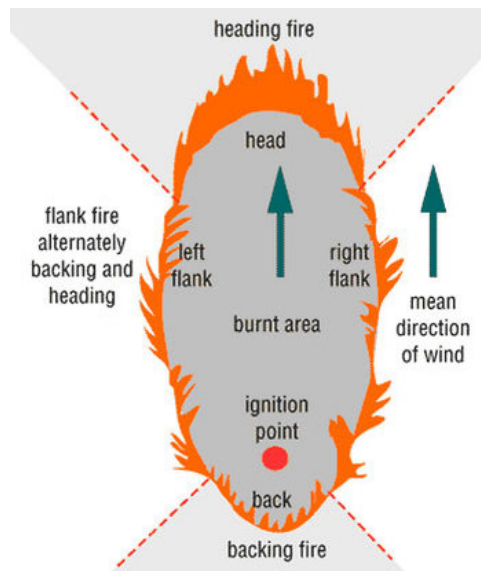


Figura 2.4: esquema que ilustra los diferentes frentes que se dan en un incendio. Se ha de poner énfasis en lo que el frente de avanzada (*heading fire*) y en frente de atrás (*backing fire*).

Ahora bien, una vez determinado el frente del incendio, se debe ver su evolución en el tiempo. Una de las primeras técnicas es mediante el establecimiento de líneas de control. Por ejemplo, cuando se debe medir en terreno se procede a disponer estacas a distancias regulares. Luego, se cronometran los tiempos en los cuales el frente alcanza dichos puntos de control. Un ejemplo de este tipo de mediciones se puede ver en los experimentos

realizados por Cheney et al. [43], cuya técnica se puede apreciar en la Figura 2.5. Para ahondar en mayores detalles de este tipo de *setup* (cámara, distancias, entre otros aspectos), ver Britton et al. [44].

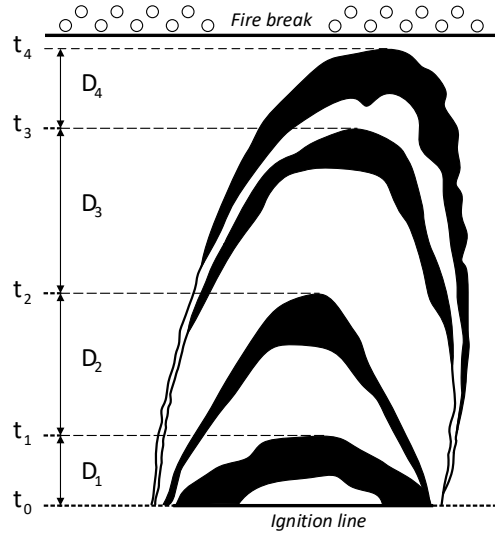


Figura 2.5: esquema de los diferentes frentes del incendio C064, tomadas en el estudio de Cheney et al. en Australia.

Por otra parte, una manera más precisa de calcular el ROS es tomando realmente el mayor avance del frente del incendio. Sin embargo, para poner en práctica esta metodología se necesitan muchos más recursos. Esto se debe a la necesidad de contar con imágenes aéreas, con el fin de establecer de manera precisa el contorno del incendio. En un segundo artículo realizado Cheney et al. [45] se puede apreciar de manera clara este tipo de procedimiento, siendo aplicado a otro de los incendios experimentales del año 1993. Como se muestra en la Figura 2.6, las distancias máximas se toman trazando una recta imaginaria de longitud R desde el frente de fuego en t_1 hasta el frente de fuego alcanzado en la siguiente medición en $t_2 = t_1 + \Delta t$. Es así como el ROS se define mediante la siguiente expresión:

$$\text{ROS} = \frac{R}{t_2 - t_1} = \frac{R}{t_1 + \Delta t - t_1} = \frac{R}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Finalmente, es importante mencionar que también existen modelamientos teóricos para el cálculo del ROS. Por ejemplo, se puede destacar la expresión propuesta por Frandsen

en 1971 [27], que fue luego popularizada por Rothermel en su modelamiento completo de incendios forestales [9]. La causa de esto es la robustez teórica que posee el modelo de Frandsen, lo cual permite que sea utilizado en una gran gama de situaciones. Esta formulación es la siguiente:

$$ROS = \frac{I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left(\frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_C} dx}{\rho_{be} Q_{ig}} \quad (2.2)$$

donde,

- I_{xig} : flujo horizontal de calor absorbido por unidad de volumen de combustible al momento de la ignición.
- $\left(\frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_C}$: gradiente de la intensidad vertical medida en un plano, a una profundidad constante z_C .
- ρ_{be} : densidad efectiva del estrato.
- Q_{ig} : calor de pre-ignición, vale decir, el calor necesario para llevar una unidad de masa de combustible a su punto de ignición.

Sin embargo, se debe dejar en claro que esta manera de cálculo del ROS sirve como parámetro de entrada en un modelo de propagación. Luego, el avance de este se ve subordinado al valor de entrada de las variables mencionadas anteriormente. Es por esta razón que esta definición es la utilizada para evaluar el peligro potencial de un incendio, en las ya mencionadas clasificaciones de McArthur.

2.3.2. ÁREA QUEMADA

El estudio de este parámetro es importante debido a que de él se obtiene una base cuantitativa útil en el análisis post-incendio. Como se mencionó en el Capítulo 1, una de las mayores preocupaciones al momento de cuantificar los daños producidos por un incendio forestal es el área abarcada por este mismo. En particular, esta métrica hará posible la cuantificación de la vegetación consumida (destruida) por las llamas.

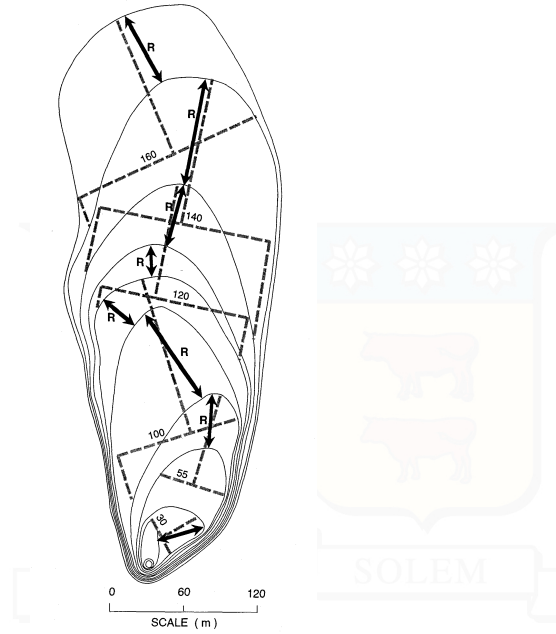


Figura 2.6: esquema de cómo se determina el avance máximo del frente de fuego. En particular se trata del incendio experimental F019, hecho en 1993 en Australia.

Ahora bien, cuando la situación estudiada corresponde a un predio privado, una manera común de cálculo para estimar los daños provocados por el incendio es mediante la siguiente expresión:

$$\text{Costo Total} = \frac{A \cdot V \cdot \kappa \cdot P_{\kappa}}{\rho} \quad (2.3)$$

donde,

- A : área total consumida por el incendio.
- ρ : densidad de vegetación del predio (dopaje).
- V : volumen de madera talada por hectárea plantada.
- κ : factor según tipo de uso.
- P_{κ} : costo de producción y/o venta por metro cúbico de madera tipo κ .

Como queda claro en la Ecuación 2.3, para realizar esta evaluación se hace necesario

contar con la información del total de área quemada y la densidad de vegetación ³⁰ del predio forestal (porcentaje del total de terreno que efectivamente contiene árboles, arbustos, o cualquier material combustible). En conjunto con lo anterior, según la especie y variedad del árbol plantado, la clasificación del suelo, etc., se obtendrán los niveles esperados de producción (en volumen de madera por hectárea).

Siguiendo esta misma línea, el valor del parámetro κ es fruto del porcentaje útil de madera que se obtiene del tronco recién talado ³¹, dada la medida final que se requiera ³². Existen diversas formulaciones para obtener este parámetro, basándose la gran mayoría en modelos estadísticos. Si se desea revisar algunas de estas metodologías, ver el Anexo C.

Finalmente, queda por explicar el costo asociado a la producción perdida (P_{κ}). Este parámetro involucra las inversiones hechas, mano de obra incurrida, costo de oportunidad, entre otros aspectos económicos. Si el cálculo es muy complejo, o bien no se cuenta con toda la información requerida, es posible utilizar el precio de venta esperado como una alternativa válida.

2.3.3. TIEMPO TOTAL

Esta es la última métrica que se estudiará en el presente trabajo. En orden de establecer los hitos que marcan el inicio y el término del incendio, y por ende de su simulación, se harán las siguientes definiciones:

- T_{ini} : es aquel momento en el que se estable el(los) foco(s) del incendio, procediendo luego a la propagación de este a través del *lattice* ³³ del bosque.
- T_{fin} : este hito marcará el final de la simulación del incendio, siendo desencadenado por alguna de las siguientes razones. En primera instancia, que el incendio no evolucione (propague) por un periodo de tiempo considerable, dando a lugar a la conclusión de que se ha detenido por causas naturales. En segunda instancia, está la

³⁰ también conocida como dopaje

³¹ trozo al vuelo

³² medida del tablón como producto final, por lo general trabajado en pulgadas

³³ mallado

situación en que el incendio traspase el *lattice* del bosque, alcanzado algunos de los extremos de la malla ³⁴.

Esto pone de manifiesto que el tiempo total será el enmarcado en la Ecuación 2.4, referido a la diferencia que separe los eventos ya mencionados.

$$T_{total} = T_{fin} - T_{ini} \quad (2.4)$$

Como se podría esperar, este parámetro tiene una estrecha relación con la rapidez de propagación (ROS). Sin embargo, cuando la densidad de ocupación del bosque empieza a decrecer (ρ), la relación puede tornarse menos notoria. Los patrones que adopta el incendio comienzan a tener forma ramificada ³⁵, lo cual recae en que eventualmente el avance no sea tan rápido. Otra consecuencia asociada es que el avance comienza a ser intermitente. Esto se refleja en que en determinados intervalos de tiempo el incendio puede volverse y seguir consumiéndose hacia su interior, dando lugar a situaciones de riesgo en el combate contra los incendios forestales [46]. En la Figura 2.7 se puede apreciar este fenómeno, así como posibles cavidades (también conocidas como islas) que eventualmente se forman, ya sea por haber árboles que se encuentran aislados del resto de material combustible, o bien por cambios en la dirección del viento, por mencionar algunos de los posibles factores.

Es así que el realizar un estudio de los ya mencionados parámetros, de manera individual, se hace esencial al momento de comprender cómo evoluciona este tipo de fenómeno. Este análisis será abordado en la Sección 4.1.3 del presente trabajo.

³⁴ a este proceso se le denomina percolación, en el sentido de que el incendio difunde a través de un mallado poroso, que corresponde al bosque

³⁵ proceso llamado técnicamente *figering fire*

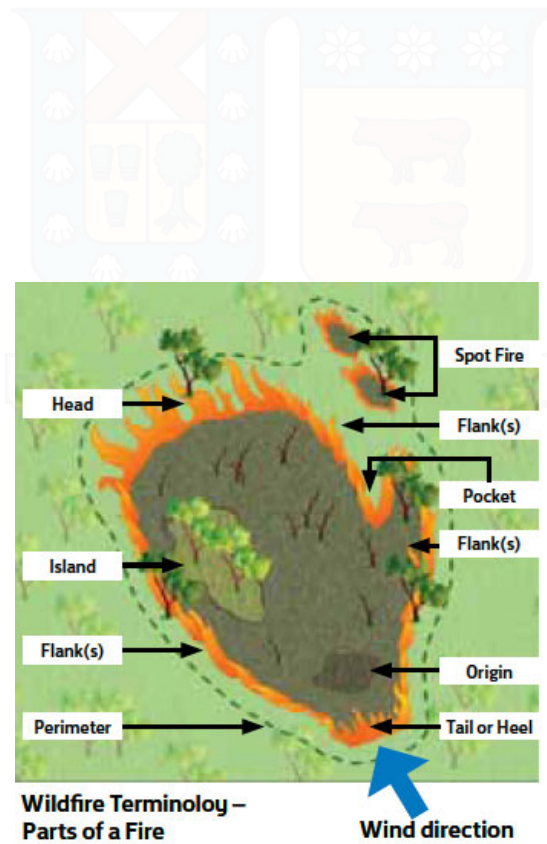


Figura 2.7: representación de la anatomía de un incendio forestal. Claramente, no es necesario que posea todas las características aquí expuestas, pudiendo no presentarse islas, puntos de *spotting*, o ramificaciones (*fingers*).



CAPÍTULO 3

MODELO PROPUESTO

Como se vio en el Capítulo 2, un incendio forestal puede ser abordado desde diferentes perspectivas (para mayor detalle, ver Sección 2.2). Para la presente investigación, se ha propuesto un modelo que sea continuo en el tiempo, y discretizado en el mallado del bosque, dando lugar a pequeñas células (o sitios) cuadradas que contienen el material combustible. Es así como se puede configurar una red de pequeño mundo, que contenga las diferentes interacciones según el tipo de relación que exista entre los distintos cuadrantes.

Es así como cada célula contiene una determinada cantidad de masa de combustible, la cual representa un potencial energético al momento en que se incinere. El modo de transferencia de calor seleccionado explícitamente es la radiación. Por otra parte, la convección se incluye en el modelo de manera implícita, correspondiendo a una fracción del total de radiación emitida por cualquier célula que se esté quemando.

Además, el modelo es capaz de capturar los efectos que tienen sobre la propagación el viento y la pendiente que presente el terreno. Esto se consigue mediante el cambio en el peso que posean los diferentes arcos que unen los sitios (nodos) que conforman la red.

Como se hace referencia en la literatura, una gran parte de las interacciones que existen en el bosque no son locales, sino que abarcan una mayor zona de influencia [21, 40], lo cual lleva a usar una red de pequeño mundo. En el caso de un medio completamente isotrópico ³⁶, el sistema generado es de rango 1, lo cual permite renormalizar el sistema [47], simplificando el problema de la propagación a gran escala.

³⁶ sin viento y en un terreno plano

Sin embargo, el viento y/o la inclinación del terreno eventualmente terminará por romper la simetría de la red, lo que la transformará en un grafo dirigido (dado que la propagación será posible sólo en algunas direcciones). Esto traerá como consecuencia que el comportamiento sea local y altamente dependiente del lugar en que se encuentre el sitio. Lo anterior llevará a que la topología de la red cambie en conjunto con el peso de los arcos.

Es así como la anisotropía que se produce dado los efectos ya mencionados, también repercutirá en la dinámica de propagación del incendio, afectando por ejemplo al área quemada y al ROS [39].

Finalmente, de acuerdo a la caracterización según las diferentes escalas que se pueden apreciar en un bosque³⁷ (descripción hecha por Séro-Guillaume et al. [28]), el modelo propuesto rescata parámetros que pueden ser identificados a diferentes escalas, construyendo un modelo robusto en cuanto a la descripción de la física involucrada. En primera instancia, para la escala gigascópica se introduce la densidad de ocupación ρ (ya mencionada en la Sección 2.3.2) y la diferencia de altura (dz) que existe entre cualquier sitio y su vecindad correspondiente (según sea la topografía del terreno). Luego, en la escala macroscópica se puede incluir la geometría de las copas de los árboles y las llamas, lo cual se traduce principalmente en el factor de forma geométrico. Este parámetro se abordará en la Sección 3.3. En tercer lugar, se asocian a una escala mesoscópica los parámetros que se relacionen con el coeficiente de absorción, los cuales se estudiarán en la Sección 3.2. Finalmente, la escala microscópica se compone principalmente por el parámetro de la vida media, el cual se profundizará en la Sección 3.5. Dicho parámetro recoge de manera empírica tanto las características propias de la vegetación (según especie), así como su condición al momento del incendio (contenido de humedad).

³⁷ la clasificación hace uso de las diferentes resoluciones en las que se trata a un bosque como si fuera un medio poroso

3.1. SUPUESTOS IMPLEMENTADOS

3.1.1. MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los modos de transferencia predominantes en un incendio forestal son la convección y la radiación. Dependiendo de un gran número de condiciones, una puede prevalecer por sobre la otra. Por ejemplo, un factor importante es la distancia existente entre los diferentes sitios, para ser más preciso, la distancia entre las copas de los árboles. La estructura inestable propia de una llama que se desarrolla en ambientes no controlados, permite que las copas vecinas sean afectadas por una suerte de convección intermitente³⁸ [48]. Este parámetro es crítico para el proceso de ignición, cuando da lugar la interacción física entre la llama y los gases de pirólisis del combustible, haciendo que la convección juegue el rol más predominante.

Más allá de los factores relacionados con el medio, un parámetro interno de gran relevancia es el tamaño de partícula característico del combustible. Para ser más preciso, se trata de la relación volumen/superficie. Para valores pequeños³⁹ se ha visto que la convección juega un rol crucial, siendo la responsable de generar una cantidad suficiente de gases de pirólisis para que la ignición sea posible [49]. Sin embargo, a medida que se incrementa esta fracción la predominancia de la convección decae rápidamente. Esto se debe a la sensibilidad que este coeficiente presenta. Se tiene que a partir de valores cercanos a 12 mm (para la relación volumen/superficie), el coeficiente de convección es prácticamente nulo⁴⁰, como se puede apreciar en la Figura 3.1. Además, cabe precisar que la distancia que recorre el flujo en la superficie (largo característico) también juega un rol crucial en esta relación.

Por otra parte, la convección posee un rol contraproducente para la rapidez de propagación del incendio. El fenómeno que se da lugar es llamado efecto de enfriamiento (del inglés *cooling effect*), siendo propenso a ocurrir cuando las partículas de combustible son finas. Este enfriamiento se traduce en una baja en la temperatura de la llama, la cual va en

³⁸ se dice que la llama se asemeja a una “lengua que toca las copas”, aunque realmente es el aire caliente el cual tiene mayor repercusión en este caso

³⁹ ratios que sean menores a 1 mm

⁴⁰ se debe considerar que el valor estándar para la convección forzada del aire es del orden de 100 W/m²K

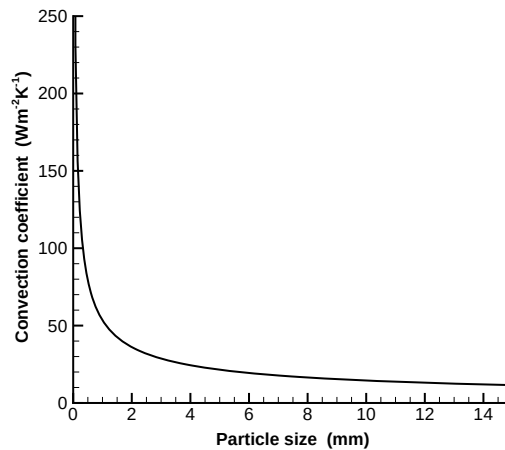


Figura 3.1: gráfico en el cual se puede apreciar el decaimiento potencial que sufre el coeficiente de convección a medida que el tamaño de partícula aumenta. En particular, se trata de la relación volumen/superficie.

desmedro de la radiación que esta produce ⁴¹ [48].

Más allá de lo anterior, en la literatura se puede hallar que para los incendios que son principalmente de copas (*crowning fire* por su nombre en inglés), el efecto de enfriamiento es muy bajo en comparación al aporte de calor hecho por la convección [50]. Además, la cantidad de energía atribuida a este último modo de transferencia representa alrededor del 10 % del flujo energético que aporta respectivamente la radiación. Ambos fenómenos pueden ser constatados en la Figura 3.2, en donde queda clara esta situación.

En este trabajo, tanto radiación como convección son consideradas modos de transferencia de calor válidos. Sin embargo, la radiación está expresada de manera explícita, dejando a la convección de manera implícita. Para ser más preciso, esta última corresponderá a una fracción de la radiación emitida por cualquiera de los sitios.

3.1.2. Evolución de los sitios

El estado de cada uno de los sitios refleja la cantidad remanente de combustible. En este proceso se pueden observar cuatro diferentes fenómenos: pre-calentamiento, ignición, decaimiento de masa y propagación.

⁴¹ se debe recordar que la radiación posee como variable la cuarta potencia de la diferencia de temperatura entre las superficies en cuestión

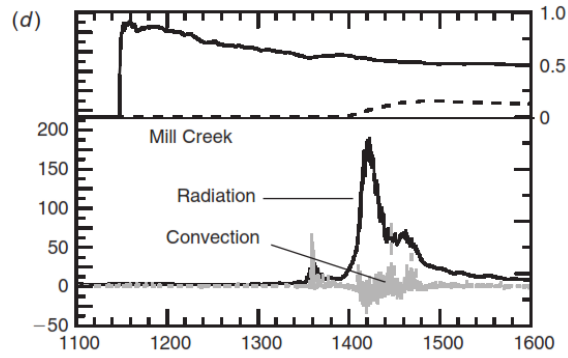


Figura 3.2: gráfico en el cual se muestra el flujo energético tanto por radiación como por convección durante un incendio de tipo *crowning*. Además, en la parte superior se puede ver los efectos de calentamiento y el enfriamiento que se producen dado el flujo convectivo de energía.

En un comienzo, la descomposición del combustible disponible en estado sólido (hojas y ramas de menor envergadura) es principalmente controlada por la radiación transferida desde la llama de otros árboles cercanos que se estén quemando, generando gases de pirólisis. A esta etapa se le denominará pre-calentamiento. Una vez que el sólido se enciende (ignición), el proceso de auto-degradación (del inglés *self-burning*) es considerado predominante, dando lugar a una pérdida progresiva de masa. En esta etapa se extrae una relación de extrema importancia, denominada *burning rate*, que representa la rapidez con la cual un sitio pierde masa (se degrada). Esta variable dará lugar a la determinación de cuánta energía se libera, mediante la radiación que produzca la llama del propio sitio (que aparece al momento de la ignición). Es así como el incendio seguirá esparciéndose por el bosque, culminando con el último fenómeno mencionado: la propagación.

Ahora bien, el presente modelo contempla el estudio de cada uno de los fenómenos anteriormente descritos. Estos se abordan de manera individual, con el objetivo de simplificar la descripción, para luego acoplarlos y que en conjunto logren describir la dinámica de un incendio forestal de manera razonable. En orden de representar de manera adecuada la evolución de cada uno de los sitios que componen el bosque, se han considera como ciertos los siguientes supuestos:

- La cantidad de combustible inicial en el sitio i estará dada por el parámetro m_i^0 . Además, la cantidad normalizada de combustible remanente en dicho sitio, en un tiempo t cualquiera, será descrita por la variable: $C_i(t) = m_i(t) / m_i^0$. Luego, para

el tiempo inicial se tendrá que: $C_i(t = 0) = 1$ si el sitio está activo ⁴², y 0 en caso contrario.

- $C_i(t) = 1$ y $C_i(t) = 0$ son los estados estacionarios para un sitio si ningún agente externo es considerado.
- Con el fin de que un sitio comience a incinerarse por cuenta propia (*self-burning*), una cantidad mínima de energía proveniente de un flujo radiativo externo es requerida.
- La radiación absorbida por un sitio ha de ser proporcional a la cantidad de combustible remanente en ese sitio.
- La degradación que sufra un sitio es proporcional a la energía recibida.
- Mientras un sitio se está quemando, la cantidad de radiación que emita debe ser proporcional a la respectiva pérdida de masa que sufra.
- La ignición no depende sólo de la temperatura en la que se encuentre el combustible (ya sea que este se halle en fase sólida o gaseosa) [51, 52], sino que también existen aspectos tales como el contenido de humedad o el flujo radiativo externo, que tienen directa incidencia sobre este hito. Es por ello que la ignición estará dada por un umbral en términos de la rapidez de pérdida de masa en el tiempo ⁴³ [49, 53].

3.2. CALOR TRANSFERIDO Y ABSORCIÓN

En primer lugar, se debe decir que la importancia del modelamiento del intercambio de energía, que ocurre entre los diferentes sitios del bosque, radica en que de este proceso depende la degradación de los árboles y posterior propagación del incendio. Como ya se mencionó en la Sección 3.2, la radiación se formulará de manera explícita, por lo cual es necesario entender los mecanismos de generación y absorción de calor que se dan lugar en las copas de los árboles.

⁴² vale decir, que el sitio contenga material combustible

⁴³ en particular, la derivada de la pérdida de masa normalizada

Una descripción del medio puede ser hecha desde el punto de vista mesoscópico, que es la escala (o bien, resolución) en la se aprecia de mejor manera la composición del material combustible. La copa de un árbol se encuentra compuesta por dos fases: aire (gaseosa) y biomasa (sólida), lo cual genera un volumen poroso. Es así como la penetración de la radiación que recibe este medio no es capturada en su totalidad.

Para poder modelar esta situación, se utilizará la ley óptica Bouguer-Lambert-Beer, que relaciona la absorción de un haz de luz que atraviesa un determinado material. En particular, esta ley establece lo siguiente:

“Cuando una luz monocromática pasa por un medio homogéneo, la disminución de la intensidad del haz de luz incidente es proporcional al espesor del medio, lo que equivale a decir que la intensidad de la luz transmitida disminuye exponencialmente al aumentar aritméticamente el espesor del medio absorbente.”

La Figura 3.3 muestra un esquema aplicando la definición anteriormente dada. En él, un haz de luz incidente de intensidad I_0 recorre un trayecto de distancia x , con una concentración de magnitud c , teniendo un coeficiente de absorción igual a β . Esto da lugar a un haz de luz transmitida igual a I_T . La relación matemática de lo anterior es:

$$\frac{I_0}{I_T} = e^{-\beta c x} \quad (3.1)$$

Si además se aplica la ley de conservación de la energía, se tendrá que la intensidad del haz de luz absorbida I_A debe ser igual a:

$$I_A = I_0 - I_T \quad (3.2)$$

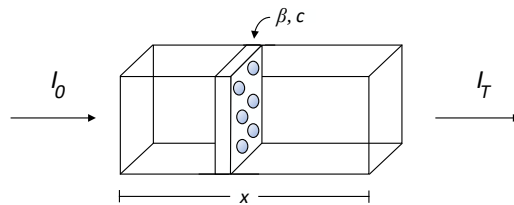


Figura 3.3: esquema simplificado de la Ley de Bouguer-Lambert-Beer.

Por lo demás, el modelo tiene por objeto representar la energía transmitida por radiación, para lo cual se asumirá que la energía tiene el mismo comportamiento que la intensidad del haz de luz. Aunando la las Ecuaciones 3.1 y 3.2, la relación entre la energía efectivamente absorbida (E_i^a) y la energía radiativa incidente (E_i^r) será:

$$E_i^a = E_i^e (1 - e^{-\beta c x}) = E_i^e \cdot F_i \quad (3.3)$$

Como se puede apreciar, los términos pueden agruparse en un sólo factor que dependerá exclusivamente de las propiedades del sitio en el que incide la radiación, el cual será conocido como factor de atenuación (F_i).

Por otra parte, en la literatura usualmente el coeficiente de absorción y la concentración de combustible se combinan, dando lugar al coeficiente de extinción ⁴⁴. Razón por la cual el cálculo de la energía absorbida será resumida a la siguiente expresión:

$$\beta c = \frac{\alpha_k \sigma_k}{4} \quad (3.4)$$

En la Ecuación 3.4, diferentes propiedades físicas son precisadas. En primer lugar, α_k representa la fracción de volumen del combustible. Luego, σ_k da lugar a la relación superficie/volumen que tenga la partícula de combustible que componga la copa del árbol. Esta propiedad tiene gran relevancia al momento de lidiar con la propagación del incendio, como se vio en la Sección 3.1.1.

Ahora bien, queda por definir la longitud del medio: x . Debido a que las relaciones hechas hasta el momento se basan en la “Física Óptica” ⁴⁵, un camino conveniente será utilizar el espesor óptico (L_m) para expresar esta medida. La siguiente relación empírica, propuesta por Orloff et al. [54], describe lo anterior:

$$L_m = 3,6 \frac{V_f}{A_b} \quad (3.5)$$

Donde V_f es el volumen de la llama que se genera en la copa, y A_b es el área de contacto entre dichos elementos. Esta descripción es totalmente geométrica, tanto para la vegetación

⁴⁴ corresponde al inverso del camino libre promedio (*mean free path*) dentro de un estrato vegetal

⁴⁵ rama de la física que se encarga del estudio de la generación de radiación electromagnética, sus propiedades y la interacción de dicha radiación con la materia

como para las llamas. En este trabajo, las estructuras de ambos elementos son consideradas cilindros perfectos, con diferentes dimensiones. Una descripción geométrica más detallada sobre estos cuerpos se abordará en la Sección 3.3.

Como se puede desprender de las ecuaciones revisadas en esta sección, el factor de atenuación terminará aunando consideraciones físicas y geométricas, lo cual lo hace ser bastante robusto. Además, los valores que adopta este factor serán significativos para valores bajos de las principales variables que lo componen (α_k y σ_k). Otro punto interesante es que dichas variables dependen, en gran medida, del tipo de vegetación que esté siendo modelada. En la Figura 3.4 se puede apreciar el efecto que tienen, corroborando lo anteriormente mencionado.

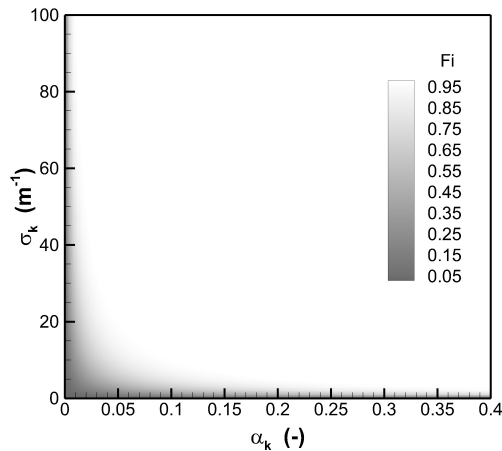


Figura 3.4: gráfico en el cual se muestra la influencia que tiene la porosidad y la absorción, respectivamente α_k y σ_k , sobre el factor de atenuación de la radiación incidente.

En general, cuando el espacio vacío que se encuentra en la copa de un árbol es importante, la incidencia de esa porosidad es notoria. Es así como tan solo cierta parte de la radiación incidente termina efectivamente siendo absorbida, lo cual ralentiza el proceso de combustión.

Este efecto es fácilmente observable en la etapa de pre-calentamiento del combustible. Es en este momento en el cual todo el calor es capturado por la copa. Dicha energía proviene de los diferentes sitios vecinos que se están quemando y que tienen al árbol en cuestión dentro de su zona de influencia.

Finalmente, en la literatura existen tabulaciones de los parámetros α_k y σ_k para diferentes tipos de vegetación [53, 55, 56]. En estos casos, dado que las vegetaciones estudiadas corresponden a diferentes variedades de pinos y robles (comúnmente encontradas en bosques mediterráneos), los valores para el factor de atenuación son prácticamente 1. Esto quiere decir que la copa absorbe la totalidad de la radiación incidente. La causa de esto es que las copas de este tipo de árboles son bastante “densas”, como queda de manifiesto en la Figura 3.5. Cabe mencionar que estos parámetros pueden ser obtenidos no sólo desde la literatura, sino que también se pueden conseguir de manera experimental, con el fin de estudiar alguna especie de particular interés.



Figura 3.5: diferentes especies estudiadas en la literatura de incendios forestales, dada que componen numerosos bosques de tipo mediterráneo. La imagen de la izquierda corresponde a una variedad de pino (*Pinus pinaster*), así como a la derecha se encuentra un tipo de roble (*Quercus coccifera*).

3.3. INTERACCIÓN ENTRE SITIOS

En esta sección se describirá el procedimiento para generar una red que represente al bosque de manera sistémica. Una mallado regular es construido sobre el terreno, el cual se llena de manera aleatoria con vegetación. Como se menciona en la Sección 2.3.2, a esta densidad de vegetación se le conocerá como ρ . En particular, para este estudio dicha variable se distribuye de manera uniforme en todo el *lattice*.

En primer lugar, para los sitios activos ⁴⁶ se ha de establecer quienes son los otros

⁴⁶ vale decir, que contienen vegetación (material combustible)

sitios activos que se encuentran dentro de su zona de influencia. En principio, se podría considerar que todo el bosque corresponde a la vecindad de un sitio. Sin embargo, esta elección implicaría un costo computacional elevadísimo. Es por ello que, en virtud de la conveniencia que implica, la vecindad será acotada a todos los sitios que estén a no más de una distancia igual a 5,5 veces la longitud elemental ⁴⁷ de la malla, con respecto al sitio en cuestión. Más adelante, en esta misma sección, se podrá ver que esta es una primera aproximación bastante adecuada. Luego, una vez que todas las conexiones dentro de la red que representa al bosque han sido establecidas, la dinámica de propagación será controlada por el modelo de propagación propiamente tal, el cual será ahondado en la Sección 3.6.

Ahora bien, para un sitio i que está dentro de la vecindad de otro sitio j (el cual está quemándose), el cambio de la cantidad normalizada de combustible por unidad de tiempo del sitio i es proporcional al total de energía recibida desde el sitio j (E_{ij}^r). Este concepto queda representado de la siguiente manera:

$$\Delta C_i = \eta E_{ij}^r \quad (3.6)$$

En la Ecuación 3.6, el valor de η hace relación a una constante de proporcionalidad que está ligada a la cantidad de calor mínimo que es necesario para lograr la ignición. Este parámetro puede ser estimado midiendo el total de energía necesaria para que la copa del árbol logre encenderse (E_i^i). La expresión con la cual puede ser obtenido este valor es la siguiente:

$$E_i^i = h_i m_i^0 \quad (3.7)$$

Donde h_i representa la energía necesaria por cantidad de combustible que logre un calentamiento tal del material ⁴⁸, que en última instancia produzca la ignición de este. Por otra parte, esta energía se relaciona intrínsecamente con la cantidad de combustible remanente en el sitio. Normalmente, la ignición de un combustible sólido puede ser correlacionada a un flujo crítico de gases de pirólisis [57]. Es así como se puede hallar un umbral en el

⁴⁷ al momento de discretizar, corresponde a la medida base (más pequeña) que se utilizará para componer el resto de medidas

⁴⁸ en inglés a este fenómeno se le denomina *thermal runaway*

cual ocurre la combustión (C_i^{th}), el cual ronda los valores de 0,90 ~ 0,95 con respecto a la cantidad normalizada de combustible inicial, dependiendo de la intensidad de la fuente radiativa. Por ende, se concibe la siguiente expresión para la constante de proporcionalidad:

$$\eta = \frac{\ln(1/C_i^{th})}{E_i^i} \quad (3.8)$$

Luego, volviendo a la Ecuación 3.6, la energía recibida desde el sitio j se puede resumir con lo siguiente:

$$E_{ij}^r = E_j f(x_i - x_j) r C_i \quad (3.9)$$

Esta ecuación representa uno de los principales motores de la propagación, razón por la cual se procederá a explicar detenidamente las variables que la componen.

3.3.1. ENERGÍA TOTAL EMITIDA

La cantidad total de calor liberado por el sitio j se conocerá con el parámetro E_j . Si se toma un periodo de tiempo, esta magnitud puede ser estimada haciendo uso de la cantidad de combustible consumido:

$$E_j = h_c m_j^0 \Delta C_j \quad (3.10)$$

Donde h_c representa el poder calorífico del combustible del cual está compuesta la copa del árbol. Esta propiedad muestra la cantidad de energía por unidad de masa ⁴⁹ que se puede liberar al producirse una reacción química de oxidación. En particular, el interés de este trabajo se enfoca en el poder calorífico inferior (PCI por su sigla), debido a que el combustible corresponde a un estrato vegetal, el cual efectivamente contendrá humedad y se tendrá que descontar la energía utilizada en evaporarla (calor latente).

⁴⁹ también puede ser por cantidad de volumen o materia (*mol*)

3.3.2. FACTOR DE FORMA GEOMÉTRICO

La función $f(x_i - x_j)$ representa al factor de forma geométrico entre la llama existente en el sitio j y la copa del árbol que se encuentra en el sitio i . Con el fin de simplificar la nomenclatura, de aquí en adelante se hará referencia a este valor con el símbolo ϕ_{ij} .

El factor de forma es calculado mediante el uso del concepto de llama sólida. Si bien es correcto pensar que una llama es un volumen semi-transparente que absorbe y emite energía, la fuente principal de dicha radiación y absorción son las partículas de hollín⁵⁰ [58]. Es por ello que la aproximación de que la radiación sea un fenómeno superficial más que volumétrico ha sido aceptada en general [59, 60].

En este estudio, la fuente que emite radiación es considerada como un cilindro (la ya mencionada llama sólida). Así mismo, el blanco receptor también tendrá una estructura cilíndrica (la copa de un árbol). Evidentemente, ambos pueden tener diferentes dimensiones tanto en altura como en el radio de sus bases. La radiación puede ser descrita mediante una expresión analítica para el factor de forma entre un cilindro y un elemento infinitesimal que pertenezca a la superficie que describe al blanco. En el escenario más simplificado, el modelo considera a los árboles como cilindros que potencialmente pueden emitir y absorber radiación hacia y desde las vecindades respectivas.

Luego, para evaluar este factor de forma se puede recurrir a las formulaciones conocidas para cilindros posicionados verticalmente [61, 62, 63]. La siguiente expresión representa el flujo de calor radiativo que es emitido, dependiendo de la altura de la llama, hacia un punto objetivo.

$$F(H) = \frac{1}{\pi A} \tan^{-1} \left(\frac{B}{\sqrt{A^2 - 1}} \right) - \frac{B}{\pi A} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A - 1}{A + 1}} \right) + \frac{BC}{\pi A \sqrt{C^2 - 1}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(C + 1)(A - 1)}{(C - 1)(A + 1)}} \right) \quad (3.11)$$

⁵⁰ en lo que se refiere a arbustos y hojas, que es el combustible disponible en un incendio forestal

donde:

$$A = \frac{2L}{D} \quad B = \frac{2H}{D} \quad C = \frac{A^2 + B^2 + 1}{2A} \quad (3.12)$$

Los parámetros utilizados en las Ecuaciones 3.11 y 3.12, se muestran en la Figura 3.6. Es así como L representa la distancia entre el centro de la llama y la superficie del blanco, D el diámetro de la llama y H la altura de esta misma.

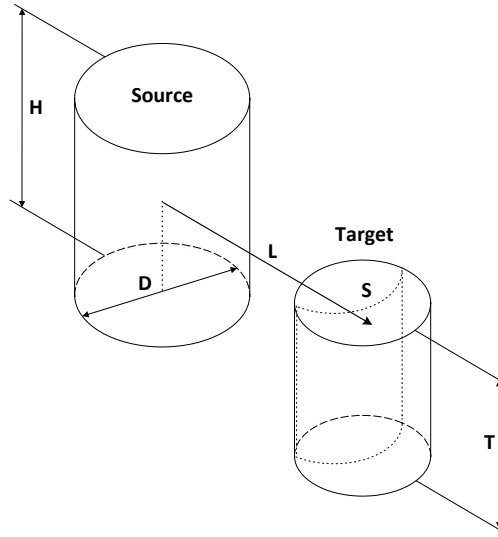


Figura 3.6: esquema de la radiación siendo emitida por una llama sólida y recibida a su vez un blanco cilíndrico.

Entonces, la radiación total emitida será la integral del flujo de calor radiativo sobre la superficie Ω . Esto se traduce en lo siguiente:

$$\phi_{ij} = \int_{\Omega} (\text{sign}(H - z) F(|H - z|) + \text{sign}(z) F(|z|)) ds \quad (3.13)$$

Hay que poner especial atención en que las contribuciones que reportará la función $F(H)$ han sido separadas en dos partes. Esta división responde a si la porción de la llama se sitúa por sobre el punto de integración, o por el contrario, bajo este mismo. Además, esto garantiza una correcta distribución para los casos en que ambos elementos se encuentran a diferentes alturas (caso en que una pendiente es impuesta al terreno).

Usando las expresiones ya mencionadas, se puede estimar la radiación recibida por

un blanco puntual ubicado a una cierta distancia. Sin embargo, evidentemente la copa de un árbol es mucho más que sólo un punto. Debido a que la copa también es representada como un cilindro, será necesario además integrar por toda el área de su manto. Con el fin de reducir el tiempo computacional y simplificar de alguna manera la formulación del modelo, se tomará como receptora a la superficie que se puede apreciar en la Figura 3.6. En ella se puede ver que el arco S es una porción de la circunferencia de radio L , por lo cual dicha distancia es ortogonal. Dado lo anterior, sólo será necesario calcular la radiación recibida por un punto y replicar ese valor multiplicándolo por el largo del arco S :

$$S = 2L \left(\pi - 2\cos^{-1} \left(\frac{R}{2L} \right) \right) \quad (3.14)$$

Siendo R el radio del cilindro objetivo, o sea, la copa del árbol. Finalmente, se ha de integrar a través de toda la altura (T) de dicho cilindro objetivo para poder determinar la totalidad de la radiación recibida. Este último paso es posible hacerlo numéricamente.

3.3.3. FRACCIÓN RADIATIVA

El parámetro r es la porción de energía radiativa proveniente del flujo de calor liberado. Esta variable, también tratada en la literatura como fracción radiativa (cuya simbología clásica es χ_r), es la energía que se transforma efectivamente en radiación. Teóricamente, este valor corresponde a [54]:

$$\chi_r = \frac{\dot{q}_r}{\dot{q}_c} = \frac{4\pi \int_0^\infty \dot{q}'(z) dz}{\dot{m} H_m} \quad (3.15)$$

En donde $\dot{q}_r$ es la potencia radiativa de la llama, la cual es expresada como una potencia radiante por unidad de altura ($\dot{q}'(z)$), que se libera por todo el elemento. Por su parte, $\dot{q}_c$ es el ratio de liberación de calor por combustión, el cual puede ser calculado como el producto del flujo másico de combustible ($\dot{m}$) y el calor de combustión por unidad de masa (H_m).

Usualmente, r es un parámetro que depende de diversas variables, como lo pueden ser: el tipo de combustible, su estado (referente al estado de la materia en que se encuentre: sólido, líquido o gaseoso), la intensidad de la llama (específicamente el rango del flujo de calor liberado), entre otros. Esta variabilidad no es menor, estando acotado a un rango de

0,1 ~ 0,5 en la mayoría de los casos (ver Figura 3.7).

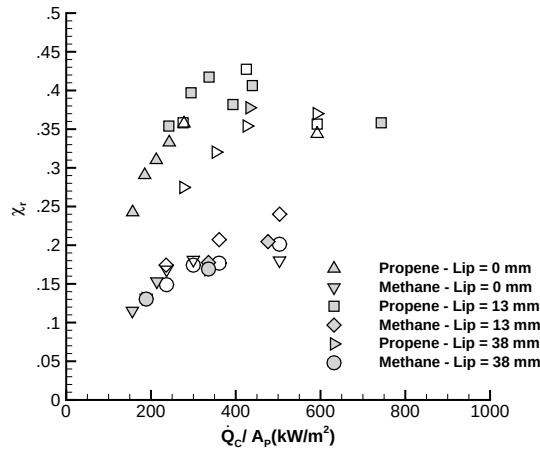


Figura 3.7: gráfico en el cual se ve la relación que existe entre la fracción radiativa de la combustión completa de diferentes compuestos, y el flujo de calor liberado por unidad de área. En particular, los datos fueron obtenidos de un *pool fire*, en el cual se hace la distinción de diferentes alturas de borde del recipiente (*lip*). Finalmente, los símbolos vacíos corresponden a un radio de *pool* igual a 0,19 m, en tanto los símbolos rellenos (grises) poseen un radio de 0,38 m.

Para la presente investigación, debido a que en la literatura no se cuenta con una base de datos acabada para esta variable, se trabajará con el valor que utiliza por defecto el programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS)⁵¹. Este corresponde a $r = 0,35$ según el manual de usuario [64], ya que es un valor representativo entre los datos conocidos. Esto toma en cuenta de que el combustible presente en un bosque es una mezcla de diferentes compuestos. Por ejemplo, el metano presenta una fracción radiativa de $r_{CH_4} = 0,2$, el valor del heptano corresponde a $r_{C_7H_{16}} = 0,4$, así como otros hidrocarburos pesados poseen también esta misma fracción radiativa ($r = 0,4$). Cabe decir que en la literatura ya hay precedentes del uso del valor seleccionado en el presente estudio ($r = 0,35$) [65, 66]. Sin perjuicio de lo anterior, esto puede ser cambiado si se estima conveniente: dado un combustible que cuente con información más detallada acerca del valor de r idóneo, dicha modificación ayudará a representar más fielmente dicha instancia.

⁵¹ programa desarrollado por el NIST (National Institute of Standards and Technology) para simular mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD por su sigla en inglés) diversas configuraciones de combustión

3.3.4. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

El último término presentado en el lado derecho de la Ecuación 3.9 (C_i), acusa relación con la habilidad del sitio para absorber energía en la medida que tenga material combustible remanente. Esto quiere decir que a medida que la cantidad de masa consumida aumente, la capacidad existente para absorber energía disminuirá. Es así como el *burning rate*⁵² es proporcional al combustible restante en el sitio, considerando que para esta modelación el combustible disponible se encuentra mayoritariamente en la copa del árbol.

Finalmente, si se reemplazan los términos estudiados en esta sección en la Ecuación 3.9, se tiene que el *burning rate* para el sitio i , expresado en un periodo infinitesimal es:

$$\frac{dC_i}{dt} = C_i \frac{dC_i}{dt} (r \phi_{ij} h_c m_j^0 \eta) \quad (3.16)$$

Es sencillo ver que el término del lado derecho de la ecuación anterior es independiente de la evolución del sitio i . Es más, sólo depende de los parámetros *inputados* al modelo, como lo son: la masa de combustible, la fracción radiativa, el factor de forma (distancias, tamaños de los cilindros, etc.), el poder calorífico, entre otros aspectos. Es por ello que se agruparán en un solo término: W_{ij} , para dar una mayor sencillez a la nomenclatura. Explícitamente, este valor será calculado como:

$$W_{ij} = r \phi_{ij} h_c \frac{m_j^0}{m_i^0} \frac{\ln(1/C_i^{th})}{h_i} \quad (3.17)$$

El parámetro W_{ij} es altamente sensible a la distancia que exista entre los sitios i y j , así como a la diferencia de altura (dz) existente. En la Figura 3.8 se puede apreciar el comportamiento en un rango de valores. La influencia de la radiación decae rápidamente cuando existen grandes distancias, mostrándose muy sensible respecto a este valor. Con ello se concluye que una distancia razonable para situar los árboles en el bosque es de 5 m, ya que a contar de los 10 m la radiación no es capaz de lograr alcanzar el umbral que da lugar a la ignición (considerando un terreno plano). Esto se ve reforzado si se piensa en el efecto obstructivo que tienen los otros árboles existentes entremedio del emisor y receptor de la radiación. Por otra parte, la diferencia de altura también tiene un rol importante. Cuando

⁵² propiedad descrita en la Sección 3.1.2

existe una pendiente en el terreno, este parámetro incrementa la radiación que se recibe desde lugares más bajos, ayudando a que la propagación evolucione hacia arriba en el mallado.

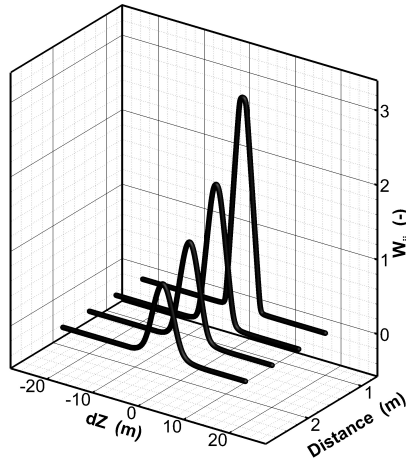


Figura 3.8: gráfico en el cual se puede apreciar el impacto que tiene la distancia y la diferencia de altura (dz) al momento de evaluar diferentes factores de formas.

Será en este parámetro, de naturaleza principalmente geométrica ⁵³, donde yace la dependencia que tiene la propagación en cuanto a cómo se dispone el terreno del bosque. W_{ij} relaciona dos superficies cilíndricas que se orientan verticalmente, por lo cual tendrá su *peak* cuando ambas estén centradas en la misma dirección. En tanto, la superficie que represente la llama se genera a partir de algún nivel dentro de la copa del árbol, beneficiando la propagación hacia cualquier superficie que se encuentre ligeramente más arriba. Además, esto provocará un decremento en el flujo radiativo hacia las superficies más alejadas del centro de la llama. Este es el comportamiento esperado que dirigirá al modelo en cuanto a la evolución de su propagación, siendo efectivamente dependiente de las relaciones de altura existente entre los sitios.

Volviendo a la Figura 3.8, el decaimiento cuadrático que se aprecia permitirá desestimar la interacción con los sitios que se encuentren excesivamente alejados. Esto mantendrá el número de arcos entre nodos de la red en una cantidad relativamente pequeña, sin poner el peligro la significancia de la zona de influencia.

⁵³ se caracteriza de esta manera debido a que es altamente sensible al factor de forma ϕ_{ij} , de donde proviene los variables de distancia y diferencia de altura entre los sitios

3.4. IGNICIÓN

En esta sección se abordará la ignición, instancia que precede al proceso de incineración propiamente tal de la copa de un árbol. Se habla de que la combustión propiamente tal del sitio sucede después de este hito, sin descuidar el aspecto de que el sitio puede ya haber perdido masa debido a la generación de gases de pirólisis en la fase de pre-calentamiento ⁵⁴.

Sin embargo, llegar a la ignición no es algo que ocurra inmediatamente después de que un árbol ha interactuado con otro que ya se esté quemando. Para que esto sea posible, primero el sitio ha de absorber una cierta cantidad de energía en un periodo determinado de tiempo, lo cual eventualmente permitirá generar la cantidad mínima necesaria de gases de pirólisis. En la Figura 3.9 se puede apreciar que en un comienzo la pérdida de masa es pequeña (debido a la formación de gases de pirólisis en el pre-calentamiento), hasta que el árbol alcanza la ignición y empieza la combustión propiamente tal, acelerando el proceso de degradación de manera importante.

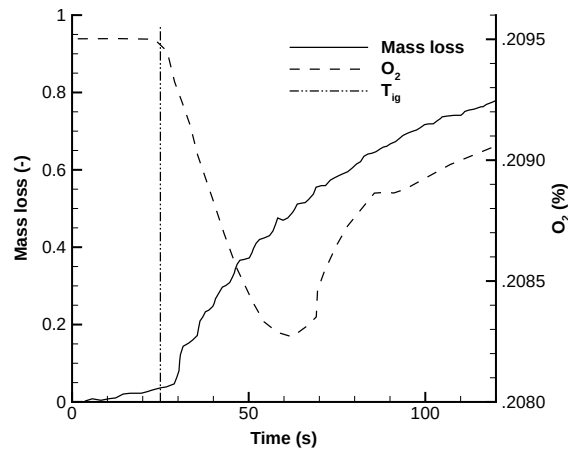


Figura 3.9: gráfico en el que se muestra la evolución de algunos parámetros relevantes a medida que el árbol va degradándose: tiempo de ignición, índice de O₂ y pérdida de masa. El flujo radiativo al cual fue sometido el árbol de dicho estudio (*Maritime Pine*) fue de 30 kWm^{-2} .

Como se mencionó en la Sección 3.3, en general la ignición de un combustible sólido muestra una fuerte dependencia en el flujo de dichos gases. Así también, se puede relacionar con un tiempo característico que ha de transcurrir antes de poder llegar al punto donde

⁵⁴ lo que lleva al umbral de *burning rate*, asociado al parámetro C_i^{th}

ocurre la ignición.

El hecho anterior tiene especial relevancia debido a que presenta un comportamiento inversamente proporcional con el flujo de calor crítico. En la literatura se pueden encontrar diversos arreglos experimentales que investigan esta relación, mostrando que el comportamiento que siguen dichas variables obedece a una función potencial negativa [53]. Como se puede ver en la Figura 3.10, si el flujo radiativo es demasiado pequeño el tiempo de ignición aumenta hasta el infinito, lo cual implica que la ignición no ocurre. Con ello se puede asumir que la verdadera razón por la que ocurre la ignición, tiene relación con el flujo radiativo al cual la vegetación es sometida y la intensidad que este posea. Sobre la base del postulado anterior, para la presente investigación se propondrá que el umbral sea establecido en la derivada (con respecto al tiempo) de la masa remanente normalizada, según:

$$\frac{dC_i(t)^{th}}{dt} = C_i(t) \tau \gamma \quad (3.18)$$

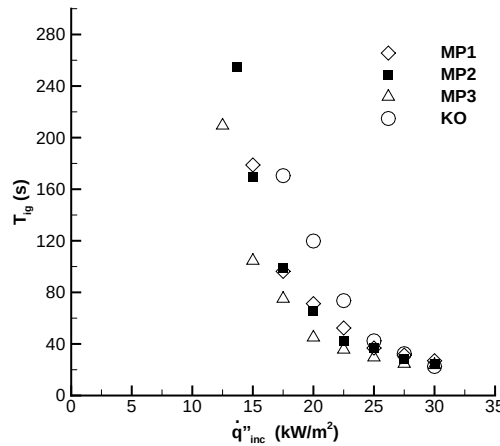


Figura 3.10: gráfico en el cual se registra el tiempo de ignición para diferentes especies vegetales, utilizando para ello un rango de flujos de calor.

Uno de los nuevos parámetros que se aprecian en esta ecuación es τ , que representa al inverso del tiempo crítico que toma el sitio en alcanzar la ignición. Este tiempo efectivamente será el encargado de relacionar la intensidad del flujo (que recibe el sitio en un

periodo de tiempo), con la ignición. Para lograr esto, se evaluará de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{\dot{q}_{crit}'' A_i}{h_c m_i^0} \quad (3.19)$$

En la Ecuación 3.19 se tiene que el flujo crítico ya mencionado es representado por $\dot{q}_{crit}''$, el parámetro A_i corresponde al área del sitio i que recibe la radiación (vale decir, parte del manto del cilindro que representa la copa), h_c es el poder calorífico del combustible y m_i^0 la masa total de combustible que alberga el sitio. En este estudio se calculó el valor de τ para algunos tipos de vegetación (los más comunes en la literatura), llegando a un orden de magnitud de 10^{-4} s^{-1} para el inverso del tiempo crítico.

Volviendo a la Ecuación 3.18, el último parámetro del lado derecho (γ) representa un factor de corrección dentro del modelo computacional. Esto ayudará a asegurar que el umbral sea efectivamente alcanzado, teniendo un valor en el rango de $1,0 \sim 1,1$.

Finalmente, con el fin de comprobar que el modelo propuesto en esta investigación represente el comportamiento anteriormente descrito, diferentes flujos radiativos fueron puestos a prueba. En dichas instancias, el tiempo de ignición fue obtenido para un set de flujos, siendo los datos resumidos en la Figura 3.11. Con esto, se puede aseverar que el modelo refleja el comportamiento esperado: un flujo de calor pequeño implica un mayor tiempo de ignición. Además, si el flujo es demasiado pequeño, en algún punto (si se extrapola la regresión conseguida), el tiempo de ignición es infinito, tal como se vio anteriormente en la Figura 3.9.

3.5. AUTO-DEGRADACIÓN

El proceso de auto-degradación de un árbol toma lugar una vez el punto de ignición ha sido alcanzado. En este proceso, la generación de gases de pirólisis es dirigida por la radiación proveniente del proceso de combustión de la propia vegetación de la copa. Esto es una diferencia importante con respecto al pre-calentamiento, donde la radiación provenía exclusivamente de llamas existentes en los sitios vecinos.

Como se ha visto a lo largo del Capítulo 3, la evolución de la masa de un árbol es un proceso que muestra una lenta evolución inicial, la cual es aún más notoria si la vegetación

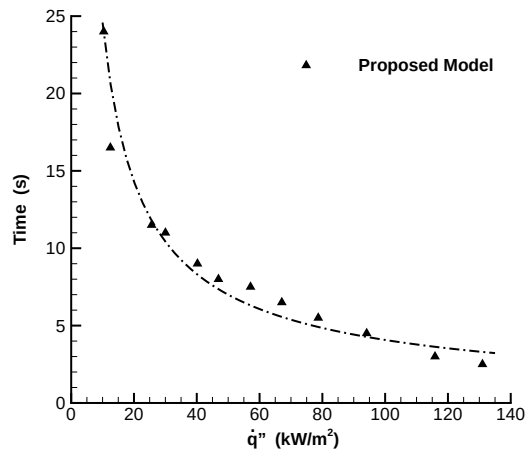


Figura 3.11: gráfico en el que se muestra diferentes tiempos de ignición. Este tiempo es obtenido por medio de la interacción de dos sitios, midiendo la radiación liberada por uno de ellos, hasta que el punto en que el umbral impuesto es alcanzada (en el sitio vecino).

posee un alto contenido de humedad. El proceso prosigue con una aceleración de la pérdida de masa (es en esta etapa intermedia donde alcanza su *peak*), para finalmente volver a desacelerar cuando el combustible ha sido consumido casi en su totalidad.

Experimentalmente se puede apreciar el comportamiento anteriormente descrito. Por ejemplo, Mell et al. realizó el experimento de quemar un árbol de la especie *pseudotsuga menziesii*⁵⁵, incinerándolo de manera aislada a través de un anillo de quemadores (ver Figura 3.12) [67]. Además, él complementó su investigación con simulaciones utilizando WFDS (*Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator*) para comparar los resultados obtenidos.

En este mismo experimento se midió la pérdida de masa durante todo el proceso de combustión, atravesando las tres etapas anteriormente señaladas (ver Figura 3.13). Además, a pesar de cambiar algunos parámetros (tales como la humedad relativa contenida en el árbol, o la altura de este mismo), se puede ratificar inequívocamente que el proceso de degradación es similar en todos los casos, como se concluye en la gráfica de la Figura 3.14.

En la presente investigación se propone la siguiente expresión para representar la masa

⁵⁵ especie común en norteamérica, también conocido como abeto o pino oregón



Figura 3.12: fotografía que muestra el arreglo dispuesto para la quema de un árbol de 2 m de altura. En particular, se destaca el sistema tipo anillo que sirve para producir la ignición de la copa.

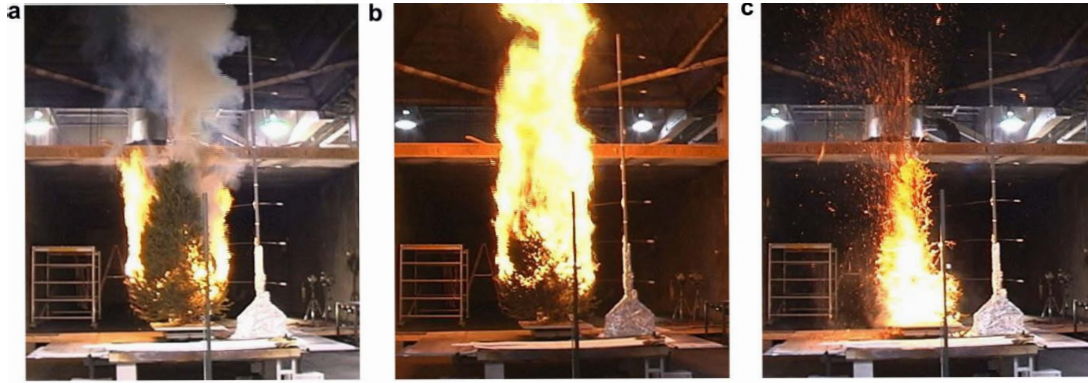


Figura 3.13: las imágenes muestran la evolución característica de la quema de un árbol. En primera instancia la ignición sucede y la llama se propaga hacia arriba. Luego, la copa es rodeada en su totalidad por la llama mientras se quema, ocurriendo el *peak* de rapidez de la pérdida de masa. Finalmente, la llama descende hasta sólo existir en la primera mitad del árbol. Se puede apreciar que el follaje ha sido completamente consumido, quedando sólo las brasas en la copa.

remanente de un árbol que ya se encuentra en llamas:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -C_i(t)(1 - C_i(t)) U_i \quad (3.20)$$

El parámetro U_i hace referencia al tiempo de vida media de un árbol que se degrada de manera aislada, vale decir, sin recibir radiación de ninguna otra fuente más que de la propia llama que este genera. En la Sección 4.3.1 se puede ver una comparación hecha entre los resultados que genera el modelo propuesto y los obtenidos por Mell et al. en la investigación ya citada.

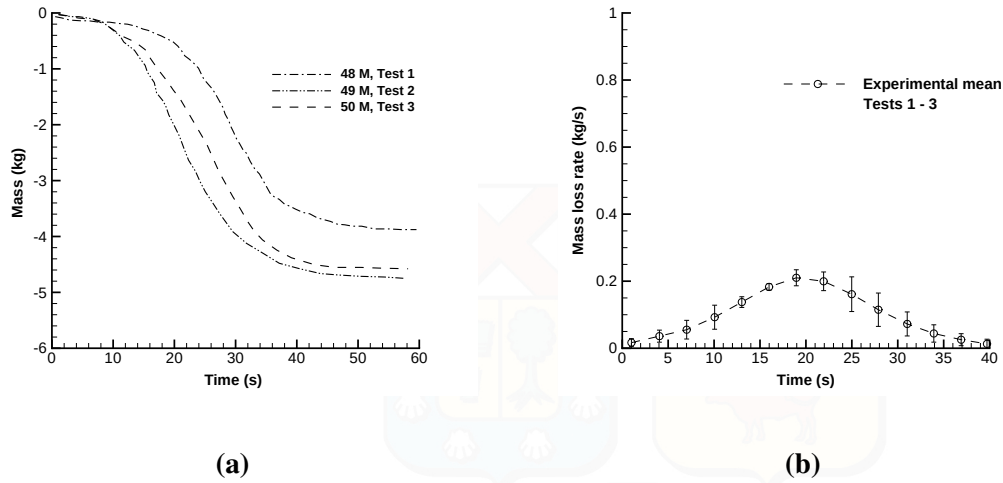


Figura 3.14: (a) Resultados del experimento hecho por Mell et al., en el cual se registra la degradación de un árbol de 2,4 m de altura, con distintos contenidos de humedad (48 %, 49 % y 50 %). (b) Se muestra la derivada de la degradación, vale decir, el *burning rate* promedio para las tres pruebas realizadas. Las líneas verticales representan la desviación estándar del total de datos recopilados.

3.6. DINÁMICA DE PROPAGACIÓN

Finalmente, queda por definir de manera explícita la forma en la cual ocurrirá la propagación del incendio. Para ello, se establecerá la siguiente expresión:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = C_i(t) \left(F_i \sum_{j \in J} \frac{dC_j(t)}{dt} W_{ij} - \Theta \left[-\frac{dC_i(t)}{dt} - C_i(t) \tau \gamma \right] (1 - C_i(t)) U_i \right) \quad (3.21)$$

Esta ecuación reúne todas las consideraciones hechas previamente. El primer término del lado derecho corresponde a la degradación que ocurre dada la radiación proveniente de sitios cercanos. Es a estos mismos a los que se les trata con el subíndice j , definiendo el conjunto de sitios vecinos (J) correspondiente. Además, en esta parte se incluye el ya mencionado factor W_{ij} que ayuda a relativizar el peso que tiene la interacción. Asimismo, el factor de atenuación F_i responde a la necesidad de tomar en consideración la capacidad de absorción de la copa del árbol.

El segundo término de la Ecuación 3.21 posee una expresión que no se ha visto antes en este estudio, la función *Heaviside*⁵⁶(Θ). Si el valor del argumento de esta función es

⁵⁶ también conocida como función de escalón unitario

negativo, la función arroja un valor igual a cero. En caso contrario, se evalúa como uno. Para el caso particular de este trabajo, el argumento que está inserto en la función *Heaside* corresponde al umbral que permite discernir si se ha alcanzado el umbral de ignición. Si la instancia de que la función Heaviside se active, la expresión que queda a su derecha corresponde a la auto-degradación del sitio, ya vista en la Ecuación 3.20. Un resumen de los diversos aspectos tomados en cuenta se presentan en la Figura 3.15.

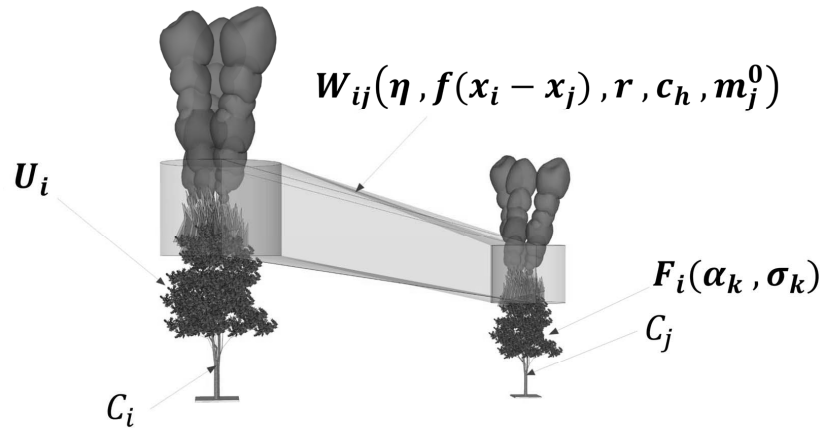


Figura 3.15: esquema que muestra los diferentes factores que se han modelado para estar presentes en el fenómeno de propagación.

3.7. CONSIDERACIONES NUMÉRICAS

Desde un punto de vista computacional, el sistema de ecuaciones que se genera al tener la Ecuación 3.21 para cada uno de los sitios, se resuelve usando un programa con orientación a objetos. En este código se crea una clase “sitio” que posee todos los campos necesarios para almacenar la información relevante, tal como: posición (eje coordenado), número correlativo para identificar el sitio, cantidad de combustible, radiación recibida anteriormente ⁵⁷, el conjunto de vecindad que el sitio posee, entre muchos otros.

Ahora bien, en cuanto a la aproximación numérica implementada para calcular la

⁵⁷ para ser preciso, se guarda la información de dos pasos temporales anteriores

degradación de un sitio (mediante la resolución de la ecuación diferencial ya presenta), se optó por el método predictor-corrector ⁵⁸ de *Adams-Bashforth* de orden 3. Una de las ventajas que entrega este método es que no necesita la información de la radiación que es recibida en el mismo paso temporal en el que se resuelve la ecuación diferencial. Este punto es de suma importancia, debido a que esta radiación es calculada mediante la pérdida de masa actual de otros sitios, que a su vez requerirían esta misma información.

En el método de *Adams-Bashforth* de orden 3 se tiene la siguiente nomenclatura:

$$y' = g(x, t) = G(t) \quad (3.22)$$

Donde claramente la función $G(t)$ representa la cantidad normalizada de masa remanente en un sitio dado, en el tiempo t . Luego, se define lo siguiente:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} (3G_n - G_{n-1}) + O(h^3) \quad (3.23)$$

Aquí h representa el paso temporal en el cual se va resolviendo la ecuación diferencial. Asimismo, se puede ver fácilmente la necesidad de guardar la información de los dos pasos temporales anteriores. Finalmente, recalcar que este método posee un error local de orden 3 (de ahí su nombre), dado que la función de error es cúbica. Se considera que el grado de precisión es suficientemente bueno, siendo innecesario recurrir a un orden mayor de error.

⁵⁸ también conocidos con el nombre de métodos multipasos

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se presentan los resultados que entrega el modelo cuando es aplicado en diversos escenarios. Para ello se realizó un experimento (simulación) con un arreglo de cuatro árboles, el cual se dispuso en primera instancia en un terreno plano, para luego inclinar el mallado imponiendo una cierta pendiente. Con ello surgen diferencias en la propagación, las cuales se discuten e intentan comprender sobre la base del funcionamiento del modelo. Además, se profundizó acerca de que tan capaz es el modelo de recrear la realidad de un incendio forestal.

Por otra parte, también se presenta el estudio del comportamiento de las métricas más importantes de un incendio: ROS, área quemada y tiempo de percolación. Esto se logra en la medida que dentro de un mismo bosque se hagan variar algunos parámetros, tales como la pendiente del terreno (α) o la densidad de ocupación (ρ) impuesta.

Posteriormente se incluye un estudio acabado de los parámetros que se han incorporado en el presente trabajo. Debido a la gran cantidad de ellos, se han dejado de lado aquellos que ya poseen una descripción detallada en la literatura, privilegiando los que fueron concebidos en la presente investigación. En primer lugar se tiene la constante de proporcionalidad (η), también el inverso del tiempo crítico (τ) y el tiempo de vida media (U_i). A este conjunto se le sumará la fracción radiativa (r), debido a que la elección del valor utilizado fue el provisto como *default* en otras investigaciones ⁵⁹. Dicho estudio contempla un análisis

⁵⁹ recordar que existe la carencia de información con respecto a este parámetro cuando se trata de vegetación real, y no un “combustible puro” como el metano, etileno, entre otros

estático y dinámico de los efectos que tiene este grupo de *inputs* sobre la velocidad de propagación (ROS) del incendio forestal.

Finalmente, se abordará un tema crucial al momento de evaluar la pertinencia del modelo propuesto: las validaciones experimentales. Para esto se eligieron tres escalas diferentes, siendo seleccionadas aquellas que contaran con una descripción lo más detallada posible de los parámetros necesarios para el modelo. En primera instancia se muestra un tamaño de escala laboratorio, en el cual se realizan dos pruebas: un arreglo en un túnel de viento (en el cual se dispuso un *fuel bed* de agujas de pino como combustible) y la quema de un árbol en solitario. En segundo lugar, se presenta la simulación en un terreno de extensión media, aproximadamente 100 m^2 (contando como material combustible pasto natural). Para concluir se aborda un mega incendio, con el fin de poder tener a disposición la simulación en una escala forestal y poder dimensionar el potencial del modelo para ser utilizado en situaciones reales.

4.1. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Para las pruebas computacionales se decidió utilizar una serie de parámetros uniformes, los cuales se especifican a continuación:

- Altura de la llama: $H = 4,2\text{ m}$
- Altura de la copa: $T = 3,0\text{ m}$
- Diámetro de la llama: $D = 1,5\text{ m}$
- Diámetro de la copa: $R = 1,5\text{ m}$
- Distancia entre sitios: $L = 5\text{ m}$
- Paso de tiempo: $h = 0,5\text{ s}$
- Constante de proporcionalidad: $\eta = 5\text{ }\mu\text{J}^{-1}$
- Inverso del tiempo crítico: $\tau = 1.800\text{ }\mu\text{s}^{-1}$

- Tiempo de vida media: $U_i = 9,5 \text{ s}$
- Fracción radiativa: $r = 0,35$
- Poder calorífico: $h_c = 12.000 \text{ kJkg}^{-1}$
- Masa inicial de combustible: $m_i = 16 \text{ kg}$
- Fracción de volumen de combustible: $\alpha_k = 0,023$
- Relación superficie/volumen: $\sigma_k = 5.950 \text{ m}^{-1}$

En general, los valores seleccionados para cada uno de los parámetros han sido discutidos en sus secciones correspondientes (ver Capítulo 3), en donde se puede revisar de manera más precisa la fuente de la cual se han obtenido los datos. No obstante lo anterior, una gran parte de ellos se pueden encontrar en la recopilación de estos tres artículos de divulgación científica [55, 56, 68].

4.1.1. SIMULACIÓN DE CUATRO SITIOS

Según el diseño propuesto, la primera instancia corresponde a la configuración de cuatro sitios, en la cual uno de ellos comenzará estando encendido. A medida que pase el tiempo, la radiación que produzca este logrará encender a los otros y la dinámica proseguirá. En la Figura 4.1 es posible identificar las dos disposiciones que serán puestas a prueba. El primer caso considera cuatros sitios que se encuentran equidistantes unos de otros, lo que supone un arreglo simétrico en un terreno plano (elementos grises). Mientras tanto, la segunda configuración posee una elevación del terreno igual a $\alpha = 20^\circ$, lo que rompe la simetría impuesta al esquema anteriormente, dejando dos sitios en una posición más elevada (sitios de color blanco). La Figura 4.2 resume el proceso de degradación para los 4 sitios, en ambas configuraciones. A continuación se discutirá acabadamente cada una de dichas instancias.

Terreno plano

La simulación comienza con el sitio 1 encendido. Esto se logra activando la función *Heaviside* Θ de la Ecuación 3.21 en el tiempo $t = 0 \text{ s}$. En un comienzo, sólo el sitio 1

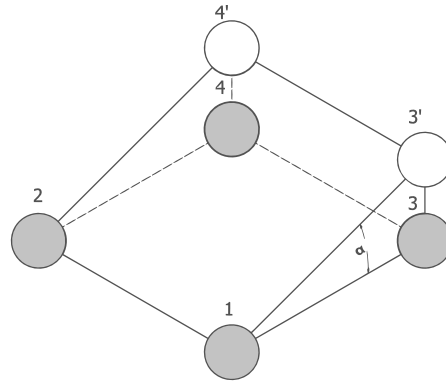


Figura 4.1: representación del esquema utilizado para el estudio sobre la interacción de cuatro sitios. Dos casos son considerados: un terreno plano y una superficie inclinada ($\alpha = 20^\circ$).

libera energía, permitiendo la degradación de los sitios 2, 3 y 4. Una vez que el umbral de ignición ⁶⁰ es alcanzado en los sitios 2 y 3, estos se encienden. Este proceso ocurre de manera simultánea, por lo cual la evolución de la masa remanente normalizada $C_i(t)$ de este par de sitios es idéntica (ver Figura 4.2). Además, se puede apreciar que la auto-degradación de un sitio contribuye al proceso de degradación de sus vecinos, incrementando la tasa de pérdida de masa de estos (en otras palabras, su derivada es mayor). Este fenómeno se debe a que a medida que incrementa el *burning rate* de un sitio, este libera una mayor cantidad de energía en forma de radiación, lo que conlleva a que su vecindad tenga la posibilidad de absorber más calor, resultando en el ya mencionado aumento en la rapidez de degradación de estos sitios.

Terreno inclinado ($\alpha = 20^\circ$)

Para el caso en el cual una pendiente es impuesta a la configuración inicial, los sitios 3 y 4 se elevan por sobre los sitios 1 y 2. Nuevamente es el sitio 1 al que se le imputa la condición de estar encendido en el tiempo $t = 0$ s. Sin embargo, esta vez el sitio 3 (posicionado arriba) logra llegar a la ignición antes que el sitio 2, rompiendo la simetría en el comportamiento anteriormente visto. Un poco después el sitio 2 se enciende y finalmente hace lo propio el sitio 4.

⁶⁰ recordar que este valor se asocia con la rapidez de degradación, $\frac{dC_i(t)}{dt}$

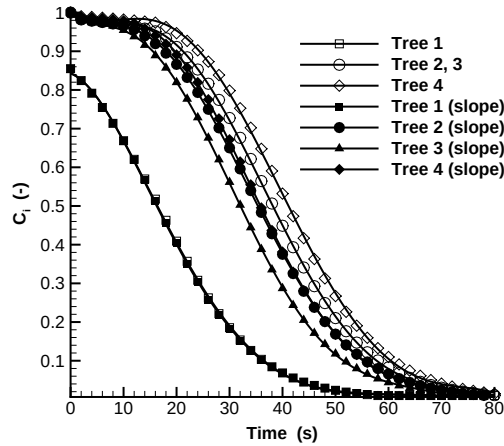


Figura 4.2: gráfico en el que se muestra la evolución de la masa remanente normalizada $C_i(t)$ para todos los sitios, en ambas configuraciones.

Por otra parte, se puede observar algo interesante si se analizan los *burning rate* de esta nueva configuración con terreno inclinado. En la Figura 4.3 se muestra la evolución de la derivada para todos los sitios en este escenario. En él se ve claramente el aumento drástico que sufre la degradación una vez que se llega al umbral de ignición, que es exactamente cuando la función Θ es activada. Además, se puede apreciar que durante el proceso de combustión llega un punto en el que la rapidez de degradación del sitio 4 sobrepasa a la del sitio 2. Esto sucede debido a que el sitio 4 recibe radiación proveniente del sitio 3, que se encuentra a su misma altura, y de los sitios 1 y 2, los cuales se encuentran por debajo de él. En este último caso, se espera que el factor de forma geométrico ϕ_{ij} sea mayor, lo cual aumenta el total de radiación incidente. En oposición, el sitio 2 recibe radiación horizontal sólo del sitio 1. Mientras que desde los sitios 3 y 4, que se encuentran por encima de él, la radiación total incidente disminuye dramáticamente dado a que el ángulo que relaciona ambas superficies ya no es cero, lo que resulta en que el valor que adopta ϕ_{ij} sea menor.

Finalmente, otro punto a destacar es la diferencia que surge al comparar la rapidez de degradación de los sitios en los distintos *setup*. Al imponer una pendiente, en este caso de $\alpha = 20^\circ$, un interesante comportamiento salta a la luz: los sitios se degradan con mayor rapidez que en un terreno plano. Esto es importante, y será puesto a prueba en una configuración de mayor tamaño en la Sección 4.1.2, para ver qué ocurre y cómo afecta la

pendiente en la propagación.

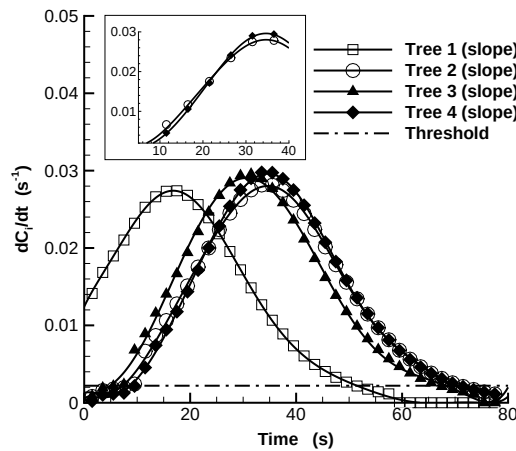


Figura 4.3: gráfico en el cual se muestra la tasa de degradación de los cuatro sitios para el escenario con pendiente.

4.1.2. COMPORTAMIENTO CON PENDIENTE

En esta ocasión se ha dispuesto un *layout* de 251 sitios por lado (malla cuadrada), por lo que el bosque está compuesto por un total de 63.001 sitios. La densidad de ocupación es de $\rho = 0,95$. Además, se ha dispuesto que el punto de ignición estará en el medio de la malla, con el fin de poder apreciar de mejor manera cómo afecta cualitativamente la pendiente del terreno. Lo anterior dado que se esperan encontrar dos casos diferentes de frentes de fuego: un *forward-fire* que se propague subiendo la pendiente y un *back-fire* en dirección contraria, como se vio en la Sección 2.3.1.

La Figura 4.13 entrega los resultados obtenidos. Las imágenes se obtuvieron a intervalos de 500 s (por razones obvias se omitió el tiempo inicial $t = 0$ s). En primer lugar, notar que las imágenes del tiempo $t = 1.000$ s se ratifica lo mencionado en la Sección 4.1.1, en la cual queda de manifiesto que el modelo es capaz de representar lo que ocurre en la realidad: el avance del fuego es más rápido cuando sube una pendiente que en una situación de terreno plano. Es más, como se observa luego en el tiempo $t = 1.500$ s (tercera fila de la Figura 4.13), el avance del fuego es más lento al bajar la pendiente, lo que resulta en un *back-fire* en toda regla. Además, geométricamente se obtiene la conocida forma de

elipse. En particular, para lograr una excentricidad ⁶¹ aún más notoria, la pendiente ha de pronunciarse aún más, con el fin de que el patrón del incendio tenga una forma alargada.

4.1.3. MÉTRICAS IMPORTANTES

En esta sección se aborda el estudio computacional hecho para ver el comportamiento de las métricas más relevantes en un incendio forestal: rapidez de propagación (ROS), área quemada y tiempo total.

En términos generales, se mantuvo la malla utilizada en la prueba de la Sección 4.1.2. Esto incluye la geometría para describir a las copas de los árboles y la cantidad de sitios en el bosque. Sin embargo, se decidió cambiar la forma de comenzar el incendio y reemplazarla por una línea de encendido en lugar de un solo punto. Esta línea se sitúa al principio del bosque (en su parte más baja), de manera que el incendio escale por la pendiente. Este método presenta tres ventajas fundamentales, las que se enuncian a continuación:

- La probabilidad de que exista algún sitio con vegetación al encender una línea es mucho mayor que si sólo se toma un punto. En caso de no existir vegetación disponible, se provocaría un desacople en la aleatoriedad de la ocupación del bosque, replicándose este problema cuando las probabilidades de ocupación (ρ) sean bajas.
- Si la cantidad de sitios activos ⁶² al comienzo de la simulación es mayor, la percolación del incendio será mucho más probable. Esto es importante debido a que es una característica deseable para el modelo, sobre todo si se quiere profundizar otras propiedades del fenómeno en estudios futuros.
- El tiempo de cálculo disminuye, dado que sólo hay que chequear el extremo opuesto al cual se impuso la línea de ignición (que es una de las posibles opciones para dar por finalizado la simulación del incendio). En contraste, cuando se trata de un sólo punto de ignición ubicado en el centro hay que comprobar las cuatro fronteras del

⁶¹ en geometría euclidiana, la excentricidad de una elipse corresponde a la relación entre la semi-distancia focal y el semi-eje mayor. También denotada como ε , sus valores están acotados entre 0 y 1, siendo una circunferencia la figura que tiene una excentricidad $\varepsilon = 0$

⁶² se denomina como sitio activo a aquel que se encuentra en proceso de combustión (*i.e.* quemándose). Esto proviene del concepto propio del modelo, donde para que un sitio se esté auto-degradando la función *Heaviside* ha de estar activada

lattice. El realizar esta mayor cantidad de operaciones se traduce en el aumento del tiempo de cálculo de dicho proceso iterativo.

Ahora bien, el estudio involucra un total de ocho pendientes diferentes, en el rango de $\alpha = 0^\circ - 35^\circ$. También se consideraron ocho probabilidades de ocupación distintas, en el intervalo de $\rho = 0,60 - 0,95$. El tamaño de muestra asociado a cada probabilidad de ocupación fue de 200 escenarios aleatorios, con el fin de poder generar una instancia representativa para cada uno de los casos. Por ende, este estudio contempla en total 12.800 simulaciones.

No está demás recordar que la densidad de ocupación se distribuye de manera uniforme en todo el *lattice*, tal como ya se mencionó a comienzos de la Sección 3.3.

Finalmente, en la Figura 4.14 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, los cuales serán discutidos a continuación.

Rapidez de propagación (ROS)

Esta métrica muestra un comportamiento prácticamente lineal con respecto a la variación de la pendiente del terreno, como se puede apreciar en la Figura 4.14a. No obstante lo anterior, se puede ver que el efecto que tiene la densidad de ocupación es aún más notorio (aunque igualmente lineal), como muestra la Figura 4.14b.

Por ende, esta métrica posee un comportamiento inequívoco, dando lugar a un análisis simple de los resultados.

Área quemada

El área quemada posee un comportamiento más intrincado que el caso anterior, y ha de ser analizado con más detenimiento. Al variar la pendiente del terreno (ver Figura 4.14c) se aprecia una relación inversa para el caso de una densidad de ocupación baja ($\rho = 0,60 - 0,70$). Esto se traduce en que el área quemada disminuye a medida que aumenta la pendiente del terreno. Además, este comportamiento no es lineal y depende en gran medida de qué densidad de ocupación (ρ) tenga la malla. El resultado obtenido se debe

a las lagunaridades ⁶³ presentes en el bosque, lo que acarrea la existencia de áreas que son inaccesibles para el incendio. En otras palabras, la radiación no es lo suficientemente potente como para desencadenar la ignición.

Luego, para el rango de $\rho = 0,75 - 0,90$ se puede ver que el área quemada abarca prácticamente la totalidad del terreno (más de un 98 %), presentándose insensible a la pendiente α impuesta.

En último término, se encuentra el caso con la mayor densidad de ocupación $\rho = 0,95$. Se puede apreciar que existen dos regímenes (ambos en gran medida insensibles a la pendiente del terreno), cuya transición ocurre cuando la pendiente alcanza los $\alpha = 20^\circ$. Además, el porcentaje de área quemada es ligeramente menor que el alcanzado anteriormente, rondando su valor un 95 %. Esto ocurre debido a una de las condiciones impuestas para que se detenga la simulación, lo que se procederá a explicar a continuación.

Como se vio anteriormente (y se ratificó en las simulaciones realizadas), a medida que la densidad de ocupación aumenta la propagación se hace más rápida. Luego, esto afecta en el cálculo del área total quemada debido a que un sitio se considera consumido (quemado) cuando su masa remanente normalizada $C_i(t)$ es menor al 10 %. Por ende, cuando el incendio llega al extremo opuesto del mallado en un lapso de tiempo muy reducido, aún existen árboles encendidos (*i.e.* que se están auto-degradando) que no son propiamente contabilizados como sitios quemados, no contribuyendo su correspondiente área al cálculo de la métrica.

Finalmente, la Figura 4.14d confirma las conclusiones previas. Se puede notar que para bajas densidades de ocupación, el valor correspondiente al área quemada es más disperso, dependiendo de la pendiente impuesta. Luego, llega un punto $\rho = 0,80$ donde este valor pasa a ser prácticamente constante, independiente de la inclinación que exista en el terreno. En cuanto a la relevancia de esta última variable (α), se recalca el efecto de que a mayor pendiente menor es el área quemada.

⁶³ característica que presentan algunas formas fractales, que denota la porosidad en su distribución (los vacíos que existan)

Tiempo total

En el caso del tiempo total del incendio se puede ver que, al igual que el ROS, posee un comportamiento bastante sencillo de analizar. En la Figura 4.14e puede notarse que cuando aumenta la pendiente del terreno, el tiempo total del incendio ⁶⁴ disminuye lentamente. Sin embargo, cuando se llega a una pendiente de $\alpha = 35^\circ$, se puede ver un ligero aumento en la métrica. Esto podría ser causado por el siguiente *trade-off*: al aumentar la pendiente del terreno, si bien se propicia un mayor valor para el factor de forma geométrico ϕ_{ij} , también no es menos cierto que la distancia entre sitios aumenta ⁶⁵, por lo cual eventualmente el valor de W_{ij} puede no potenciarse, sino por el contrario, reducirse ligeramente.

Continuando con el análisis, se puede apreciar en la Figura 4.14f el mismo comportamiento decreciente a medida que aumenta la densidad de ocupación del bosque. Esto reafirma el comportamiento ya descrito para la rapidez de propagación, dado que estas métricas se encuentran entrelazadas: a mayor rapidez de propagación, el incendio efectivamente percolará más rápido y el tiempo total será menor.

4.2. SENSIBILIDAD DEL MODELO

Si bien el modelo propuesto en esta investigación posee un fuerte respaldo físico y teórico, no hay que olvidar que se trata de una propuesta por sobre todo original (en cuanto a la interacción de sitios). Por ello, se hace necesario el contar con un estudio que logre proporcionar una descripción más detallada sobre la sensibilidad de este.

Con el fin de hacer lo anterior posible, y dada la gran cantidad de variables involucradas, se ha seleccionado tan solo una parte de los parámetros que conforman el modelo. Su elección radica en el respaldo que haya en la literatura, siendo elegidos aquellos que posean una menor información. Para precisar, el grupo de parámetros es el siguiente:

- Constante de proporcionalidad η
- Inverso del tiempo crítico τ

⁶⁴ recordar que esta métrica se obtiene al momento de que suceda la percolación de la malla

⁶⁵ notar que ahora dicha distancia resulta ser la hipotenusa y no el cateto adyacente, al momento de ver el triángulo que se forma entre la pendiente y el terreno inicialmente plano

- Tiempo de vida media U_i
- Fracción radiativa r

Cabe mencionar que los parámetros que no son sensibilizados mantendrán los valores propuestos en la Sección 4.1. Respecto a la configuración dispuesta para este estudio, se contempla un *lattice* de 251 sitios por lado (63.000 en total) en un terreno plano.

Finalmente, la variable de respuesta seleccionada fue la rapidez de propagación del incendio. El argumento de esta elección es que se trata de una variable de interpretación sencilla (a diferencia del área quemada, la cual posee un comportamiento más intrincado). Además, el ROS se relaciona directamente con el tiempo total, razón por la cual el este parámetro se transforma en una métrica representativa (para más detalles, ver la Sección 4.1.3).

4.2.1. ANÁLISIS ESTÁTICO

En primer lugar, esta parte del estudio abarcó el rango de densidad de ocupación comprendido entre los valores $\rho = 0,60 - 0,95$, tal como fue hecho en la Sección 4.1.3. Para cada instancia de ρ , se consideró una muestra igual a 50 configuraciones aleatorias, dando un total de 400 casos.

Por lo demás, para cada una de las cuatro métricas se eligió un total de 5 valores en un determinado rango (se especificará oportunamente en cada sección), lo que da un total de 8.000 simulaciones en este estudio estático de la sensibilidad.

CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD η

Para este parámetro, el rango seleccionado fue de $4 - 12 \mu J^{-1}$, espaciado cada $2 \mu J^{-1}$. Como se puede apreciar en la Figura 4.4, la relación que existe entre el ROS y la constante de proporcionalidad es positiva. Para precisar, la pendiente que se genera al hacer una regresión lineal es de $0,46 ms^{-1}/\mu J^{-1}$, teniendo un coeficiente de correlación cuadrado igual $R^2 = 0,9822$.

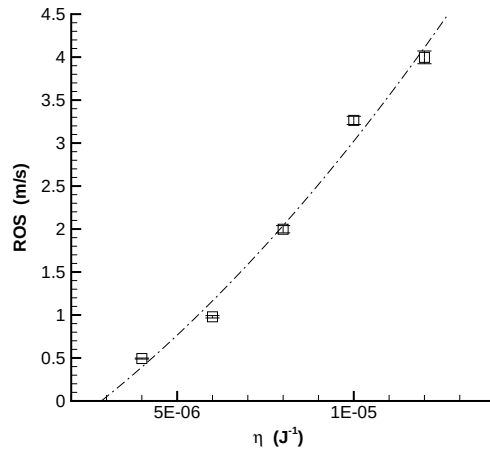


Figura 4.4: gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores de la constante de proporcionalidad η . El error normalizado se presenta para cada *set* de mediciones.

INVERSO DEL TIEMPO CRÍTICO τ

En el caso del parámetro correspondiente al inverso del tiempo crítico, el estudio comprende desde los $1.000 \mu s^{-1}$ hasta los $3.000 \mu s^{-1}$, con evaluaciones cada $500 \mu s^{-1}$. La Figura 4.5 muestra los resultados obtenidos. En este caso, un comportamiento lineal claramente no es la mejor descripción de la relación que hay entre τ y el ROS. Lo que sí queda claro es que el inverso del tiempo crítico posee un efecto negativo sobre la rapidez de propagación.

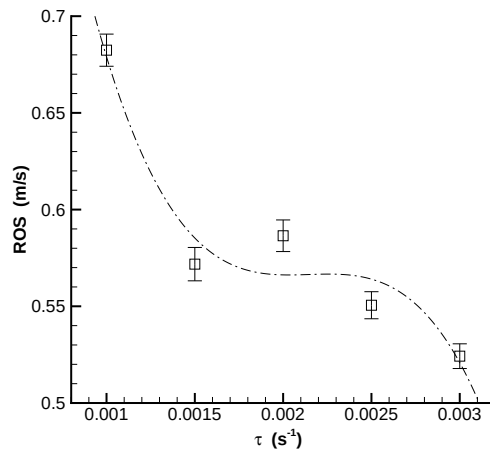


Figura 4.5: gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores del inverso del tiempo crítico τ . El error normalizado se presenta para cada *set* de mediciones.

Si se quisiera describir el comportamiento que posee el ROS ante cambios en τ , una buena alternativa sería representarla mediante una regresión cúbica, la cual entrega un coeficiente de correlación cuadrado de $R^2 = 0,9452$.

No obstante lo anterior, un principio importante al momento de trabajar con gran cantidad de datos es lograr obtener patrones y tendencias, no siendo siempre la regresión con mayor correlación la que explique de mejor forma el fenómeno. Por ende, una segunda revisión podría sugerir la eventual presencia de dos regímenes diferentes.

Siguiendo esta línea, para el régimen que se encuentra bajo $2.000 \mu s^{-1}$ la pendiente que se obtiene corresponde a $-221,24 \text{ ms}^{-1}/s - 1$ ⁶⁶. Luego, para valores superiores a $2.000 \mu s^{-1}$ el comportamiento del ROS es más insensible a cambios de τ (disminuyendo a menos de su tercera parte), teniendo la pendiente un valor estimado de $-62,25 \text{ ms}^{-1}/s - 1$ ($R^2 = 0,9921$).

TIEMPO DE VIDA MEDIA U_i

La vida media posee un rango de estudio que va desde los 5 s hasta los 25 s, siendo evaluado cada 5 s. La elección de tales valores tiene por fundamento el poder hacer extensible el modelo a aquellos casos en que las especies vegetales no posean una copa tan abundante⁶⁷.

Los resultados se muestran en la Figura 4.6. Como se esperaba, el comportamiento que muestra el ROS ante un aumento del tiempo de vida media es negativo, vale decir, al disminuir la tasa de auto-degradación el avance del incendio se ralentiza. Por lo demás, una función de tipo potencial es la más adecuada. La pendiente que resulta al efectuar dicha regresión es de $7,57 \text{ ms}^{-1}/s$, teniendo el exponente un valor de $-1,109$ (el ajuste es notablemente alto, $R^2 = 0,9908$).

FRACCIÓN RADIATIVA r

El último parámetro estudiado corresponde a la fracción radiativa, que posee valores dentro del intervalo $r = 0,27 - 0,35$. El estudio se realizó con un aumento en el parámetro igual a 0,2 para cada instancia. En la Figura 4.7 se pueden apreciar los resultados arrojados por el

⁶⁶ la correlación es perfecta al tratarse de dos puntos, $R^2 = 1,00$

⁶⁷ en términos de combustible disponible

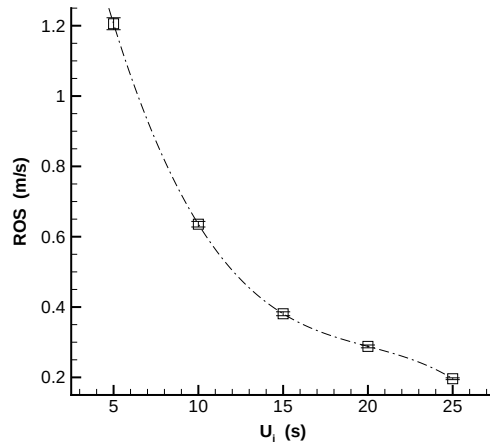


Figura 4.6: gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores del tiempo de vida media U_i . El error normalizado se presenta para cada *set* de mediciones.

modelo.

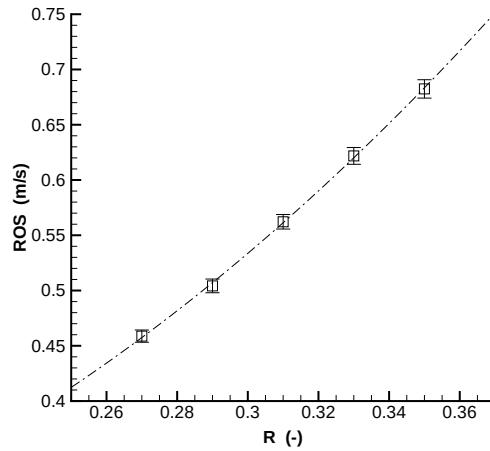


Figura 4.7: gráfico que muestra la variación del ROS con respecto a diferentes valores de la fracción radiativa r . El error normalizado se presenta para cada *set* de mediciones.

Nuevamente los resultados se condicen con la física impresa en el modelo: la relación entre la fracción radiativa y la rapidez de propagación es positiva. Se puede ver que dicha relación se comporta de forma lineal, con una tasa de cambio igual a $2,82 \text{ ms}^{-1}$, mostrando un coeficiente de determinación igual a $R^2 = 0,9973$. Esto sustenta el siguiente hecho: a medida que se permite que una mayor parte de la energía liberada se transforme en

radiación, los sitios vecinos que la absorben alcanzarán con mayor facilidad sus respectivos umbrales de ignición. Esto se traduce en una mayor rapidez de propagación del incendio.

4.2.2. ANÁLISIS DINÁMICO

Con el fin de corroborar las relaciones obtenidas en la Sección 4.2.1, se decidió implementar un análisis de sensibilidad dinámico. Para ello, se utilizó el método probabilístico ⁶⁸ de Monte Carlo [69] sobre el mismo set de prueba utilizado en el análisis estático. Las características de dicho grupo de parámetros fue la siguiente:

- Constante de proporcionalidad: $\eta \sim \mathcal{U}(5; 20) \mu J^{-1}$
- Inverso del tiempo crítico: $\tau \sim \mathcal{U}(500; 1.800) \mu s^{-1}$
- Tiempo de vida media: $U_i \sim \mathcal{U}(5; 20) s$
- Fracción radiativa: $r \sim \mathcal{U}(0,25; 0,35)$

Cabe mencionar que el *lattice* utilizado se mantuvo, vale decir, corresponde a un terreno plano de 251 sitios por lado (63.001 sitios en total). Asimismo, nuevamente los parámetros que no forman parte del estudio han sido seteados a los valores estándar de este trabajo, ya presentados en la Sección 4.1. Por último, y con el fin de no dar una mayor variabilidad al estudio, se impuso una densidad de ocupación de $\rho = 0,95$ (evitando la aparición de lagunaridad).

Para el análisis de los resultados se procedió a generar una regresión multivariable, la cual posee como variables exógenas al grupo de parámetros ya descritos. Asimismo, el ROS se presenta como la variable endógena (de respuesta). Se ha de mencionar también que la data recolectada es utilizada para construir un modelo lineal, el cual no incluye los comportamientos observados en la Sección 4.2.1, tales como la función potencial y la función por tramos (para el inverso del tiempo crítico y el tiempo de vida media, respectivamente).

En primera instancia, se realizaron un total de 100 simulaciones. En este caso, los detalles de la estadística del modelo se muestran en la Tabla A.4, poseyendo un coeficiente

⁶⁸ no determinístico

de determinación igual a $R^2 = 0,9666$. Como se puede apreciar, según el estadístico F ⁶⁹ el modelo es significativo. Los resultados de los coeficientes asociados a cada parámetro se resumen en la Tabla A.5. Este análisis sugiere que sólo los parámetros η y U_i son significativos para el modelo (ver *P-value*), tomando un valor de significancia estándar (0,05). Si bien queda de manifiesto que r no se encuentra lejos del umbral, el inverso del tiempo crítico no corre la misma suerte (su valor de 0,60 se encuentra muy alejado del *P-value* máximo).

Con el fin de poder decir a ciencia cierta si los indicios de significancia encontrados en la anterior muestra son verdaderos, se procedió a incrementar el número de simulaciones hasta completar un tamaño de muestra igual a 1.000. Gracias a esto se puede contar con un criterio cuantitativo de la variación que sufriría la regresión en general ⁷⁰, dado el mayor tamaño de muestra utilizado. Los resultados estadísticos de la regresión se muestran en la Tabla A.6, con los cuales se concluye que el modelo nuevamente es válido ⁷¹. También hay que destacar que el coeficiente de determinación disminuye, aunque sigue siendo bastante elevado ($R^2 = 0,9609$).

Por otra parte, la Tabla A.7 muestra los nuevos resultados obtenidos para los coeficientes de cada variable. A diferencia de la instancia anterior, todo el conjunto de variables resulta ser significativo (ver *P-value*). Para el análisis de los resultados, la muestra considerada como representativa es claramente la de mayor tamaño (1.000 simulaciones).

Ahora bien, se puede observar que los efectos de cada parámetro sobre el ROS se mantienen (ver el análisis estático, Sección 4.2.1). Esto implica que las conclusiones hechas previamente son verdaderas y que el modelo muestra robustez en sus resultados. Con lo anterior, se puede concluir que tanto la constante de proporcionalidad como la fracción radiativa ayudan a aumentar la rapidez de propagación, así como el inverso del tiempo crítico y el tiempo de vida media van en desmedro de este.

Finalmente, recalcar que el parámetro que posee un mayor impacto en la propagación del incendio es la constante de proporcionalidad η (dentro del grupo seleccionado para

⁶⁹ se denomina prueba de Fisher y muestra la significancia estadística de un grupo de variables, mas no de manera individual

⁷⁰ en cuanto al valor de los coeficientes asociados a cada parámetro

⁷¹ recordar que la hipótesis nula es rechazada, dado que el estadístico F ahora posee un valor crítico de 0

este estudio). En segundo lugar se encuentra el inverso del tiempo crítico τ , teniendo comparativamente menos de la quinta parte del impacto de la variable anterior. En tercer puesto se haya la fracción radiativa r , para la cual el ROS posee una sensibilidad de menos de la décima parte de la que posee frente a η . En último lugar se encuentra el tiempo de vida media U_i , teniendo el P -value de mayor valor, lo cual se condice con su puesto de influencia dentro de la regresión multivariable hecha.

4.3. VALIDACIONES

En la presente sección se abordan diferentes instancias experimentales, con el fin de poner a prueba la capacidad de simulación del modelo propuesto. Para ello, un diverso rango de escalas ha sido seleccionado, el cual se presenta a continuación.

4.3.1. EXPERIMENTO LOCAL (UN SITIO)

Con el fin de estudiar la auto-degradación de un sólo árbol, se ha hecho una comparativa con el estudio llevado a cabo por Mell et al. [67]. Los valores de los principales parámetros utilizados fueron los siguientes:

- Altura de la llama: $H = 3,2 \text{ m}$
- Altura de la copa: $T = 2,1 \text{ m}$
- Diámetro de la llama: $D = 1,6 \text{ m}$
- Diámetro de la copa: $R = 1,6 \text{ m}$
- Paso de tiempo: $h = 0,5 \text{ s}$
- Tiempo de vida media: $U_i = 3,5 \text{ s}$
- Fracción radiativa: $r = 0,26$
- Poder calorífico: $h_c = 17.700 \text{ kJkg}^{-1}$
- Masa inicial de combustible: $m_i = 15 \text{ kg}$

- Fracción de volumen de combustible: $\alpha_k = 0,005$
- Relación superficie/volumen: $\sigma_k = 3.940 \text{ m}^{-1}$

Los parámetros geométricos de la copa y de la llama fueron ajustados para un cilindro, dado que en el estudio llevado a cabo por Mell et al. se utilizó como figura base un cono. La constante de proporcionalidad y el inverso del tiempo crítico, al carecer de información, se dejaron en sus valores *default* (ver Sección 4.1.3). Sin embargo, hay que destacar el hecho de que esto no tiene relevancia alguna, debido a que dichos parámetros son trascendentes para el cálculo del factor W_{ij} , el cual no es utilizado en este estudio al tratarse de un árbol en solitario.

Siguiendo esta línea, otros parámetros tales como la masa inicial, fracción de volumen del combustible y relación superficie/volumen, fueron obtenidos mediante mediciones hechas por los mismos autores. Sin embargo, otros *input* fueron extraídos desde la literatura. Estos son la fracción radiativa r y el poder calorífico h_c , los cuales fueron recopilados de un estudio realizado por Susott [70]. Finalmente, el tiempo de vida media fue el parámetro impuesto para llegar al mismo nivel que las curvas experimentales ($U_i = 3,5 \text{ s}$). Se tomó esta libertad dado que no se cuenta con un registro formal del valor de este parámetro en la literatura.

La Figura 4.8 muestra el proceso de descomposición para un set de árboles (cuya vegetación posee una pequeña gama de humedades), y los resultados obtenidos a partir del modelo. Se puede observar que la simulación realizada captura de excelente manera la evolución del *burning rate*. Tal como se explicó en la Sección 3.5, el tiempo de vida media controla la rapidez con la cual el árbol se auto-degrada, lo cual está intrínsecamente relacionado con el contenido de humedad que posea la muestra simulada. Un contenido de humedad más elevado ocasionará que el proceso sea más lento, lo que se verá reflejado en un tiempo de vida media mayor.

4.3.2. EXPERIMENTO ESCALA LABORATORIO

En la presente sección se estudiará el grado de similitud que arroja el modelo con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente por Weise y Biging [71]. Para precisar

dentro del extenso conjunto de experimentos que ellos realizaron, la comparación con el modelo del presente trabajo se centra en los resultados obtenidos para diferentes pendientes, teniendo además la ausencia de viento ⁷².

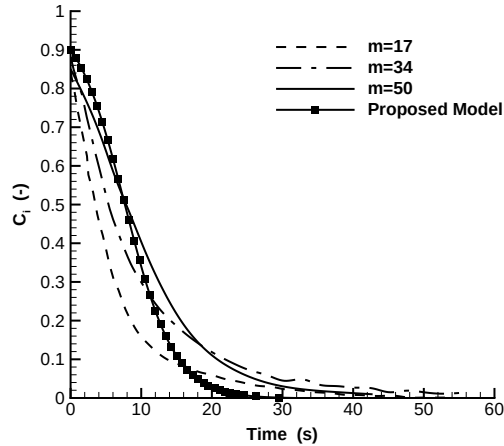


Figura 4.8: gráfico que muestra el *burning rate* para un sitio en solitario. Una comparación con datos experimentales obtenida de Mell et al. es realizada, tomando en cuenta diferentes porcentajes de humedad para la vegetación.

La situación que se simulará tendrá un *lattice* de dimensiones iguales a 2,52 m de largo y 0,69 m de ancho. El tamaño fue seleccionado dado que el estudio de Weise y Biging se sitúa en un túnel de viento. El resto de parámetros implementados en el modelamiento de la presente situación se detallan a continuación:

- Altura de la llama: $H = 0,08 - 1,69 \text{ m}$
- Altura de la copa: $T = 0,1143 \text{ m}$
- Diámetro de la llama: $D = 0,01 \text{ m}$
- Diámetro de la copa: $R = 0,01 \text{ m}$
- Paso de tiempo: $h = 0,25 \text{ s}$
- Constante de proporcionalidad: $\eta = 18 \mu J^{-1}$

⁷² el estudio propuesto por ellos comprende un rango de velocidades de viento, así como un rango de inclinaciones del terreno

- Inverso del tiempo crítico: $\tau = 1.000 \mu s^{-1}$
- Tiempo de vida media: $U_i = 0,17 s$
- Fracción radiativa: $r = 0,35$
- Poder calorífico: $h_c = 18.608 kJkg^{-1}$
- Densidad del combustible: $\rho_i = 6,09 kgm^{-3}$
- Fracción de volumen de combustible: $\alpha_k = 0,008$
- Relación superficie/volumen: $\sigma_k = 2.275 m^{-1}$

Todos los parámetros, que tienen relación con las propiedades físicas, son indicados en el mismo artículo del estudio (en su Anexo 1), salvo por el ya clásico grupo de parámetros que son propios de este estudio. Por esta razón, se utilizaron valores en el rango *default* encontrados de la literatura y ya presentados anteriormente en el estudio de sensibilidad.

Por otra parte, la densidad de ocupación de la malla es de $p = 0,80$. Con el fin de que la distribución aleatoria que puede tomar la vegetación no afecte a los resultados, se realizaron 10 simulaciones para cada instancia. El rango de pendientes estudiadas comienza en $\alpha = -30^\circ$ y concluye a los $\alpha = 30^\circ$, con un paso igual a 15° . Esto proporciona un total de 5 inclinaciones diferentes, existiendo casos en los cuales el incendio se propagará descendiendo por la pendiente (para precisar, esto ocurre en instancias con pendiente negativa $\alpha < 0$). Otro punto de interés es el número de mediciones realizadas en cada una de las pruebas. Esta cantidad varió de entre 11 y 22 datos para cada simulación, debido a que en algunas instancias la propagación fue ostensiblemente más lenta (el caso de bajar por la pendiente genera más mediciones).

Los resultados entregados por el modelo se detallan en la Tabla A.8, donde también se pueden encontrar los obtenidos experimentalmente. En general, el modelo propuesto es capaz de recrear de buena manera a los resultados experimentales, salvo en el caso de una pendiente igual a $\alpha = -15^\circ$. Por alguna razón, el experimento de Weise et al. muestra un comportamiento anómalo a medida que se acerca a un terreno plano (desde una pendiente

negativa), reduciendo la velocidad de propagación en lugar de acelerarse. Fuera de este caso, la diferencia en la métrica de control (ROS) es menor al 2 %.

Ahora bien, en el análisis del error estándar ⁷³ incurrido al tomar las diferentes muestras, ambos estudios muestran el mismo patrón: a medida que la propagación es más veloz, el grado de dispersión aumenta. De igual forma, el error estándar incurrido mediante el uso del modelo es de aproximadamente 2/3 del obtenido experimentalmente. En el peor de los casos, la reducción es sólo de un 27 % (mientras que en el mejor corresponde a un 51 %).

4.3.3. EXPERIMENTO MEDIANA ESCALA

En esta oportunidad se intentará replicar los resultados obtenidos a una escala de mayor magnitud. Para ello, el estudio experimental seleccionado fue el de Cheney et al. [43]. En el artículo en cuestión, el grupo de investigadores realizó pruebas con dos tipos diferentes de combustible: *kerosene grass* ⁷⁴ y *kangaroo grass* ⁷⁵.

Cada uno de los predios involucrados en el experimento recibió un tratamiento previo, el cual podía variar entre las siguientes opciones:

- Cortar el pastizal y dejar los desechos.
- Cortar el pastizal y retirar los desechos.
- No efectuar ninguna modificación al predio.

Para la presente investigación se eligió el experimento *C064*, correspondiente al tipo de pastizal *kerosene grass*. Además, el predio no cuenta con ningún tipo de tratamiento (tercera opción presentada). Las dimensiones de la superficie del predio eran las siguientes: 100 m de largo y 100 m de ancho. Por otra parte, la línea de ignición impuesta fue de 50 m. Esta fue encendida comenzando desde el centro de uno de los lados para luego alejarse paulatinamente hacia los laterales contiguos.

⁷³ recalcar que el error estándar es diferente a la desviación estándar, por un factor igual al inverso del tamaño de la muestra estudiada

⁷⁴ pastizal que crece de forma densa en praderas de suelo firme. Puede crecer hasta alcanzar los 2 m de altura en la temporada húmeda (donde ocurren inundaciones). Luego, la vara se quiebra y colapsa, produciendo un grueso estrato vegetal. Su nombre científico corresponde a *Eriachne grassland*

⁷⁵ uno de los tipos de pasto más comunes en la estepa australiana

Los parámetros implementados en el modelamiento de este experimento son los que se enumeran a continuación:

- Altura de la llama: $H = 4,0 \text{ m}$
- Altura de la copa: $T = 0,31 \text{ m}$
- Diámetro de la llama: $D = 0,5 \text{ m}$
- Diámetro de la copa: $R = 0,05 \text{ m}$
- Paso de tiempo: $h = 0,5 \text{ s}$
- Constante de proporcionalidad: $\eta = 10 \mu J^{-1}$
- Inverso del tiempo crítico: $\tau = 1.500 \mu s^{-1}$
- Tiempo de vida media: $U_i = 0,2 \text{ s}$
- Fracción radiativa: $r = 0,35$
- Poder calorífico: $h_c = 15.600 \text{ kJkg}^{-1}$
- Densidad del combustible: $\rho_i = 1,25 \text{ kgm}^{-3}$
- Fracción de volumen de combustible: $\alpha_k = 0,008$
- Relación superficie/volumen: $\sigma_k = 9.770 \text{ m}^{-1}$
- Velocidad del viento: $WS = 4,2 \text{ ms}^{-1}$, dirección Este

En esta oportunidad, la densidad de ocupación no se especificó en el trabajo realizado por Cheney. Es por ello que, dada la descripción realizada en el artículo, se decidió utilizar un rango entre $\rho = 0,80 - 0,95$ (generando instancias cada 0,05). Además, para cada valor de densidad de ocupación se generaron 10 distribuciones aleatorias de vegetación ⁷⁶.

En el artículo de Cheney et al. se entrega una imagen que contiene la evolución del frente del incendio (ya expuesta en la Figura 2.5), mencionando además el tiempo

⁷⁶ recordar que la vegetación se distribuye de manera uniforme

existente entre dichas mediciones. Es por ello que se optó por calcular nuevamente el ROS y compararlo con el compendio de datos recolectados en las 30 simulaciones realizadas (cabe decir que cada simulación posee entre 10 a 13 mediciones).

La Figura 4.9 muestra la mencionada comparativa entre los resultados del experimento y las simulaciones realizadas. Como se puede apreciar, el avance en términos del inicio y desarrollo del incendio está muy bien logrado. Luego de los 60 s, el modelo tiende a estabilizar la rapidez de propagación en alrededor de $1,3 \text{ ms}^{-1}$. Esto sin duda coincide con la rapidez media encontrada por los investigadores en el total de incendios realizados por ellos (44 experimentos en total, poseyendo el código *E1* para el análisis expuesto en su artículo).

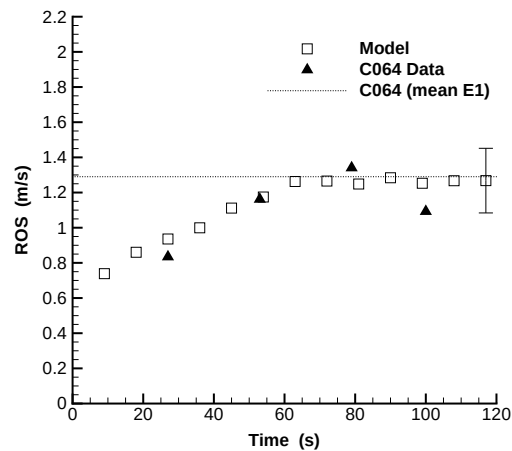


Figura 4.9: gráfico en el cual se puede ver la comparación entre la evolución de la rapidez de propagación en el experimento *C064* de Cheney et al. y los resultados obtenidos por una serie de simulaciones realizadas con el modelo propuesto en el presente trabajo. Además, se expone una barra de error para el set de mediciones que posee el mayor de estos valores.

Por lo demás, se puede apreciar que el modelo no refleja de buena manera la caída final del ROS. Esto se debe mayormente al hecho de que el viento (que inclina la llama en durante toda la simulación) es tomado como un valor constante dentro del modelo. Sin embargo, la realidad del experimento no fue esta. La Figura 4.10 muestra el verdadero comportamiento del viento para el experimento *C064*, el cual fue registrado en cada una de las cuatro esquinas del *lattice*. Se puede apreciar que esta dista mucho de ser constante, tanto en dirección como en magnitud, por lo cual se asume que es una de las principal

fuentes de discrepancia entre el modelo y los resultados experimentales.

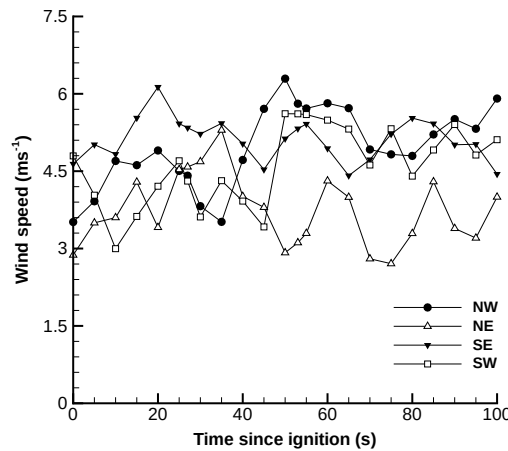


Figura 4.10: gráfico en el que se expone la evolución de la velocidad del viento, correspondiente a las cuatro esquinas del terreno en el cual el experimento *C064* realizado por Cheney et al. se llevó a cabo.

4.3.4. EXPERIMENTO ESCALA MEGA-INCENDIO

La última instancia de validación del modelo expuesto en el presente trabajo será la de un incendio forestal propiamente tal. Para ello se ha elegido el incendio de Lançon (sector perteneciente al estado de Provenza, sur de Francia), acaecido el año 2005.

Un aspecto importante es que, en esta oportunidad, existe una intervención por parte bomberos y brigadistas. Dado que este incendio no fue un experimento planificado, como los analizados a lo largo de esta sección, el combate en su contra fue imperativo. No obstante lo anterior, esta instancia ya ha sido utilizada como punto de comparación en otros estudios, tomando los resguardos pertinentes (se incluye si es posible dicha intervención externa). Un claro ejemplo de esto es el trabajo de tesis doctoral de Y. Billaud [72].

Los parámetros utilizados para realizar la presente simulación fueron los siguientes:

- Altura de la llama: $H = 4,2 \text{ m}$
- Altura de la copa: $T = 3,0 \text{ m}$
- Diámetro de la llama: $D = 1,5 \text{ m}$

- Diámetro de la copa: $R = 1,5 \text{ m}$
- Distancia entre sitios: $L = 5 \text{ m}$
- Paso de tiempo: $h = 0,5 \text{ s}$
- Constante de proporcionalidad: $\eta = 5 \mu J^{-1}$
- Inverso del tiempo crítico: $\tau = 1.800 \mu s^{-1}$
- Tiempo de vida media: $U_i = 15,75 \text{ s}$
- Fracción radiativa: $r = 0,35$
- Poder calorífico: $h_c = 12.000 \text{ kJkg}^{-1}$
- Masa inicial de combustible: $m_i = 16 \text{ kg}$
- Fracción de volumen de combustible: $\alpha_k = 0,0023$
- Relación superficie/volumen: $\sigma_k = 5.950 \text{ m}^{-1}$
- Velocidad del viento: $WS = 45 \text{ km/h}$, dirección Noroeste

Ahora bien, existen un conjunto de consideraciones que son necesarias de explicar en cuanto a la confección de la malla y cómo se abordó la ocupación de la vegetación. El *lattice* confeccionado tiene 10 km de largo y 7 km de ancho, lo que da un total de 7.000 ha . Como se podrá suponer, con el fin de poder abarcar tan inmensa extensión, las mediciones de densidad fueron tomadas a distancias de 50 m unas de otras. Cabe mencionar que la densidad de ocupación total de este terreno es de $\rho = 0,80$, y la especie existente es *Quercus Coccifera*. Para situar los árboles dentro de estos cuadrantes ⁷⁷, una nueva densidad de ocupación fue impuesta ($\rho = 0,64$). Si se desean más detalles acerca de la descripción del bosque, se sugiere visitar los siguientes artículos en donde ya ha sido utilizado este mismo incendio [72, 73].

Luego de que el pre-procesamiento de la vegetación ha sido realizado, se puede obtener una vista aérea de la distribución de la vegetación existente en la zona (ver Figura 4.11).

⁷⁷ estos sitios son los que se encuentran a una distancia $L = 5 \text{ m}$ unos de otros

Esto será de utilidad al momento de querer describir los resultados, dado que este es un terreno escarpado ⁷⁸ y no será necesariamente sencillo el obtener conclusiones. Por esta misma razón en la Figura 4.12 se puede apreciar una vista isométrica de Lançon (la cual muestra la vegetación antes vista de manera aérea), con el fin de dar un mayor detalle a la interpretación.

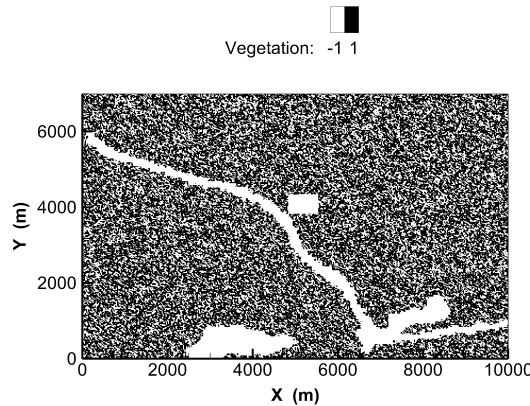


Figura 4.11: vista aérea de la disposición de la vegetación en Lançon.

A continuación se adjunta una breve descripción de cómo fue la evolución del incendio. El desastre ocurrió el primero de Julio de 2005, a las 09:40. Se reportaron dos focos de origen, habiendo en la zona un viento de velocidad promedio igual a $WS = 46 \text{ km/h}$ ⁷⁹, dirección Noroeste ⁸⁰.

Por lo demás, se cuenta con la información de la ubicación del frente de fuego a las 12:00 y a las 14:34. Por lo cual, se han rescatado los datos de dichos tiempos al realizar la simulación. La Tabla A.9 presenta un resumen de los datos recolectados por los brigadistas (*i.e.* experimentales) y los arrojados por el modelo.

Según los resultados, para la primera parte del incendio (evolución hasta las 12:00) existe una gran concordancia en las métricas con respecto a lo que se observa en la realidad, siendo el área quemada levemente sobrestimada. En cuanto a la rapidez de propagación, la simulación entrega resultados concordantes.

⁷⁸ ahora el terreno no está compuesto solo por una pendiente

⁷⁹ la medición fue hecha a 10 m sobre el nivel del suelo

⁸⁰ esto corresponde a un ángulo igual a 330° con respecto a una línea horizontal trazada de oeste a este

Una vez finalizada la segunda mitad de la simulación (después de 17.640 s), el área quemada ha sido claramente sobrestimada. Parte de esta discrepancia se debe a la propia acción de los brigadistas que combatieron el incendio. Su intervención comenzó alrededor de las 13:00, siendo el foco de atención el contener el incendio por la parte Noreste. Considerando el factor recién mencionado ⁸¹, el área quemada se reduce aproximadamente en un 20 %, dando un resultado igual a 562 ha.

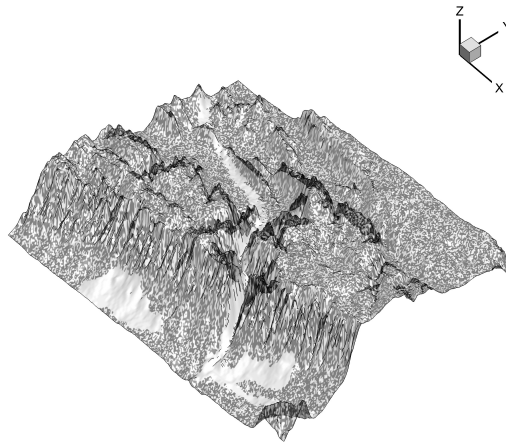


Figura 4.12: representación isométrica de la topografía del terreno de Lançon.

Por otra parte, el ROS es subestimado en la segunda mitad del incendio. Nuevamente la intervención de los bomberos es una de las principales razones de esto, debido a que el perímetro que se crea posee una forma alargada. Esto se traduce en que la distancia que recorre el incendio sea efectivamente mayor que la calculada mediante la simulación.

Luego de observar las diferentes instancias de validación, se puede concluir que el modelo entrega descripciones de bastante buena calidad. Esto se logra a pesar de que, algunas veces, la descripción en que se incurre es una aproximación. Por ejemplo, el factor de forma geométrico impuesto para todos los casos es un cilindro, cuando en ocasiones (dependiendo del tipo de vegetación) otra forma puede ser más apropiada (una esfera o cono). Un último punto a mencionar es la mejora sustancial que se puede lograr en cuanto a la descripción de la vegetación, la cual efectivamente puede ser mucho más

⁸¹ esto quiere decir, si se sustrae el área quemada que se extiende en esa dirección

detallada (permitiendo pre-tabulaciones de los datos), como lo muestran algunos modelos recientes [74].



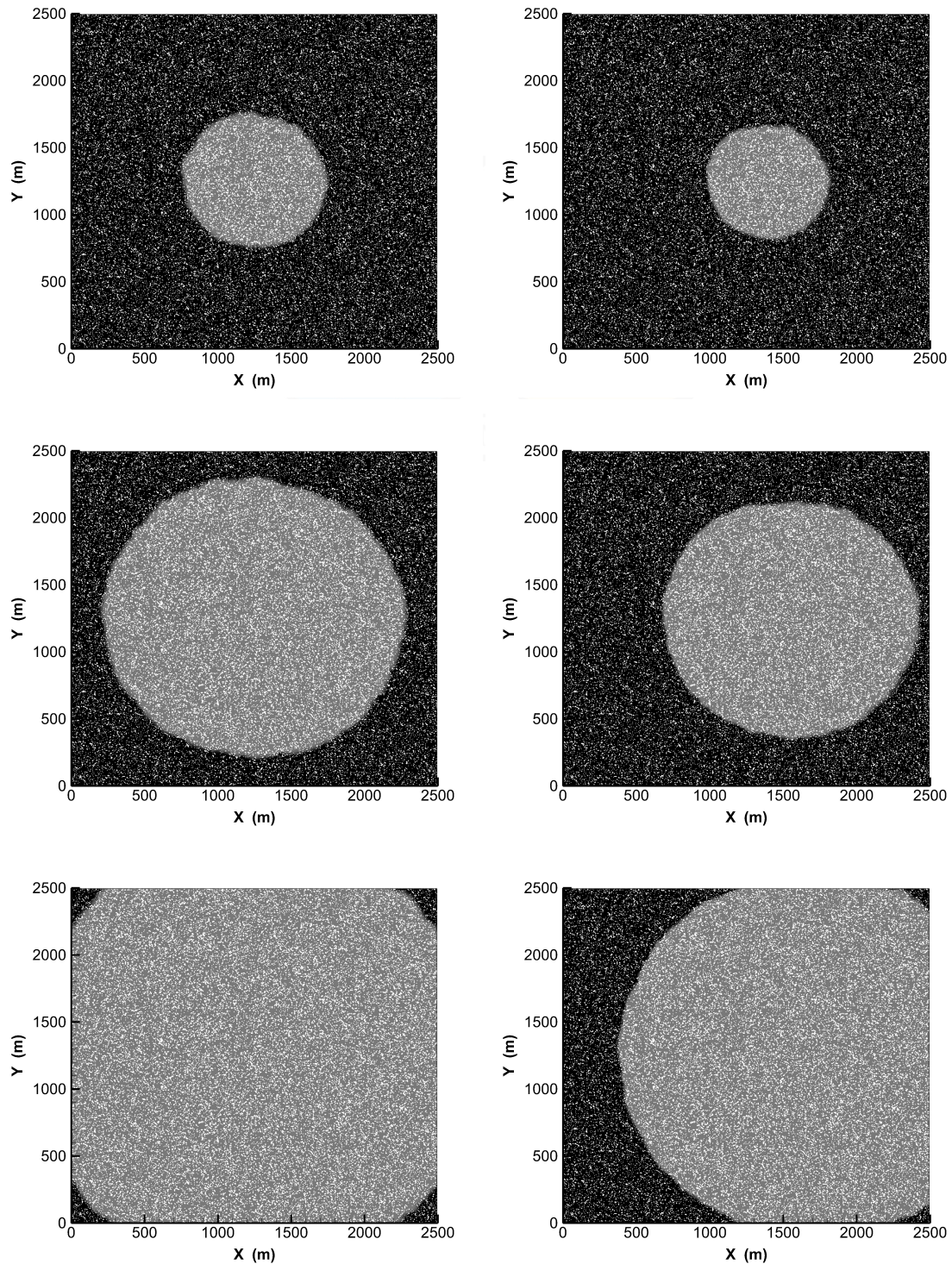
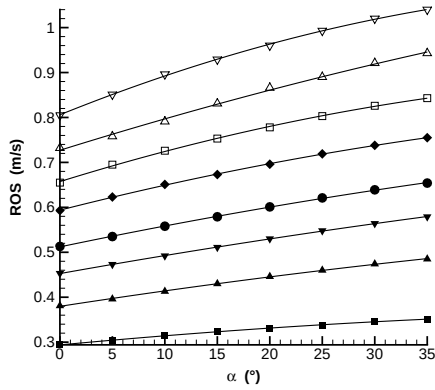
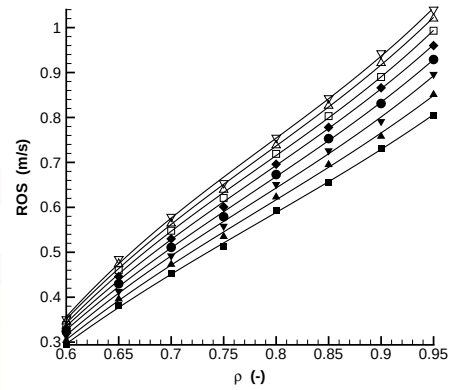


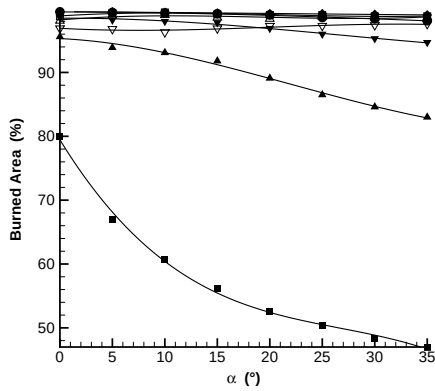
Figura 4.13: esta serie de imágenes muestra la evolución de los patrones dejados por un incendio. La densidad de ocupación corresponde a $\rho = 0,90$. La columna derecha muestra la evolución en un terreno plano, mientras que la izquierda presenta la diferencia de tener una pendiente de $\alpha = 20^\circ$. El área quemada es de color gris, mientras que los sitios que tienen la totalidad de su combustible intacto son negros (las celdas en blanco implican ausencia de combustible). En ambos casos, el intervalo que existe entre las imágenes de cada secuencia es igual a 500 s.



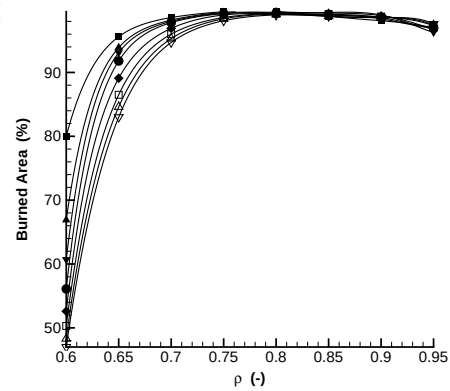
(a)



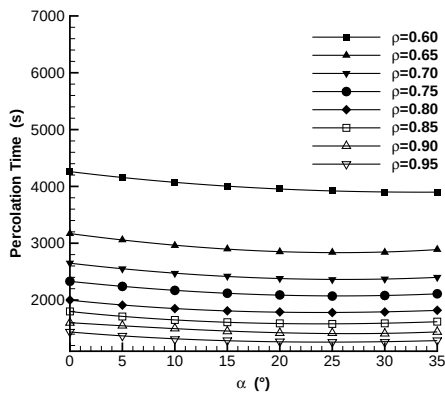
(b)



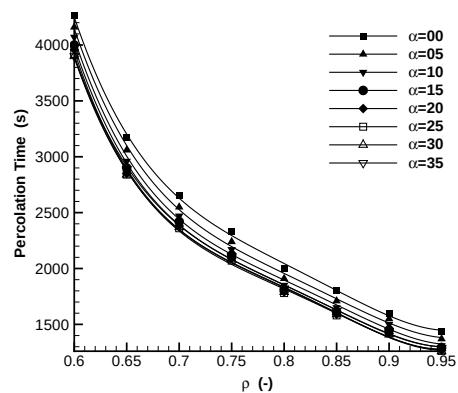
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.14: este grupo de gráficos resume el comportamiento de las métricas más importantes de un incendio forestal cuando se varían la pendiente α (columna izquierda) y la densidad de ocupación ρ (columna de la derecha).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el presente trabajo de investigación se ha desarrollado un nuevo modelo de propagación de incendios forestales (continuo en el tiempo). El modelo fue confeccionado con el objetivo claro de que respondiera a la dinámica del fenómeno, siendo capaz de reproducir la propagación en escenarios realistas. A su vez, este permite la inclusión de una vegetación heterogénea (en cuanto a su tipo, geometría, masa disponible, etc.), como también permite diferentes cambios en la topografía.

El modelo incorpora más consideraciones sobre la interacción entre los árboles (sitios) que en estudios anteriores, siendo este un avance importante en el estado del arte de estos fenómenos, convirtiéndose en la característica más remarcable del trabajo.

La heterogeneidad del terreno es capturada por medio del factor de forma, es cual es localmente incluido en cada uno de los sitios como parte de los parámetros insertos en el grupo de ecuaciones diferenciales que son agrupadas. Los efectos provocados al incluir el viento dentro de la descripción del fenómeno son tomados en consideración mediante la modificación del ya mencionado factor geométrico. Esto proporciona, de manera simple, un punto de inicio interesante en aras de incluir otros efectos en el futuro.

Ahora bien, en esta investigación se estudió la propagación resultante por parte del modelo, considerando un mallado homogéneo en cuanto al tipo de vegetación. Los resultados mostraron ser consistentes en cuanto a la descripción (cualitativa) entregada en diferentes escalas de experimentos.

Asimismo, los resultados numéricos de ROS y área quemada poseen concordancia con

las métricas respectivas obtenidas por brigadistas (incendio de Lançon). Es por ello que se tiene deja como trabajo futuro implementar este modelamiento en situaciones reales, con el fin de ser usado en la construcción de planes de prevención en zonas de riesgo, así como ayudar en la contención de este tipo de desastres en un diverso grupo de posibles escenarios.



Bibliografía

- [1] D. Paton, P.T. Buergelt, F. Tedim, and S. McCaffrey. *Wildfires: International perspectives on their social-ecological implications*. Wildfire Hazards, Risks, and Disasters, Chapter 1, pages 1-14, 2015.
- [2] K.O. Odigie, E. Khanis, S.A. Hibdon, P. Jana, A. Araneda, R. Urrutia, and A.R. Flegal. Remobilization of trace elements by forest fire in patagonia, chile. *Regional Environmental Change*, 29(1):1–8, 2015.
- [3] M. Castillo, G. Julio-Alvear, and R. Garfias. *Current Wildfire Risk Status and Forecast in Chile: Progress and Future Challenges*. Wildfire Hazards, Risks, and Disasters, Chapter 4, pages 59-75, 2015.
- [4] W.L. Fons. Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research*, 72(1):93–121, 1946.
- [5] H.C. Hottel, G.C. Williams, and F.R. Steward. Modelling of fire-spread through a fuel bed. *Symposium (International) on Combustion*, 10(1):997–1007, 1964.
- [6] H.W. Emmons. Fire in the forest. *Fire Research Abstracts and Reviews*, 5(3):163–178, 1964.
- [7] F.A. Albini. A physical model for firespread in brush. *Symposium (International) on Combustion*, 11(1):553–560, 1967.
- [8] P.H. Thomas. Some aspects of the growth and spread of fire in the open. *Forestry*, 40(2):139–164, 1967.
- [9] R.C. Rothermel. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research paper int-rp-115, USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972.
- [10] P.J. Pagni and T.G. Peterson. Flame spread through porous fuels. *Symposium (International) on Combustion*, 14(1):1099–1107, 1973.
- [11] F.A. Williams. Mechanisms of fire spread. *Symposium (International) on Combustion*, 16(1):1281–1294, 1977.
- [12] A.G. McArthur. Forest fire danger meter. *Forest Research Institute, Forestry & Timber Bureau*, 1973.

- [13] I.R. Noble, G.A.V. Bary, and A.M. Gill. Mcarthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, 5(2):201–203, 1980.
- [14] D.G. Green. Shapes of simulated fires in discrete fuels. *Ecological Modelling*, 20(1):21–32, 1983.
- [15] A.M. Grishin. Steady-state propagation of the front of a high-level forest fire. *Soviet Physics Doklady*, 29:917–919, 1984.
- [16] I. Karafyllidis and A. Thanailakis. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1):87–97, 1997.
- [17] A. Hernández, L. Hernández, S.Hoya, A. Martín, and G. Rodríguez. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6):372–378, 2007.
- [18] L. Hernández, S.Hoya, A. Martín, and G. Rodríguez. Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, 31(6):1213–1227, 2007.
- [19] S. Yassemi, S. Dragičević, and M. Schmidt. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modelling*, 210(1–2):71–84, 2008.
- [20] A. Alexandridis, D. Vakalis, C.I. Siettos, and G.V. Bafas. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through spetses island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 204(1):191–201, 2008.
- [21] B. Porterie, N. Zekri, J.P. Clerc, and J.C. Loraud. A weighed local small world network for forest fires. *Comptes Rendus Physique*, 6(1):151–157, 2005.
- [22] F.A. Albin. Potential spotting distance from wind-driven surface fires. Research paper int-309, USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983.
- [23] B. Teague, R. Mcleod, and S. Pacoe. Volume 1: The kilmore east fire. *2009 Victorian Bushfires Royal Commission*, 2010.
- [24] R.O. Weber. Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 17(1):67–82, 1991.
- [25] D.H. Anderson, E.A. Catchpole, N.J. De Mestre, and T. Parkes. Modelling the spread of grass fires. *The Journal of the Australian Mathematical Society, Series B: Applied Mathematics*, 23:451–466, 1982.
- [26] D. Stauffer. Introduction to percolation theory. *Taylor & Francis*, 1985.
- [27] W.H. Frandsen. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame*, 16:9–16, 1971.

- [28] O. Séro-Guillaume and J. Margerit. Modelling forest fires. Part I: a complete set of equations derived by extended irreversible thermodynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(8):1705–1722, 2002.
- [29] W. Mell, M.A. Jenkins, J. Gould, and P. Cheney. A physics-based approach to modelling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 16(1):1–22, 2007.
- [30] R. Linn, J. Reisner, J.J. Colman, and J. Winterkamp. Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire*, 11(1):233–246, 2002.
- [31] D. Morvan and J.L. Dupuy. Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 127(1–2):1981–1994, 2001.
- [32] J. Von Neumann and A.W. Burks. Theory of self-reproducing automata. *Illinois University Press*, 1966.
- [33] S. Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55(3):601–644, 1983.
- [34] M. Gardner. Mathematical games: the fantastic combinations of john conway’s new solitaire game “life”. *Scientific American*, 223(4):120–123, 1970.
- [35] S. Milgram. The small world problem. *Psychology Today*, 2(1):60–67, 1967.
- [36] D.J. Watts and S.H. Strogatz. Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature*, 393:440–442, 2005.
- [37] I. Graham and C.C. Matthai. Investigation of the forest-fire model on a small-world network. *Physics Review E*, 68:036109, 2003.
- [38] P. Bak, K. Chen, and C. Tang. A forest-fire model and some thoughts on turbulence. *Psychology Today*, 147(5–6):297–300, 1990.
- [39] B. Porterie, N. Zekri, J.P. Clerc, and J.C. Loraud. Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. *Combustion and Flame*, 149(1–2):63–78, 2007.
- [40] B. Porterie, A. Kaiss, J.P. Clerc, L. Zekri, and N. Zekri. Universal scaling in wildfire fractal propagation. *Applied Physics Letters*, 93(20):204101, 2008.
- [41] A.G. McArthur. Weather and grassland fire behaviour. Technical report, Forestry and Timber Bureau, Canberra, 1966.
- [42] A.G. McArthur. Fire behaviour in eucalypt forests. Technical report, Forestry and Timber Bureau, Canberra, 1967.
- [43] N.P. Cheney, J.S. Gould, and W.R. Catchpole. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire*, 3(1):31–44, 1993.

- [44] C.M. Britton, B.L. Karr, and F.A. Sleva. A technique for measuring rate of fire spread. *Journal of Range Management*, 30(5):395–397, 1977.
- [45] N.P. Cheney and J.S. Gould. Fire growth in grassland fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 5(4):237–247, 1995.
- [46] National Fire Coordinating Group. Wildland fire suppression tactics - Reference Guide. Technical report, United States Department of Agriculture, 1996.
- [47] M.E.J. Newman and D.J. Watts. Renormalization group analysis of the small-world network model. *Physics Letters A*, 263(4–6):341–346, 1999.
- [48] M.A. Finney, J.D. Cohen, J.M. Forthofer, M.J. Gollner S.S. McAllister, D.J. Gorham, K. Saito, N.K. Akafuah, B.A. Adam, and J.D. English. Role of buoyant flame dynamics in wildfire spread. *PNAS*, 112(32):9833–9838, 2015.
- [49] M.A. Finney, J.D. Cohen, S.S. McAllister, and M.W. Jolly. On the need for a theory of wildland fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 22(1):25–36, 2013.
- [50] D. Frankman, B.W. Webb, B.W. Butler, D. Jimenez, J.M. Forthofer, P. Sopko, S.S. Kyle, J.K. Hiers, and R.D. Ottmar. Measurements of convective and radiative heating in wildland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 22(2):157–167, 2013.
- [51] B. Moghtaderi, V. Novozhilov, D.F. Fletcher, and J.H. Kent. A new correlation for bench-scale piloted ignition data of wood. *Fire Safety Journal*, 29(1):41–59, 1997.
- [52] J.L. Cordova, D.C. Walther, J.L. Torero, and A.C. Fernandez-Pello. Oxidizer flow effects on the flammability of solid combustibles. *Combustion Science and Technology*, 164(1):253–278, 2001.
- [53] P. Mindykowski, A. Fuentes, J.L. Consalvi, and B. Porterie. Piloted ignition of wildland fuels. *Fire Safety Journal*, 46(1–2):34–40, 2011.
- [54] L. Orloff and J. De Ris. Froude modeling of pool fires. *Symposium (International) on Combustion*, 19(1):885–895, 1982.
- [55] D. Morvan and J.L. Dupuy. Modeling the propagation of a wildfire through a mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 138(3):199–210, 2004.
- [56] F. Pimont, J.L. Dupuy, Y. Caraglio, and D. Morvan. Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5):536–553, 2009.
- [57] A. Atreya. Ignition of fires. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1748):2787–2813, 1998.

- [58] J.P. Gore and G.M. Faeth. Structure and spectral radiation properties of turbulent ethylene/air diffusion flames. *Symposium (International) on Combustion*, 21(1):1521–1531, 1988.
- [59] F. Morandini, P.A. Santoni, and J.H. Balbi. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal*, 36(6):519–543, 2001.
- [60] A.L. Sullivan, P.F. Ellis, and I.K. Knight. A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1):101–110, 2003.
- [61] F.R. Steward. Black body view factors. *Heat Transfer in Fires*, pages 409–431, 1974.
- [62] M. Shokri and C.L. Beyler. Radiation from large pool fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1(4):141–150, 1989.
- [63] K.S. Mudan. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 10(1):59–80, 1984.
- [64] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, and R. Rehm. Fire Dynamics Simulator (version 5) technical reference guide, Volume 3: Validation. Technical report, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [65] J. Zhang, M. Delichatsios, and M. Colobert. Assessment of fire dynamics simulator for heat flux and flame heights predictions from fires in SBI tests. *Fire Technology*, 46(2):291–306, 2008.
- [66] W. Mell, J. Charney and M.A. Jenkins, P. Cheney, and J. Gould. Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL-FIRETEC and NIST-WFDS models. *Remote Sensing and Modeling Applications to Wildland Fires*, pages 209–225, 2013.
- [67] W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott, and S.L. Manzello. Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees. *Combustion and Flame*, 156(10):2023–2041, 2009.
- [68] S.L. Manzello, T.G. Cleary, J.R. Shields, and J.C. Yang. Ignition of mulch and grasses by firebrands in wildland–urban interface fires. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3):427–431, 2006.
- [69] M. Castillo M.E.J. Newman and G.T. Barkema. *Monte Carlo methods in statistical physics*. Oxford University Press, Chapter 1-4, 1999.
- [70] R.A. Susott. Characterization of the thermal properties of forest fuels by combustible gas analysis. *Forest Science*, 28(2):404–420, 1982.
- [71] D.R. Weise and G.S. Biging. A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects. *Forest Science*, 43(2):170–180, 1997.
- [72] Y. Billaud. *Modélisation hybride stochastique-déterministe des incendies de forêts*. PhD thesis, Université de Provence, Mai 2011.

- [73] J.K. Adou, Y. Billaud, D.A. Broua, J.P. Clerc, J.L. Consalvi, A. Fuentes, A. Kaiss, F. Nmira, B. Porterie, L. Zekric, and N. Zekric. Simulating wildfire patterns using a small-world network model. *Ecological Modelling*, 221(11):1463–1471, 2010.
- [74] Y. Billaud, A. Kaiss, J.L. Consalvi, and B. Porterie. Monte carlo estimation of thermal radiation from wildland fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(1):2–11, 2011.



ANEXO A

TABLAS

TABLA A.1: participación en la producción mundial de madera en trozas. Los porcentajes están sobre la base de una producción total de 1.577.974.000 m³. Fuente: Anuario Forestal FAO 2011, Productos forestales, pág. 22–24.

Posición	País	Participación (%)
1.	EE.UU.	18,0 %
2.	Rusia	9,7 %
3.	Canadá	9,0 %
4.	Brasil	8,9 %
5.	China	6,5 %
6.	Suecia	4,2 %
7.	Indonesia	3,8 %
8.	Finlandia	2,9 %
9.	Alemania	2,9 %
10.	Chile	2,5 %
11.	Polonia	2,0 %
12.	Francia	1,8 %
13.	Australia	1,7 %
14.	Nueva Zelanda	1,6 %
15.	India	1,5 %

TABLA A.2: participación en la producción mundial de pulpa de madera. Los porcentajes están sobre la base de una producción total de 153.296.000 ton. *Fuente:* Anuario Forestal FAO 2011, Productos forestales, pág. 144–145.

Posición	País	Participación (%)
1.	EE.UU.	32,6 %
2.	Canadá	11,9 %
3.	Brasil	9,1 %
4.	Suecia	7,7 %
5.	Finlandia	6,8 %
6.	Japón	5,9 %
7.	China	5,4 %
8.	Rusia	4,7 %
9.	Chile	3,2 %
10.	Alemania	1,8 %
11.	España	1,3 %
12.	Francia	1,3 %
13.	Noruega	1,2 %
14.	Austria	1,1 %
15.	Nueva Zelanda	1,0 %

TABLA A.3: participación en las exportaciones de productos forestales. Los porcentajes están sobre la base de una exportación total equivalente a 255.932 millones de USD. *Fuente:* Anuario Forestal FAO 2011, Productos forestales, pág. 74–76.

Posición	País	Participación (%)
1.	EE.UU.	10,6 %
2.	Canadá	9,2 %
3.	Alemania	8,9 %
4.	Suecia	7,1 %
5.	Finlandia	5,7 %
6.	China	5,3 %
7.	Rusia	4,0 %
8.	Francia	3,4 %
9.	Brasil	3,2 %
10.	Indonesia	3,1 %
11.	Austria	3,1 %
12.	Bélgica	2,4 %
13.	Chile	2,2 %
14.	Holanda	2,1 %
15.	España	2,0 %

TABLA A.4: extracto del análisis de varianza para la regresión múltiple de los resultados arrojados con el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 100 simulaciones.

	G. libertad	Suma cuadrados	Prom. cuadrados	F	F-Crítico
Regresión	4	1.704,4	426,1	696,3	$1,9 \cdot 10^{-69}$
Residuos	96	58,7	0,61		
Total	100	1.763,2			

TABLA A.5: resumen de los resultados que arroja la regresión múltiple para las variables del modelo, teniendo como data las simulaciones hechas mediante el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 100 instancias.

Parámetros	Coefficientes	Cota inferior 95 %	Cota superior 95 %	<i>P-value</i>
η	3,00	2,65	3,34	$1,58 \cdot 10^{-31}$
τ	-0,07	-0,34	0,20	0,60
U_i	-0,38	-0,71	-0,05	0,02
r	0,19	-0,04	0,43	0,10

TABLA A.6: extracto del análisis de varianza para la regresión múltiple de los resultados arrojados con el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 1.000 simulaciones.

	G. libertad	Suma cuadrados	Prom. cuadrados	F	F-Crítico
Regresión	4	1.4314,5	3.578,6	5.653,5	0
Residuos	996	582,3	0,63		
Total	1.000	1.4896,9			

TABLA A.7: resumen de los resultados que arroja la regresión múltiple para las variables del modelo, teniendo como data las simulaciones hechas mediante el método Monte Carlo, para un tamaño de muestra igual a 1.000 instancias.

Parámetros	Coefficientes	Cota inferior 95 %	Cota superior 95 %	<i>P-value</i>
η	3,07	2,95	3,19	$3,6 \cdot 10^{-271}$
τ	-0,45	-0,57	-0,34	$3,8 \cdot 10^{-15}$
U_i	-0,17	-0,26	-0,08	$7,6 \cdot 10^{-05}$
r	0,26	0,18	0,34	$1,1 \cdot 10^{-10}$

TABLA A.8: comparativa de la rapidez de propagación entre los experimentos realizados por Weise et al. y los entregados por el modelo propuesto en la presente investigación. Para cada caso, la columna de la izquierda muestra el ROS expresado en cms^{-1} , mientras que la columna de la derecha indica el error estándar para dichas mediciones.

Pendiente (α °)	ROS Weise et al.		ROS Model	
-30	1.55	0.25	1.530	0.141
-15	3.30	0.25	2.023	0.181
0	2.68	0.53	2.621	0.258
15	3.70	0.30	3.711	0.263
30	15.60	2.10	15.768	1.334

TABLA A.9: comparación realizada entre las mediciones hechas por los brigadistas en el incendio de Lançon (2005), y los resultados obtenidos de la simulación utilizando el modelo propuesto.

	Tiempo	Mediciones brigadistas	Mediciones simulación
ROS (m/h)	12:00	714	609
	14:34	1523	693
Área quemada(ha)	12:00	148	217
	14:34	485	702

ANEXO B

AUTÓMATA CELULAR

En 1970, Martin Gardner publicó un artículo en *Scientific American* en el cual realizaba un estudio del modelo perteneciente al matemático John Conway *Game of Life*. Este algoritmo presenta un sistema bidimensional que evoluciona con el tiempo de una manera lo más simple posible (al contrario del enfoque utilizado por von Neumann, en el cual el sistema se basaba en un complejo sistema de reglas y posibles estados). En este sistema los posibles estados es estar “vivo” o “muerto”, como se muestra en la Figura B.1.

1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	1
1	1	1	0	1	1
1	0	1	0	1	0
0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1

Figura B.1: esquema del CA bidimensional. En el cuadrante remarcado se muestra una célula viva, rodeada por su vecindad que se compone por otras 8 células.

En particular, el objetivo de Conway era lograr un sistema que cumpliera lo siguiente:

1. No debe haber un patrón inicial para el cual exista una prueba sencilla de que termine en un crecimiento sin límites de la población.
2. Deben existir patrones iniciales que aparentemente crezcan sin límites.
3. Debe haber patrones iniciales simples que crezcan y cambien durante un período considerable de tiempo, antes de llegar a su fin en tres formas posibles:
 - Desaparecer por completo.
 - Convertirse es una configuración estable (sin cambios).
 - Entrar en una fase de oscilación que repite patrones en un ciclo infinito de dos o más periodos.

Para precisar, las reglas con las cuales funciona el CA que él creó se enuncian a continuación:

1. Muerte: si una célula está viva (*estado* = 1), esta morirá (*estado* = 0) bajo las siguientes circunstancias:
 - Sobrepoblación: si la célula tiene cuatro o más vecinos vivos.
 - Soledad: si la célula tiene uno o menos vecinos vivos (ver Figura B.2).
2. Nacimiento: si la célula está muerta, esta cobrará vida si tiene exactamente tres vecinos vivos (ver Figura B.3).
3. Estabilidad: para todos los otros casos la célula no cambiará. Esto quiere decir lo siguiente:
 - Mantenerse vivo: si la célula está viva y tiene dos o tres vecinos vivos.
 - Mantenerse muerto: si la célula está muerta y sólo tiene tres vecinos muertos.

Es así como se generan ciertos patrones que poseen comportamientos interesantes. Por ejemplo, las configuraciones que se muestran en la Figura B.4, una vez aparecen nunca

vuelven a cambiar (salvo que exista una intervención proveniente más allá de la frontera mostrada).

También se pueden dar casos en los que se obtienen patrones que oscilan en sus formas, de manera que parecen ser intermitentes. Algunos ejemplos se pueden observar en la Figura B.5.

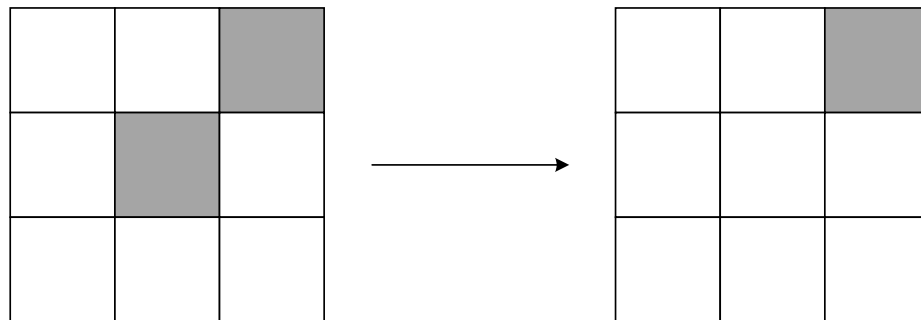


Figura B.2: muerte de una célula, la cual posee tan sólo un vecino vivo.

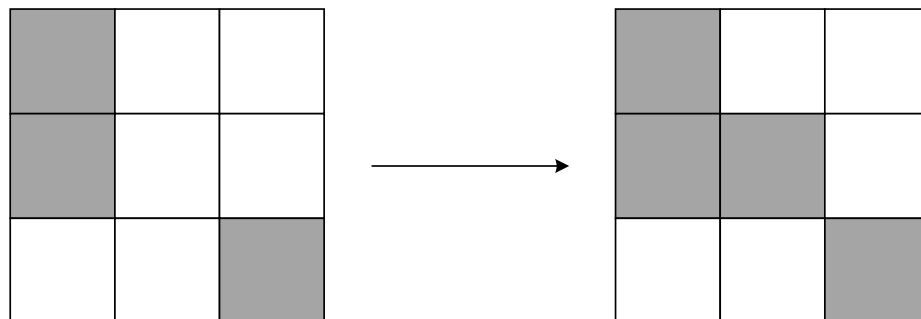
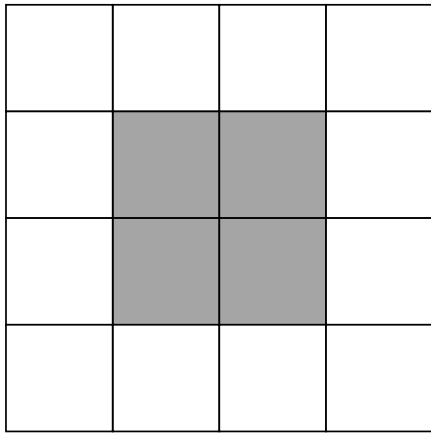


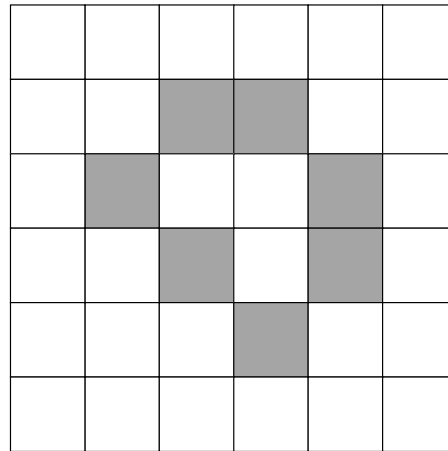
Figura B.3: nacimiento de una célula, la cual posee exactamente tres vecinos vivos.

Finalmente, existen ciertos patrones que al pasar las generaciones ⁸² parecieran que se mueven a través de la malla (ver Figura B.6). Es importante tener la claridad de que realmente las células no se mueven, sino que se produce la sensación de desplazamiento. Esto es a causa de la muerte y nacimiento de células que rodean al patrón.

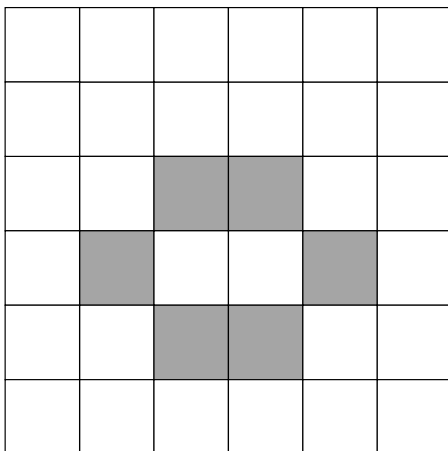
⁸² pasos temporales



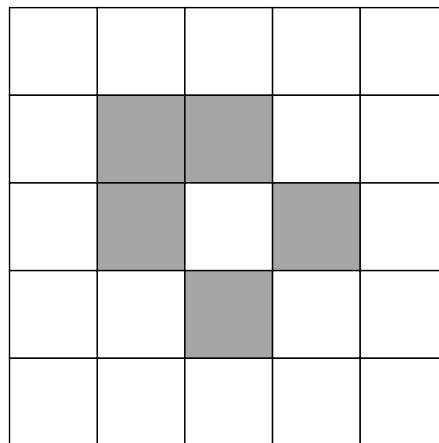
(a) configuración tipo bloque.



(b) configuración tipo hogaza.

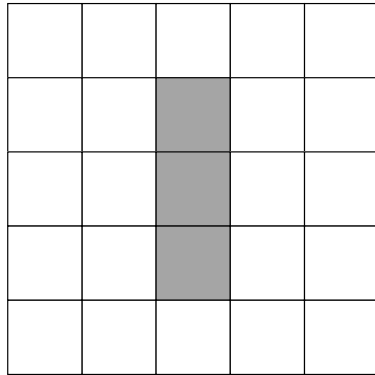


(c) configuración tipo colmena.

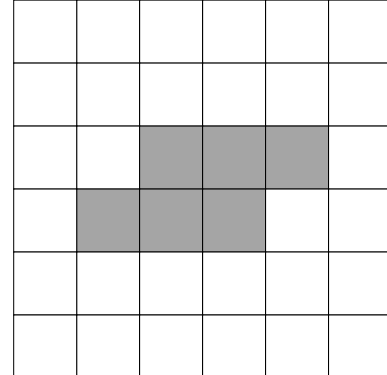


(d) configuración tipo bote.

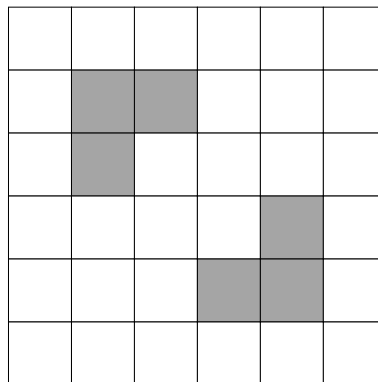
Figura B.4: diferentes configuraciones que se mantienen invariantes en el CA “El juego de la vida”.



(a) configuración parpadeante.

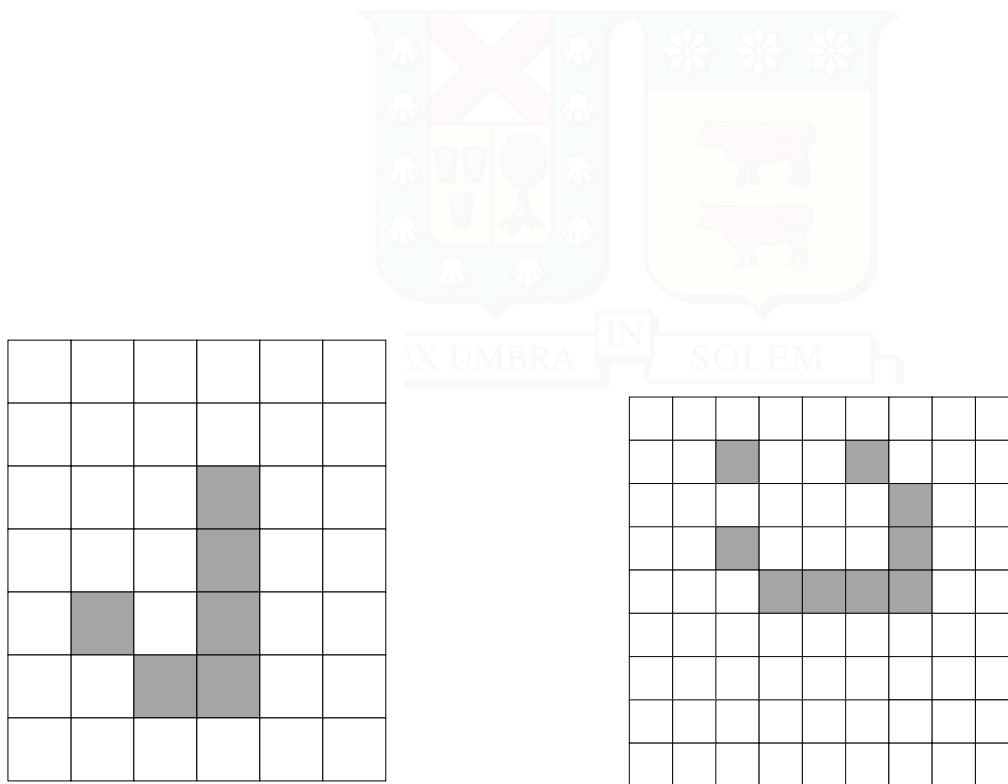


(b) configuración tipo rana.



(c) configuración tipo baliza.

Figura B.5: diferentes configuraciones intermitentes que se dan en el CA “El juego de la vida”.



(a) configuración tipo planeador.

(b) configuración tipo nave espacial.

Figura B.6: diferentes configuraciones que dan el efecto de desplazarse a través del sistema en el CA “El juego de la vida”.

ANEXO C

CÁLCULO DE TROZO

Existen muchas maneras de calcular el volumen de madera aserrada que se puede obtener de un árbol. La metodología posee una variabilidad altamente geográfica, vale decir, depende en gran medida de la localidad en la cual se ubique el predio forestal.

A continuación se describirán los principales parámetros dentro de un árbol, con el fin de facilitar la nomenclatura utilizadas en este Anexo. Una descripción detallada se puede apreciar en la Figura C.1.

- D_p : diámetro al pecho, el cual es medido a una altura de 1,3 m a contar del nivel del suelo.
- D_m : diámetro del menor extremo del tronco.
- D : diámetro ponderado del tronco.
- L : longitud del tronco.
- VPT : volumen de madera descrito en pies tabla ⁸³.

⁸³ unidad utilizada en Canadá y Estados Unidos, la cual equivale a $2,36 \cdot 10^{-3} m^3$

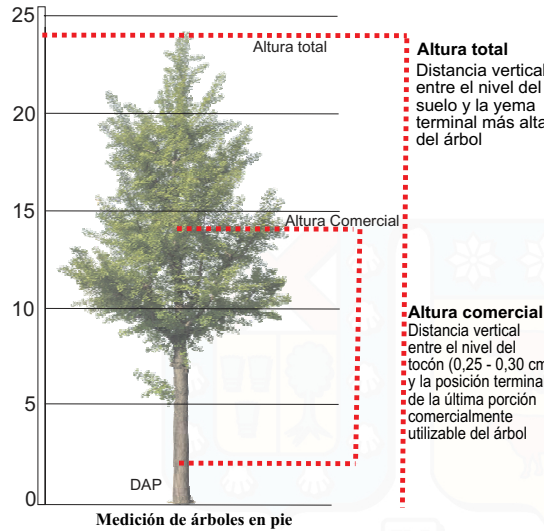


Figura C.1: esquema que muestra las diferentes medidas de un árbol que será talado y usado comercialmente.

Debido a que un tronco posee de manera natural una geometría irregular, los diámetros expuestos anteriormente se obtienen como una aproximación de la realidad. La forma común de un tronco puede ser descrita según la Figura C.2. Es así que los diámetros se pueden expresar como:

$$D_p = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$D_m = \frac{d_3 + d_4}{2}$$

De mantenerse una geometría perfecta, el volumen esperado de madera sería igual al volumen del cono truncado (V_{ideal}):

$$V_{ideal} = \frac{\pi L}{3} (D_p^2 + D_m^2 + D_p D_m)$$

Sin embargo, al aserrar el tronco se pierde material por la sierra, imperfecciones originadas por nudos y otros aspectos. Es por ello que existen formulaciones estadísticas que utilizan el diámetro ponderado (D), vale decir:

$$D = \frac{D_p + D_m}{2}$$

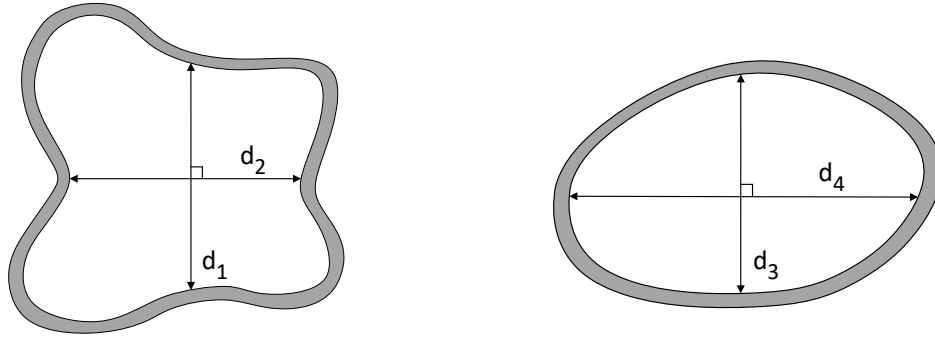


Figura C.2: forma estándar que posee un tronco en su extremo inferior (izquierda) y en su extremo superior (derecha).

Algunas de estas reglas se pueden ver a continuación:

- Regla de Alberta:

$$VPT = 0,19D^2 - 0,61D$$

- Regla de Baughman (sierra de 1/8 de pulgada):

$$VPT = 0,9 \frac{\pi(D-1)^2 L}{48}$$

- Regla de Baughman (sierra de 1/4 de pulgada):

$$VPT = 0,81 \frac{\pi(D-0,87)^2 L}{48}$$

- Regla de Champlain:

$$VPT = \frac{L}{12} (0,62832D^2 - D)$$

Con ello, finalmente queda decir que el parámetro κ es la razón entre la geometría ideal y las reales. Formalmente:

$$\kappa = \frac{V_{ideal}}{VPT}$$