

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Propagación y Extinción de Incendios Forestales y Urbanos para Entornos de Entrenamiento Virtuales

Memoria para optar al grado de Doctor en Informática que presenta

Aitor Moreno

Dirigida por los doctores:

Alejandro García-Alonso y Jorge Posada

Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea
Donostia - San Sebastian

2013

*If we don't build the land, somebody else will and the science will get discovered.
If we don't explore the moons, somebody else will. It will get discovered.
That's one of the hallmarks of science that distinguishes it from art.
In science, if you don't do it, somebody else will.
Whereas in art, if Beethoven didn't compose the Ninth Symphony,
no one else before or after is going to compose the Ninth Symphony that he composed,
no one else is going to paint Starry Night by van Gogh.
So science, when done properly, is never owned by one nation or another.*

Neil deGrasse Tyson, Competition in Science

A mis padres.

*"Porque el reto no está en poder ganar al gigante,
sino en poder superar el miedo a enfrentarse con él."*

David y el Gigante, Tierra Santa

Agradecimientos

Es curioso que lo primero que aparezca en este libro sea prácticamente lo último que he escrito. Siempre me ha parecido llamativo que la sección de agradecimientos siguiera las mismas pautas: familia y amigos, compañeros de laboratorio y/o trabajo, director de tesis y toda la gente especial que se va conociendo durante el proceso doctoral. Desde un principio, me dije que yo lo intentaría hacer diferente, salirme del estándar de facto que regía los agradecimientos. Hasta pensé en hacer una poesía, pero mis dotes literarias son muy limitadas. Sin embargo, ya en la recta final y mirando hacia atrás, me doy cuenta de que todos los doctorandos anteriores a mí dieron en el clavo y que no seré yo quien rompa la tradición.

Empezaré dando las gracias a toda mi familia. La medalla de oro se la llevan mis padres, que me han apoyado y aguantado toda mi vida. Y durante el proceso doctoral, doble ración. Siempre he podido contar con ellos para lo que fuera y sé que siempre será así. Gracias. Un besazo a mi sobrina Haizea, que espero que algún día se lea este libro y podamos debatir sobre su contenido. También tengo que dar las gracias a mis amigos, que me han aguantado todas mis dudas, quejas y preocupaciones durante este tiempo. Os lo devolveré con intereses.

Mi vida laboral ha estado ligada completamente a Vicomtech, donde he conocido multitud de personajes de película. Algunos todavía están; otros han continuado su vida en otros sitios *across the world*. De entre todos ellos, merecen mi especial reconocimiento los investigadores que han estado relacionados con los proyectos de investigación que han derivado en esta tesis doctoral: Álvaro Segura, Anis Korchi, Jon Goenetxea, John Congote, Ander Arbelaiz, Sergio Sánchez y Tassilo Glander.

El apoyo del Centro Jovellanos en Gijón ha sido firme y tangible. Hemos tenido el placer de poder aprender de manera directa una pequeña parte del mundo de la lucha anti-incendios. Los profesionales que allí nos recibieron, siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos y explicarnos todas las dudas que nos surgieron. Muchas gracias.

También quiero agradecer al Gobierno Vasco la apertura de datos públicos a través de la iniciativa *OpenData*. En particular, los datos geográficos disponibles han sido de grandísima utilidad.

Gran parte del proceso doctoral ha estado ligado a la Acción COST TU0801: *Semantic enrichment of 3D city models for sustainable urban development*. Gracias a Claudine Métral y Roland Billen por la oportunidad de participar en la acción. En sus reuniones semestrales he compartido conocimientos y experiencias con muchos participantes de toda Europa. También he colaborado con varios de ellos en la redacción de publicaciones científicas. Agradezco a Roberto San José la amabilidad y cordialidad de cada encuentro.

También me gustaría agradecer a la profesora Sisi Zlatanova (TU Delft) su apoyo científico a los contenidos de esta tesis y los buenos ratos que pasé en Delft en las dos estancias que hice allí.

Agradezco su dedicación al codirector de esta tesis, Jorge Posada. Siempre me motivó a embarcarme en esta aventura y su apoyo ha sido fundamental para enmarcar correctamente los objetivos de la tesis.

No hay suficientes palabras de agradecimiento para el profesor Alex García-Alonso, director de esta tesis. Ya son muchos años que nos conocemos, antes incluso de la realización del PFC hace ya más de una década. Por supuesto, cuando dimos el paso para hacer la tesis, Alex fue la primera y única opción para dirigirla. Ha sido muy duro compaginar las responsabilidades laborales del día a día con la redacción de la tesis, y ahí Alex siempre tuvo una comprensión y paciencia infinitas. Gracias.

Solamente me falta animar a los lectores que hayáis llegado hasta aquí a seguir un poco más y leer el resto de esta tesis.

Aitor Moreno, 2013

Resumen

La formación de los bomberos es un proceso que incluye contenidos prácticos sobre cómo actuar ante incendios forestales y urbanos. La utilización de simuladores físicos tiene limitaciones impuestas por las condiciones de seguridad requeridas. Realizar prácticas controladas en condiciones reales está también altamente limitado por razones de factibilidad y de seguridad. Por tanto, la utilización de sistemas de entrenamiento de Realidad Virtual tiene especial relevancia.

Las aportaciones de esta tesis están centradas en tres aspectos. El primero es el desarrollo de un entorno virtual para la simulación del entrenamiento de bomberos. Los escenarios considerados incluyen entornos forestales, urbanos y mixtos. El entorno virtual puede ser accedido por bomberos que asumen distintos roles.

El segundo es la generación de los algoritmos necesarios de la propagación y extinción de incendios dentro de los parámetros de interactividad del simulador. Para cumplir estos requisitos, se ha reducido la complejidad algorítmica a los elementos más fundamentales, entre ellos, la pendiente del terreno y la velocidad y dirección del viento. Además, se han añadido diversos efectos que aportan realismo a la propagación del fuego y su extinción: *Spotting Fires*, evaporación, modelo *WaterJet*.

La definición de los escenarios incluye la clasificación del terreno o uso del suelo, los edificios y las barreras. La reconstrucción de escenarios reales a partir de información existente plantea problemas de heterogeneidad entre las distintas fuentes. La tercera aportación de esta tesis presenta las tecnologías semánticas como herramientas para solucionar los problemas de heterogeneidad de los datos y los distintos roles de los usuarios del sistema.

Abstract

The usage of Virtual Reality Simulation to support the training process of fire fighters and managers has two main advantages. On one hand, it supports the simulation of complex scenarios like big cities, where a fire cannot be simulated in the real world. On the other hand, fire fighting VR simulators allow trainees to experience situations as 'alike' as possible to real fire, reducing the probability of accidents when they are practising exercises with real fire.

The success of the Virtual Reality Simulator depends on how close to reality the simulation process is. This thesis provides a fire spread algorithm for forest and urban environments, which can be used at interactive rates. Due to the interactive nature of the algorithms, the users are able to fight the fire by throwing extinguishment agents. The VR simulator also requires addressing the integration of heterogeneous data sources like maps and cadastre. Both these aspects are met in this thesis by a careful management of semantics in the information system.

This thesis discusses how existing and dynamic 3D geo-information can be loaded into a fire fighting VR system and how the preservation of the semantic knowledge can benefit the user experience in the VR simulator. Semantic technologies are intended to help in the selection of information to get a seamless integration between the GIS data, the VR system and the tasks and users involved in the fire fighting processes.

Índice general

1. Introducción y Contexto	1
1.1. Simulación Virtual como Ayuda a la Formación	3
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivo de la Tesis	6
1.4. Organización de la Tesis	6
1.5. Terminología Relacionada	7
2. Modelos de Simulación de la Propagación de Incendios	11
2.1. Algoritmos Matemáticos Complejos	12
2.2. Algoritmos Matemáticos Orientados a VR	15
2.2.1. Cálculo del Frente de Fuego	15
2.2.2. Autómatas Celulares	16
2.2.3. Agentes Autónomos: <i>Rabbit Model</i>	16
2.2.4. Entornos Urbanos	18
2.2.5. Evolución de Incendios tras un Terremoto	19
2.3. Presentación de Información Geográfica	20
2.3.1. Subdivisión Cuadrículada	22
2.3.2. Otras Subdivisiones Regulares: Hexagonal, Triangular	23
2.3.3. Subdivisiones Irregulares	24
2.3.4. Terrenos Sintéticos o Reales	26
2.4. Resumen	27
3. Sistemas de Entrenamiento en Extinción de Incendios	29
3.1. Organización Funcional de los Cuerpos de Bomberos (roles)	30
3.2. Simuladores Reales Entrenamiento de Bomberos	31
3.3. Sistemas Virtuales para Entrenamiento de Bomberos	33
3.4. Industria del Entretenimiento	34

3.5. Conclusiones	35
4. Algoritmos de Propagación y Extinción de Incendios Forestales	37
4.1. Modelización del Terreno y Parámetros	37
4.2. Propagación de Incendios Forestales	40
4.2.1. Conceptos Básicos	40
4.2.2. Propagación Básica, Comportamiento Elíptico	42
4.2.2.1. Algoritmo Propagación por Contacto Directo	45
4.2.2.2. Efectos de la Pendiente del Terreno	46
4.2.2.3. Efectos de las Condiciones de Viento	47
4.2.3. <i>Spotting Fires</i>	48
4.3. Extinción de Incendios	51
4.3.1. Conceptos Básicos	52
4.3.2. Efecto Evaporación	53
4.3.3. Tipología de Agentes Extintores	53
4.4. Simulación Iterativa	54
4.5. Resumen	54
5. Algoritmos de Propagación y Extinción de Incendios Urbanos	57
5.1. Entornos Urbanos y Forestales	57
5.2. Caracterización de los Incendios Urbanos	59
5.2.1. Tipos de Propagación	60
5.2.2. Tipos de Edificios	62
5.2.3. Modelos y Discretización	63
5.3. Algoritmo Propagación de Incendios Urbanos	64
5.3.1. Modelado de Edificios: Tipos de Celdas	64
5.3.1.1. Flashover	66
5.3.1.2. Modelo de Iwami	66
5.3.1.3. Modelo Propuesto	68
5.3.2. Propagación Horizontal: en la Misma Planta	69
5.3.3. Propagación Vertical: Hacia Arriba	70
5.3.4. Propagación entre Edificios: <i>Spotting Fires</i>	71
5.3.5. Propagación desde y hacia Zonas de Vegetación	72
5.4. Algoritmo de Extinción	73
5.4.1. Modelo <i>WaterJet</i>	74
5.4.2. WaterJets: Modelo del Alcance	75

5.4.3.	Aplicaciones del Modelo WaterJet	75
5.5.	Resumen	76
6.	Arquitectura del Sistema de Simulación Virtual e Integración con GIS	79
6.1.	Arquitectura Propuesta	80
6.2.	Datos Requeridos	82
6.2.1.	Resumen de Datos y Fuentes	82
6.2.1.1.	Datos de Elevación	84
6.2.1.2.	Uso de Suelo	85
6.2.1.3.	Datos de Edificios	86
6.2.1.4.	Datos Meteorológicos	87
6.2.2.	Caso de Uso Práctico: País Vasco	88
6.2.2.1.	Datos de Elevación	88
6.2.2.2.	Clasificación del suelo	89
6.2.2.3.	Información del entorno urbano: edificios	90
6.2.2.4.	Información meteorológica	90
6.2.3.	Heterogeneidad en la Geoinformación	91
6.3.	Integración Semántica de Fuentes Heterogéneas	94
6.3.1.	Formalización de los procesos contra incendios	96
6.3.2.	Heterogeneidad y Semántica	98
6.3.3.	Combinación de fuentes de datos heterogéneas	102
6.4.	Tecnologías de Visualización Semántica	105
6.4.1.	Resaltado semántico de elementos virtuales	107
6.4.2.	Adaptar interfaces gráficos	109
6.4.3.	Nivel de detalle semántico	111
6.5.	Resumen	112
7.	Análisis y Comportamiento de los Algoritmos	115
7.1.	Algoritmos en Entornos Forestales	116
7.1.1.	Pendientes del Terreno	116
7.1.2.	Vegetación (Combustible)	119
7.1.3.	Dirección y Velocidad del Viento	122
7.1.4.	Spotting Fires en Entornos Forestales	123
7.1.5.	Agentes Extintores y Efecto Evaporación	124
7.2.	Algoritmos en Entornos Urbanos	127
7.2.1.	Pendiente y Condiciones del Viento	127

7.2.2.	Propagación y Extinción en <i>FloorUnit</i>	129
7.2.3.	Propagación Horizontal y Vertical en un Edificio	129
7.2.4.	Propagación a Distancia: Spotting Fires	133
7.2.5.	Transición Entorno Forestal y Urbano	135
7.3.	Rendimiento de los Algoritmos	136
7.3.1.	Tamaño de Celda del Terreno	138
7.3.2.	Paso de Integración	138
7.3.3.	Análisis del Rendimiento	138
7.3.4.	Almacenamiento o Cálculo de las Pendientes	140
7.3.5.	Consideraciones al Respecto de la Aleatoriedad	141
7.3.6.	Programación Paralela	141
7.4.	Resumen	143
8.	Validación	145
8.1.	Contrastación de los algoritmos forestales	145
8.1.1.	FARSITE	146
8.1.2.	Escenario de la Comparativa	147
8.1.3.	Resultados	148
8.2.	Contrastación de los algoritmos urbanos	149
8.2.1.	Escenario de la Comparativa	149
8.2.2.	Resultados	151
8.3.	Valoración Externa	152
8.3.1.	Escenarios	155
8.3.1.1.	Escenario forestal	155
8.3.1.2.	Escenario urbano	157
8.3.1.3.	<i>Decision Making</i>	157
8.3.2.	Valoración de los expertos	159
8.4.	Migración de Aplicaciones a la Web	162
8.5.	Otros escenarios de demostración	162
8.6.	Resumen	164
9.	Conclusiones y Trabajo Futuro	165
9.1.	Conclusiones	165
9.1.1.	Algoritmos interactivos de propagación de incendios	165
9.1.2.	Algoritmos de extinción de incendios	166
9.1.3.	Geoinformación y modelado semántico	167

9.1.4. Visualización adaptada al rol del usuario	168
9.1.5. Sistema de Realidad Virtual	168
9.2. Contribuciones	168
9.2.1. Publicaciones Directamente Relacionadas con la Tesis . . .	169
9.2.2. Publicaciones Complementarias	171
9.3. Trabajo Futuro y Líneas de Investigación Abiertas	172
A. Glosario de Términos	175
A.1. Terminología Básica	175
A.2. Other Terms	176
B. Tipología de los Datos de Entrada	191
B.1. Uso del Suelo	191
B.2. Tipos de Combustible	193
B.3. Agentes extintores y factores respecto al Agua	193
C. Especificaciones XML de los Datos de Entrada	197
C.1. XML de Alto Nivel	197
C.1.1. Elevación del Terreno	198
C.1.2. Definición de la Escena	198
C.2. XML de Bajo Nivel	198
Bibliografía	201

Índice de figuras

1.1. Incendios Forestales en Europa hacia finales de Marzo de 2012 y edificio en llamas tras el terremoto de Japón.	2
1.2. Simuladores de vehículos para formación.	4
2.1. Ejemplos de sistemas de simulación basados en algoritmos complejos.	13
2.2. Simulación utilizando el modelo diseñado por Achtemeier.	17
2.3. Distintos mecanismos de propagación de incendios urbanos.	19
2.4. Representación Cuadrículada, Hexagonal y Triangular.	23
2.5. Subdivisión irregular del terreno basada en diagramas de Voronoi.	24
2.6. Subdivisión irregular en áreas urbanas basada en la planta de los edificios en contraposición de una subdivisión regular.	25
3.1. Organigrama funcional del SPEIS de San Sebastián (Servicio de Prevención, Extinción de Incendios y Salvamentos).	30
3.2. Organización organizativa y operativa del Cuerpo de Bomberos de Madrid.	32
3.3. Ejemplos de juego comercial y aplicación didáctica.	34
3.4. Simuladores de extinción de incendios de la empresa <i>Cultimedia</i>	35
4.1. Máquina de estados finita que representa los estados de las celdas y las transiciones permitidas.	42
4.2. Comportamiento elíptico de la simulación, comparado con el comportamiento teórico.	43
4.3. Simulación en un terreno con distintos tipos de pendiente.	47

4.4. Visualización del comportamiento de la propagación por <i>Spotting Fires</i> . Las celdas del río representan mediante las barras amarillas el valor de <i>crossingIntensity</i>	50
5.1. Mecanismos de propagación de incendios en sentido vertical	61
5.2. Tipos de celdas de vegetación: <i>SecureUnit</i> , <i>WoodenUnit</i> y <i>Shant-yUnit</i>	64
5.3. Esquemas de evolución de la intensidad de fuego (<i>FirePower</i>) para la celda <i>SecureUnit</i> y la celda <i>WoodenUnit</i>	66
5.4. Diagrama del comportamiento de los chorros de agua (<i>WaterJet</i>). . .	75
6.1. Arquitectura del sistema	81
6.2. Visualización de los datos cartográficos del País Vasco.	89
6.3. Datos de clasificación de terreno de la zona de San Sebastián. . . .	90
6.4. Reconstrucción de los edificios de San Sebastián en base a extrusión de las proyecciones en planta y altura fija.	91
6.5. Resumen de las fuentes de datos necesarias para reconstruir el terreno.	92
6.6. OpenFireMap muestra la localización de estaciones de bomberos y de varias bocas de riego en Nuremberg (Alemania) utilizando los datos de OpenStreetMap. DC Water ofrece un fichero KML con la localización de bocas de riego y su estado de mantenimiento. . . .	93
6.7. La capa semántica y los distintos tipos de información utilizados en el simulador.	98
6.8. La categorización semántica mapea las entidades UML en el sistema de Realidad Virtual.	101
6.9. Fichero SHP de Gobierno Vasco (OpenData) y los datos de OpenStreetMap	103
6.10. Diagrama del proceso de generación del modelo 3D	104
6.11. Fichero SHP resultado tras mezclar ambas fuentes de datos. Modelo DSM de donde se obtiene la altura de los edificios. Resultado final de la reconstrucción 3D de San Sebastián.	106
6.12. Resaltado semántico de elementos virtuales.	108
6.13. Requisitos de GUI y HUD para una serie de roles de usuario y tareas.	110
6.14. Nivel de detalle en los datos geográficos (CityGML).	112

7.1. Referencias de orientación en los escenarios de celdas.	116
7.2. Simulación sin viento ni pendiente.	117
7.3. Evolución de la intensidad del fuego (<i>FirePower</i>) y el combustible en dos celdas.	118
7.4. Simulación sin viento de terrenos con pendiente.	119
7.5. Cuatro <i>steps</i> de la evolución del fuego en terreno horizontal sin viento. En cada imagen, cada tira vertical corresponde a un tipo distinto de vegetación.	120
7.6. Simulación con diferentes orientaciones en un terreno horizontal .	121
7.7. Simulación con diferentes pendientes y viento constante.	122
7.8. Pasos de la propagación del fuego pendientes 60° y viento constante.	123
7.9. Simulación con terreno horizontal con cambio de dirección de viento, de dirección Sur a Oeste.	123
7.10. Simulación con terreno horizontal, con viento ligero dirección Sur y con un barrera transversal.	125
7.11. Simulación del proceso de extinción bajo diferentes condiciones de extinción.	128
7.12. Evolución del fuego en una <i>FloorUnit</i> , con y sin agente extintor .	130
7.13. Propagación horizontal de un incendio urbano	131
7.14. Propagación vertical de un incendio urbano	132
7.15. Propagación a distancia (<i>SpottingFires</i>) de un edificio a otro. . . .	133
7.16. Modelo de <i>spotting fires</i> (los rectángulos representan edificios). . .	135
7.17. Propagación del entorno urbano al forestal.	136
7.18. Propagación del entorno forestal al urbano.	137
7.19. Análisis del rendimiento de diferentes incendio forestales.	139
8.1. FARSITE utiliza el principio de Huygens para la simulación de la propagación del fuego que se ve reflejado en los pseudo-algoritmos.	146
8.2. Descripción del escenario incluido en la instalación de la aplicación FARSITE.	147
8.3. Simulación realizada por FARSITE utilizando un viento constante durante toda la simulación.	148
8.4. Simulación de una porción del escenario obtenido de FARSITE. .	149
8.5. Propagación de incendio urbano en la ciudad de Kobe (Japón) tras un terremoto.	150
8.6. Escenario urbano generado para realizar la simulación.	151

8.7. Comparativa cualitativa entre los resultados de la simulación en entorno urbano.	153
8.8. Simulación del escenario urbano de Japón con condiciones extremas y gráfica de rendimiento.	154
8.9. Algunas de las instalaciones del Centro Jovellanos.	155
8.10. Escenario forestal y urbano en el simulador interactivo desde el punto de vista de los usuarios.	156
8.11. Aplicación de investigación como soporte a la toma de decisiones (modo edición 2D y visualización en 3D de la simulación).	158
8.12. Sesión final en las instalaciones del Centro Jovellanos, donde se realizaron las pruebas con expertos.	159
8.13. Migración de la visualización de propagación de incendios a la Web gracias al framework ReWeb3D.	161
8.14. Escenarios reales en el monte Ulía y parte vieja de San Sebastián.	163
B.1. Clasificación jerárquica del uso del suelo según CORINE, identificadores utilizados en los datos del Gobierno Vasco y un ejemplo de visualización del uso del suelo.	194
B.2. Parámetros de los distintos tipos de combustible definidos por el Departamento de Agricultura de EE.UU.	196
B.3. Varios tipos de agentes extintores.	196

Índice de tablas

6.1. Resumen de distintos tipo de información geográfica.	84
6.2. Comparación de estándares de modelado 3D.	96
7.1. Tabla de propagación a distancia entre edificios situados a diferentes distancias y con diferentes velocidades de viento (en dirección favorable).	134
7.2. Propagación de un incendio en un edificio al exterior según el piso de inicio y la velocidad del viento existente.	136
7.3. Factores de probabilidad utilizados en esta tesis.	141
B.1. Extracto de los tipos de suelo definidos por la base de datos CORINE.	192
B.2. Mapeo de los tipos de combustible de Rothermel a los definidos por el Departamento de Agricultura de EE.UU y en la tesis.	195
B.3. Varios tipos de agentes extintores y el factor asignado respecto al comportamiento del Agua.	195

Índice de algoritmos

4.1. Algoritmos del paso de simulación, la actualización de la intensidad y estado de una celda de vegetación y el proceso de expansión del fuego a una celda vecina.	44
4.2. Selección de celdas vecinas para su propagación según la pendiente y el viento.	46
4.3. Selección de celdas cercanas para su propagación a distancia y los métodos <i>updateState</i> e <i>igniteFire</i> de las celdas de las barreras. . .	49
4.4. Proceso de Evaporación que invoca al proceso de extinción de cada celda.	52
5.1. Algoritmo de la actualización (<i>updateState</i>) de las celdas de los edificios.	65
5.2. Algoritmos para el cálculo del combustible inicial según el tipo de material y el máximo <i>FirePower</i>	68
5.3. Algoritmos propagación horizontal y vertical en edificios.	70
5.4. Algoritmos de propagación por <i>Spotting Fires</i> y de <i>Building a Vegetación</i>	71
5.5. Algoritmo del proceso de extinción con agentes extintores.	74
5.6. Algoritmo del comportamiento del modelo <i>WaterJet</i>	76
7.1. Algoritmo que muestra cómo paralelizar la actualización de las celdas mediante el uso de un <i>ThreadPool</i>	142
C.1. XML de alto nivel definiendo un ejemplo sencillo.	199
C.2. XML de bajo nivel.	200

Capítulo 1

Introducción y Contexto

Los incendios son uno de los desastres naturales cuyo impacto se puede considerar muy alto, ya sea por la pérdida de vidas humanas, las pérdidas económicas, o el impacto medioambiental (ver figura 1.1). La previsión y el cuidado de los bosques evita en mayor medida la aparición de incendios forestales y, en caso de ocurrir alguno, de limitar las consecuencias y alcance del mismo. En entornos urbanos, las medidas de prevención, el continuo mantenimiento de las mismas (inspecciones regulares, control periódico, etc.) y una educación constante a los ciudadanos permiten reducir el riesgo de aparición de incendios de una entidad suficiente para poner en riesgo la integridad estructural del propio edificio o de los colindantes.

El control y la extinción de incendios se encuadra dentro de la categoría de “*Gestión de Emergencias y Protección Civil*”, que incluye múltiples aspectos relacionados con la Seguridad de la Sociedad Civil: alertas meteorológicas, inundaciones, vertidos tóxicos en ríos y mar, robos y asaltos, terremotos, alertas de terrorismo e incendios, tanto forestales, como urbanos e industriales, etc.

La Gestión de Emergencias requiere una colaboración mutua y coordinada entre distintos organismos públicos, como la Policía en sus múltiples jurisdicciones, Cuerpos de Bomberos, Unidades especiales de Rescate, Institutos Meteorológicos, etc. de forma que la respuesta ante una emergencia sea lo más rápida y eficiente posible.

Aun con los mejores sistemas de protección y prevención, las emergencias ocurrirán eventualmente, por lo que los protocolos de actuación frente a emergencias se pondrán en marcha. Por lo general, los protocolos de actuación ante las emergencias están basados en reglamentos y normativas a nivel estatal o europeo, pero necesariamente se tendrán que adaptar ciertos detalles particulares asociados a la

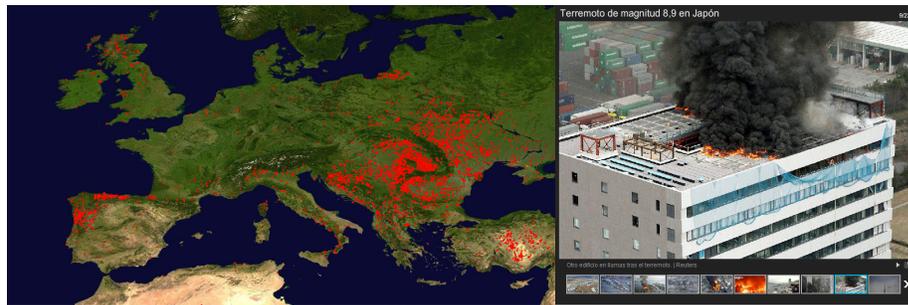


Figura 1.1: Izquierda: Incendios Forestales en Europa hacia finales de Marzo de 2012 (*MODIS Global Fire Maps* de la NASA). Derecha: Edificio en llamas tras el terremoto de Japón (Marzo de 2011).

zona de aplicación o influencia, ya sea por necesidades geográficas (relieve, existencia de costas, etc.), por necesidades de la distribución de la población (densidad de población, existencia de rascacielos, etc.) o por existencia de determinadas instalaciones de carácter especial (estadios de fútbol, polígonos industriales, centrales eléctricas o nucleares, etc.).

Una de las emergencias con una ocurrencia mayor es la aparición de incendios forestales y, en menor medida, de incendios urbanos. Esto ocurre especialmente en zonas con clima caluroso como puede ser la franja mediterránea (desde Portugal hasta Grecia), donde prácticamente cada verano se producen múltiples incendios forestales (ya sea por causas naturales o provocados).

Los cuerpos de bomberos son los encargados de responder ante la eventual aparición de un incendio, situación para la cual los distintos componentes humanos y técnicos deben estar convenientemente preparados.

Por lo general, la formación práctica en la gestión de emergencias (como lo es un incendio) sólo se da en dos escenarios diametralmente opuestos: ante una situación real y en simulacros programados y bajo control. Las situaciones reales no son el mejor escenario para practicar técnicas y aplicar los contenidos teóricos recibidos en los cursos de formación, en parte, por el extremo peligro que una situación real conlleva y porque no son repetibles en las mismas condiciones. Los simulacros sí cumplen con estas dos premisas, pero su complejidad y realismo están bastante alejados de lo que se consideraría como adecuado.

Esta tesis se centra en un nuevo tipo de escenarios: las simulaciones virtuales como ayuda al entrenamiento y formación de bomberos. Los dos primeros esce-

narios (situaciones reales y simulacros) se analizan en el capítulo 3 y la necesidad y motivación para este tercer tipo de escenarios (simulación virtual) se esboza en esta misma introducción. A lo largo de la tesis se irá desarrollando con mayor detenimiento.

1.1. Sistemas de Simulación Virtual como Ayuda a la Formación

La utilización de sistemas de simulación virtual ha experimentado un gran avance en los últimos años. El incremento de las capacidades técnicas, tecnológicas y computacionales de los ordenadores ha permitido ir incrementando el realismo, la inmersión y, en definitiva, mejorar las experiencias suministradas por los sistemas de simulación. Actualmente, la utilización de simuladores se considera como una herramienta útil y práctica en el entrenamiento y aprendizaje del uso de vehículos o el desarrollo de tareas peligrosas. También es muy común el uso de simuladores en el sector de la construcción, donde el manejo y conducción de distintos tipos de maquinaria se realiza primero en simuladores, de forma que se consiguen varios objetivos: *i)* reducir el riesgo de accidentes durante las prácticas y *ii)* ahorrar en coste de utilización y desgaste de maquinaria real.

Una de las grandes ventajas consiste en que los sistemas de simulación virtual permiten ofertar una mayor variedad de ejercicios a los alumnos, ya que los ejercicios o prácticas reales no pueden llegar a ser tan complejos como los instructores deseen. Los simuladores de conducción han explotado esta característica ampliamente, permitiendo a los instructores diseñar sus propios recorridos y escenarios a través de editores específicos para el simulador de conducción [1] o navegación [2]. De esta manera, cada usuario o centro formativo puede ajustar sus ejercicios prácticos virtuales a sus necesidades. A su vez, la creación de escenarios personalizados se ha convertido en un modelo de negocio [3], donde el valor añadido se encuentra en los contenidos, y no en el propio simulador de conducción. Otro ejemplo es el proyecto VarTrainer [4], donde proponemos un simulador temático centrado en el sector de la construcción.

Los simuladores virtuales además de ser una herramienta interesante en las fases iniciales de la formación, son también muy interesantes en los procesos de reciclaje. También son un apoyo importante para entrenar a los profesionales cuando se introducen nuevas normativas. Un ejemplo es la introducción del concepto



Figura 1.2: Simuladores de vehículos para formación. Izquierda: Simulador de *Autosim*. Derecha: Simulador de *Virage Simulation*.

de conducción ecológica [5], que intenta fomentar una conducción respetuosa con el medio ambiente mediante sencillas medidas y reglas a tener en cuenta durante la conducción.

La característica principal común a todo simulador es la interactividad, que permite al usuario actuar de forma instantánea sobre el mundo virtual y obtener una retroalimentación continua de cada una de las acciones realizadas. El ejemplo más claro se puede encontrar en los simuladores de conducción, donde el usuario actúa sobre el pedal acelerador (físico) y dicha acción se ve reflejada de forma inmediata en la aceleración del vehículo virtual.

El problema objetivo de la tesis está mucho menos estudiado e investigado que los simuladores de conducción (ver capítulo 3), pero es fácil intuir que la versatilidad que ofrecen los sistemas virtuales también puede beneficiar a los sistemas de control y extinción de incendios. Esta tesis propone un sistema de simulación virtual de la propagación y extinción de incendios forestales y urbanos para ayudar a la formación y al entrenamiento de bomberos.

1.2. Motivación

La formación de los bomberos difiere sustancialmente de la formación orientada a otros sectores profesionales. La propia existencia de un fenómeno natural, peligroso y extremadamente complejo de modelar como es el fuego, limita en gran medida la formación práctica que se imparte tanto a nuevos bomberos como a bomberos ya experimentados que requieren de una actualización de los métodos y

tecnologías. Este comportamiento complejo del fuego se observa en la dificultad para predecir la evolución de un incendio. Por lo general, los sistemas de predicción son procesos complejos cuyos resultados tienen una validez limitada en el tiempo y en el espacio. En el caso de la predicción meteorológica, su modelado matemático depende de muchas variables, unas desconocidas y otras difíciles de calcular, y su validez no va más allá de siete días y con un rango de probabilidades de acierto decreciente. En el caso de la predicción de la evolución de incendios, las predicciones son válidas para ventanas de tiempo aún menores.

Un simulador virtual para entrenamiento de bomberos necesita ser interactivo, como todo simulador virtual, y esto incluye la simulación de la evolución en el tiempo de los incendios. La propia naturaleza compleja del comportamiento del fuego choca con los requisitos de interactividad y tiempo real de los simuladores virtuales. Por lo tanto, ciertas simplificaciones en los modelos matemáticos son necesarias, a menos que se utilicen superordenadores como Wenish et al. [6] hicieron para utilizar modelos complejos de manera interactiva.

Los modelos matemáticos clásicos, orientados a la predicción, son matemáticamente complejos e incompatibles con los requisitos de interactividad. Sin embargo, son útiles para el análisis de zonas de riesgo, sirviendo para detectar situaciones o localizaciones geográficas concretas donde la probabilidad de incendios sea alta, y actuar en consecuencia. Pero dichos modelos no son ágiles cuando un incendio está ya iniciado o cuando se desea aplicarlos en simulación, pues no hay tiempo suficiente para obtener resultados utilizables de forma rápida. Para abordar este problema, se ha optado por reducir la complejidad y cantidad de los datos iniciales, consiguiendo acortar los tiempos de simulación. En el capítulo 7 se analiza cómo afecta esta simplificación a los resultados.

La interactividad en la simulación requiere que el sistema sea capaz de responder a los cambios en los datos de entrada de manera continua, como puede ser los cambios de dirección y velocidad del viento. Pero más importante es poder responder de manera inmediata a las acciones de los usuarios. En este sentido, un simulador de propagación de incendios orientado a la formación de bomberos requiere de la intervención de los usuarios para poder interactuar con el fuego, apagándolo o intentando contenerlo, o simplemente gestionando los recursos disponibles para combatir un incendio en curso.

Se pueden distinguir dos grandes grupos en los perfiles de los profesionales que asisten a los procesos formativos y entrenamiento de los bomberos: los bomberos que están a pie de campo y los mandos intermedios encargados del control de los

recursos a una escala global, cada uno con unas características y requisitos formativos particulares. Los simuladores requeridos en cada perfil tienen características específicas. Uno de los requisitos en común es que **dependen de la existencia de un subsistema que permita la simulación de la evolución de un incendio y que responda de manera interactiva a las acciones de los usuarios**. Por supuesto, la calidad de los resultados obtenidos de la simulación es importante, y por lo tanto, habrá que obtener métodos que permitan simular el comportamiento de la forma más realista posible cumpliendo las restricciones de tiempo real e interactividad.

1.3. Objetivo de la Tesis

El objetivo de esta tesis es aportar una metodología soportada en algoritmos y técnicas avanzadas que sirvan para desarrollar simuladores virtuales interactivos de la propagación y extinción de incendios forestales y urbanos. Estos simuladores están orientados a la formación práctica y entrenamiento de bomberos, tanto en prácticas de campo como en cursos de tácticas y gestión de recursos.

Los algoritmos de propagación de incendios deberán contemplar las variables físicas que más influyen. Además, deben permitir a los usuarios interactuar con el sistema, siendo la extinción y contención del incendio las tareas más relevantes que deberán llevar a cabo.

Los objetivos específicos de esta tesis son:

- Ofrecer algoritmos que simulen la propagación y extinción de incendios y que sean compatibles con sistemas de simulación interactivos.
- Integración con sistemas GIS existentes, para la construcción de escenarios reales donde realizar simulaciones.
- Desarrollar el entorno de visualización virtual que permita a los usuarios interactuar con los algoritmos y los escenarios según distintos roles.

1.4. Organización de la Tesis

Este documento se organiza en 9 capítulos, siendo el primero de ellos esta introducción.

El capítulo 2 recoge una selección de trabajos científicos orientados a los métodos de propagación de incendios.

En el capítulo 3 se comentan las distintas formas de entrenamiento que actualmente existen en los centros de formación de bomberos (así como la organización y roles en los cuerpos de bomberos). Seguidamente se enlazan las necesidades formativas actuales y sus métodos con el uso de simuladores virtuales y el objetivo de esta tesis. Además, sirve para introducir la terminología más utilizada en este sector.

La parte central de esta tesis la componen los capítulos 4 y 5 donde se presentan los algoritmos de propagación de incendios tanto en entornos forestales como urbanos. En el capítulo 6 se analiza el acceso a los datos geográficos, los problemas de heterogeneidad entre distintas fuentes de datos y se ofrece una solución metodológica basada en conceptos semánticos de los datos geográficos.

Los capítulos 7 y 8 muestran los resultados y la validación de los algoritmos presentados, finalizando con las conclusiones y el trabajo futuro en el capítulo 9.

1.5. Terminología Relacionada

A continuación se introducen una selección de términos y conceptos relacionados con los incendios, que serán utilizados continuamente a lo largo de las siguientes secciones. Una lista más completa se puede encontrar en el Anexo A [7, 8].

- **Simulación Interactiva:** Una simulación que muestra cambios en la salida gráfica producida según se producen dichos cambios. Típicamente, la respuesta ante las acciones de usuarios requieren un *feedback* inmediato para no romper la experiencia de los usuarios.
- **Simulación en Tiempo Real:** Una simulación que utiliza una escala temporal real, de forma que un 1 segundo de simulación corresponde con 1 segundo para los usuarios.
- **Simulación Interactiva en Tiempo Real.** Se considera que una simulación es interactiva en tiempo real si es una simulación en tiempo real, en la que los usuarios pueden cambiar elementos y/o parámetros de la misma y la simulación responde ante estos cambios de manera inmediata. Por simplicidad, en esta tesis consideramos que una simulación es interactiva y en tiempo real si va más rápido que el tiempo real (por ejemplo, simulando 1 hora en 1 minuto).

- **Modelos VR:** Modelos matemáticos y/o algoritmos que se han concebido para ser utilizados en simulaciones interactivas o de Realidad Virtual.
- **Incendio forestal:** Aquel que ocurre en terreno abierto o en zonas montañosas, ya sean zonas compuestas por árboles altos y frondosos o zonas de arbustos o prados.
- **Incendio mixto:** Aquel incendio que ocurre en una zona que se puede considerar forestal pero que también existen edificios.
- **Incendio urbano:** Aquel incendio que afecta a edificios en entornos puramente urbanos (ciudades, pueblos). Los bordes exteriores de los incendios urbanos se pueden considerar incendios mixtos, al poderse propagar de los edificios a la vegetación y viceversa.
- **Terreno:** El terreno es la extensión de superficie donde los incendios tienen lugar, e incluye tanto la extensión quemada, como la potencialmente afectada por el incendio.
- **Pendiente del Terreno:** Una de las características principales del terreno es la pendiente del terreno, que se indica de manera vectorial, a través de un vector unitario perpendicular al terreno.
- **Intensidad del fuego:** Es una cantidad de calor liberado por un incendio e incluye tanto el calor radiante y el de convección. En esta tesis, la intensidad del fuego es la correspondiente al calor radiante por la combustión (*radiant intensity*). Se mide en kW/m o $kcal/(m \times s)$ según la fórmula $Heat\ Yield\ (kcal/g) \times Available\ Fuel\ (g/m^2) \times Rate\ of\ spread\ (m/s)$.
- **Evolución del fuego:** Evolución en el tiempo de la posición, intensidad y estado de los focos de fuego de un incendio, comúnmente denominado “frente del incendio”. La velocidad de avance se mide en m/min (metros por minuto).
- **Spotting Fires:** Propagación de un incendio por medios aéreos, que involucra el transporte de material ardiendo o brasas y el posterior inicio de un nuevo foco activo.
- **Combustible:** Término general que engloba a todos los elementos susceptibles de ser incendiados. Los árboles, arbustos y matorros son combustibles

que tendrán distintas propiedades, en cantidad y velocidad de combustión. La cantidad de combustible se mide en kg y la densidad en kg/m^2 .

- **Agente extintor:** Término para referirse a los compuestos que se utilizan para combatir el fuego. En esta tesis nos referiremos a los agentes extintores como *Agua*. Se trata en este caso de un término genérico, descriptivo y fácil de entender. La capacidad de extinción de cada agente extintor se define como *Fire Rating*.
- **Proceso de extinción:** Acciones que se realizan para combatir o contener un incendio activo.
- **Evaporación:** El proceso de paulatina desaparición de agente extintor. Por ejemplo, el agua en estado líquido depositada en el suelo pasa a gaseoso (vapor) por la temperatura generada por focos activos cercanos.
- **Edificio:** Estructura construida, ya sea de una sola planta o de varias. Cada planta se considera subdividida en elementos simples que aproximan la estructura de la planta (más adelante se expone esta estructura de celdas). Cada tipo de edificio se comportará de manera distinta, habiendo edificios que pueden llegar a colapsar.
- **Fachada:** Cada uno de los lados de un edificio que dan al exterior.

Capítulo 2

Modelos de Simulación de la Propagación de Incendios

Históricamente, la simulación del avance de los incendios ha estado siempre presente en la comunidad científica habida cuenta de la importancia social y económica de las consecuencias de los incendios, ya sean forestales o urbanos. A mediados del siglo XX, se inició lo que se puede denominar la *época moderna* del análisis de incendios, realizándose multitud de estudios sobre el comportamiento de los incendios. Rothermel [9] presentó un modelo puramente matemático para predecir el avance del fuego forestal, que fue y sigue siendo referencia hoy día.

En los últimos 40 años, se ha avanzado en el entendimiento de los comportamientos físicos involucrados en el caos existente en los incendios, la aplicación de mecánica de fluidos, el uso de información geográfica y meteorológica, mejorando sustancialmente alguna de las carencias de los modelos de predicción precedentes. Pero si algo tienen en común todos los sistemas de simulación del avance de los incendios es su alto requisito de computación, impidiendo su uso en sistemas interactivos.

En este capítulo, primero se exponen estos modelos matemáticos de alta complejidad, que no son compatibles con la interactividad requerida en los sistemas de entrenamiento propuestos como objetivo de esta tesis. Posteriormente se revisan los distintos sistemas que han aportado soluciones parciales a este mismo problema y que son el punto de partida para esta tesis.

Asociado a estos métodos orientados a la interactividad, se abordan las distintas formas de presentación de información geográfica, así como sus ventajas e

inconvenientes.

2.1. Algoritmos Matemáticos Complejos

Una de las principales motivaciones para investigar la evolución de los incendios fue la de estudiar este fenómeno natural para poder predecir su evolución en el tiempo. Los objetivos concretos que se buscaron eran básicamente dos: *i*) detectar zonas de alto riesgo (como acción preventiva), simulando diversos incendios con diferentes condiciones iniciales y *ii*) dada una situación concreta, evaluar cual sería su evolución en las próximas horas o días.

A día de hoy, se consideran dos grandes grupos de modelos que aproximan la evolución de los incendios.

El primer gran grupo lo componen los modelos empíricos. Los modelos empíricos o analíticos se basan en las experiencias reales del fuego. Estos modelos utilizan las relaciones estadísticas existentes entre la evolución del fuego y los diferentes parámetros testados en campo [9]. Se puede mencionar *FARSITE* [10] como un ejemplo de este tipo de modelos, que utiliza el principio de Huygens de la propagación de ondas.

El segundo tipo son los modelos basados en la física, que utilizan mecanismos de transferencia de calor y convección para calcular el avance del fuego. Una de sus mayores desventajas es su alto costo computacional por el uso de métodos de computación de la dinámica de fluidos (*CFD*, *Computational Fluids Dynamics*). Tanto *Fire Dynamic Simulator* (*FDS*, *National Institute of Standards and Technology – NIST*) como *FIRETEC* [11] pertenecen a este grupo. Huang et al. [12] y Sanderlin et al. [13] basan sus trabajos en este tipo de métodos.

Hay trabajos de autores como los de Seron et al. [14] y Ferragut et al. [15, 16] que aunque se encuadran dentro de los modelos basados en física, tienen una componente empírica que los convierte en modelos híbridos.

La ventaja de todos estos modelos es la precisión en la predicción del avance del fuego, pero a un coste computacional muy alto. Los modelos matemáticos subyacentes son de una complejidad tan alta que los ordenadores sólo pueden ofrecer soluciones aproximadas [17]. Además, para obtener resultados buenos cualitativamente hablando, necesitan tener datos de entrada adecuados y una resolución espacial elevada. Como consecuencia directa, los resultados obtenidos de este tipo de modelos de predicción de avance de fuego están influenciados por la calidad de los datos de entrada, incluida la resolución del terreno, el material combustible que

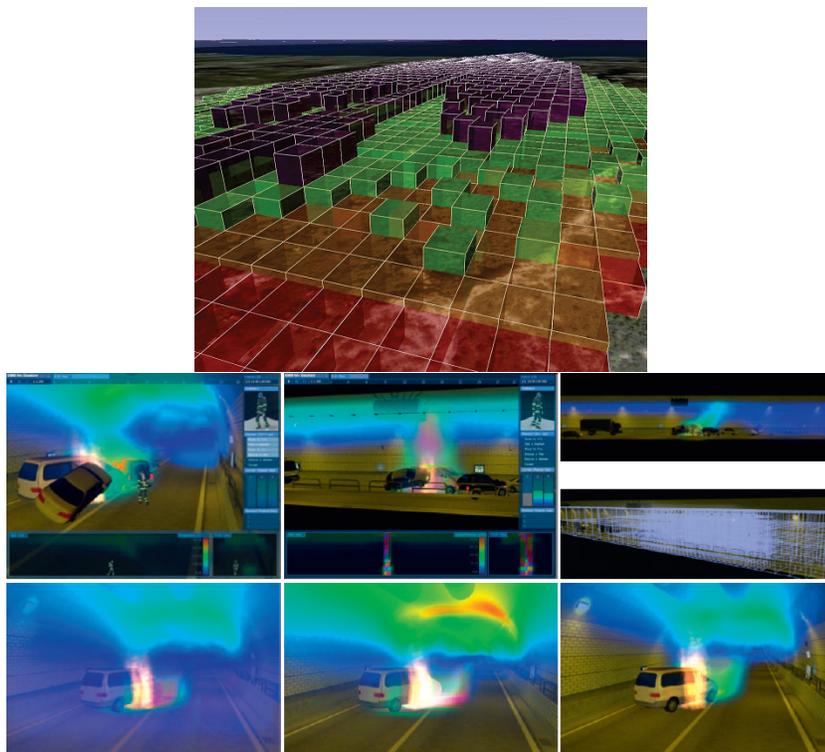


Figura 2.1: Ejemplos de sistemas de simulación basados en algoritmos complejos. Arriba: Visualización de simulaciones con *BEHAVE* utilizando datos geográficos reales [18]. Abajo: Sistema de Realidad Virtual semi interactivo con datos de propagación precalculados [19].

contiene y las condiciones meteorológicas y ambientales.

En entornos forestales los trabajos de Kose et al. [18] utilizan *BEHAVE* como pieza clave para el cálculo de la propagación de incendios forestales utilizando datos geográficos existentes (ver parte superior de la figura 2.1).

De una manera general, todos estos modelos matemáticamente complejos se pueden ver como algoritmos de procesamiento iterativo, donde en cada instante se calcula cual es el estado siguiente, que a su vez, será entrada para la próxima iteración del modelo. En situaciones no triviales, el coste computacional de un paso del algoritmo superará con creces al tiempo simulado, es decir, la simulación de un paso de tres minutos podría durar bastante más (en condiciones y situaciones no triviales). Esta característica de los modelos de evolución del fuego impide una

generalización de su uso en sistemas interactivos, donde en cada iteración del algoritmo, los datos de entrada de los modelos pueden variar por acciones externas, como pueden ser las realizadas por los usuarios.

Una característica básica de la simulación interactiva es que las modificaciones arbitrarias de los datos de entrada disponibles tengan un reflejo casi inmediato en los resultados obtenidos por el modelo. Se distinguen dos situaciones, la interactividad debida a las acciones de los usuarios y la ocasionada por otros actores sin intermediación humana. Dentro de este último grupo, podemos encuadrar principalmente a los cambios meteorológicos (cambios de viento, precipitaciones, humedad, etc.), que modificarán necesariamente la evolución del incendio. También los cambios en los datos geográficos estarían en esta categoría como, por ejemplo, la construcción de cortafuegos provisionales como táctica para intentar apagar o contener un incendio.

Moohyun Chaa et al. [19] utilizan un sistema basado en algoritmos complejos (*CFD*) para precalcular el avance tanto del fuego como del humo asociado en un entorno concreto (un túnel). El sistema virtual que ofrecen no presenta capacidades interactivas, al ser datos precalculados (ver parte inferior de la figura 2.1).

Existen soluciones concretas para poder realizar simulaciones con cambios dinámicos de los datos junto con los modelos de alta complejidad. El más común es la utilización de líneas temporales donde se añaden previamente la secuencia de eventos que ocurren a lo largo de toda la simulación. De esta manera, se puede indicar al sistema que en el minuto 100 de la simulación, el viento rolará al Este con un velocidad de 3 nudos y que en el minuto 4000, un cortafuegos de tales dimensiones será construido en unas coordenadas concretas. Goldberg [20] analiza en detalle las tareas en las que se desglosa el despliegue de efectivos y recursos desde un punto de vista operativo, desde el aviso inicial del descubrimiento del foco activo hasta el final del proceso.

Los cambios del sistema realizados por el usuario de manera interactiva no pueden ser previstos de antemano, por lo que la existencia previa de una línea temporal de eventos no permite una interactividad total con el sistema de simulación. Así pues, para poder obtener interactividad real, la única solución es reducir el tiempo de computación de cada iteración del modelo.

Básicamente, el tiempo requerido para la ejecución de una iteración de los modelos se puede desglosar en tres apartados: *i*) complejidad del modelo, relacionada con el número de variables consideradas en él, *ii*) cantidad de datos disponibles y su resolución espacial, y *iii*) tiempo considerado en cada iteración.

Consideraremos *Modelos VR* a aquellos modelos que permitan la simulación de la evolución de los incendios de manera interactiva.

En el siguiente apartado se comentarán una serie de *Modelos VR* que han ido surgiendo para poder solucionar este problema.

2.2. Algoritmos Matemáticos Orientados a VR

En contraste con los modelos complejos comentados en el apartado anterior, otros trabajos de investigación han buscado un objetivo distinto: basarse en modelos matemáticos sencillos o heurísticos que permitan un procesamiento mucho más rápido y ágil de la evolución del fuego. Este objetivo es un requisito necesario para aplicaciones interactivas en entornos VR.

En los siguientes apartados se comentarán las características de los métodos y trabajos más relevantes para los objetivos planteados en esta tesis.

2.2.1. Cálculo del Frente de Fuego

De una manera similar a los sistemas *FARSITE* o *BEHAVE*, algunos autores como Fried et al. [21] han tratado de realizar aproximaciones menos costosas computacionalmente, aún basándose en los mismos principios básicos. Basaron sus métodos en cómo calcular el frente de un incendio a lo largo del tiempo, siendo su objetivo el desarrollar un algoritmo que permitiera la simulación de las distintas tácticas de contención del fuego (directo, indirecto, paralelo o desde atrás), centrándose en el denominado *Tail attack*.

Fried et al. utilizaron la forma elíptica que toman los incendios de una manera natural (en condiciones normales) y sin ninguna intervención. En este caso, el eje mayor de la elipse correspondería a la dirección del viento, teniendo la pendiente del terreno un peso menor. La excentricidad de la elipse estaría en función de la velocidad del viento y de la pendiente del terreno. El algoritmo que propone va obteniendo iterativamente la localización y características del frente de fuego o perímetro. Estos algoritmos pueden utilizarse para evaluar los conocimientos teóricos de los bomberos o jefes de brigada o para optimizar y refinar determinadas tácticas ante una situación concreta.

2.2.2. Autómatas Celulares

Karafyllidis et al. [22] fueron de los primeros autores que utilizaron autómatas celulares para representar el estado y avance de los incendios en un ámbito puramente forestal. Los datos de terreno se mapean en una rejilla regular, diseñando un algoritmo que va actualizando dicha rejilla de una manera iterativa (paso a paso). El modelo presentado utiliza el viento y la pendiente como variables físicas básicas, aunque también influye la temperatura. El avance del fuego se modela en base a una regla que tiene en cuenta las celdas vecinas, calculando el tiempo en quedar totalmente quemada. Este modelo bastante simple, permite la simulación del avance del incendio en bosques no uniformes (con distinta potencia de fuego, *FireRate*), rodear zonas no combustibles y utilizar el viento y la pendiente para modificar la dirección y velocidad de propagación.

Posteriormente, Berjak et al. [23] mejoraron alguna de las carencias del modelo presentado por Karafyllidis. Por un lado, incorporó el modelo de combustibles definido por Rothermel [9], ya que el modelo de Karafyllidis no hace distinción entre los distintos tipos de combustible (hierba, árbol,..) y su comportamiento. Karafyllidis et al. sólomente cualificaban cada celda con un valor dado de *FireRate*, que el mismo autor indicaba que tendría que venir de algún modelo externo al modelo que el proponía. Berjak et al. también utilizan los datos de viento y pendiente, pero mejoraron la precisión en el avance del fuego, de manera que sus resultados se aproximaban de una manera más fiel al comportamiento real.

2.2.3. Agentes Autónomos: *Rabbit Model*

Gary L. Achtemeier [24] presentó uno de los modelos más característicos de los *Modelos VR* diseñados específicamente para reducir el cómputo de una manera drástica. El modelo propuesto, denominado *Rabbit Model*, se basa en una serie de reglas y condiciones que modelan el comportamiento y evolución del fuego forestal. La base fundamental del algoritmo es que no parte de una especificación formal y física del comportamiento del fuego, sino que a partir de una simulación básica y arbitraria, consiguió añadir las condiciones y reglas de comportamiento suficientes para obtener un resultado que se asemeja al comportamiento real del fuego y a los resultados que los algoritmos más complejos proveerían con los mismos datos de partida.

El modelo *Rabbit Model* se compone de una serie de agentes autónomos, los conejos, no necesariamente limitados por la resolución espacial del terreno donde

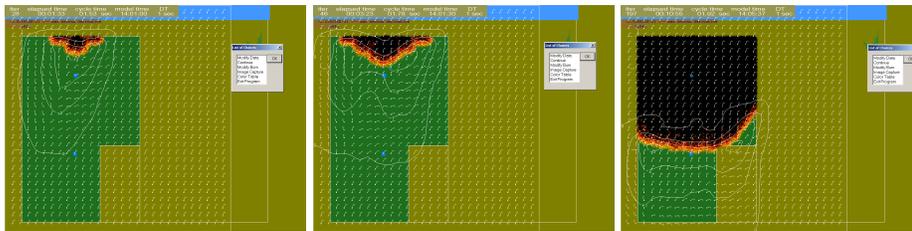


Figura 2.2: Simulación utilizando el modelo diseñado por Achtemeier [25].

la simulación esté en activo. Iterativamente, cada agente (conejo) activará la serie de reglas de comportamiento diseñadas previamente, actuando sobre el sistema de la manera programada, para posteriormente, reiniciar el proceso.

El conjunto de reglas que Gary L. Achtemeier diseñó, se basan en tres posibles acciones que los conejos son capaces de hacer: comer, saltar y reproducirse; en clara sintonía con los concepto clave de la evolución del fuego: consumir combustible, avanzar y expandirse. De una manera similar, las acciones de los conejos se ven modificadas por el entorno. Tanto la geografía del terreno como su tipología afectan a cómo los conejos interactúan en cada paso del modelo. Las condiciones atmosféricas son otra condición o restricción que el *Rabbit Model* contempla.

Las reglas de su modelo las dividió en dos grandes grupos: las que modelan el propio avance de cada agente y las restricciones o condiciones que se imponen para restringir el avance de los agentes, y que son las que hacen que la evolución en el tiempo de una simulación se parezca a la propagación de incendios reales.

Una de las grandes ventajas del uso de agentes autónomos y reglas de comportamiento en el modelado de sistemas complejos es que son inherentemente escalables. Este es el caso de la propagación del fuego. Partiendo de un modelo básico y sencillo, se pueden añadir más reglas de comportamiento sobre nuevas fuentes de datos que mejoren o añadan características nuevas en el resultado obtenido. Por supuesto, la adición de estas nuevas reglas seguramente conlleve un aumento en el tiempo de computación, por lo que se deberá analizar si la inclusión es factible o no desde el punto de vista del rendimiento global. El propio Gary L. Achtemeier realizó varias modificaciones a su modelo, siendo una de las más interesantes el cálculo de la estructura de las columnas de humo [26]. En la sección *Discussion*, Achtemeier formula la siguiente cuestión abierta y que resume de una manera clara las dudas sobre hasta dónde hay que llegar en el diseño de los modelos y si realmente merece la pena:

"From a science perspective, what additional modeling efforts must be undertaken to gain the needed understanding of how plume cores organize? How many layers of models and how much computer power will be eventually needed to solve the problem?". Gary L. Achtemeier, 2007 [26].

El modelo *Rabbit Model* presenta ciertas restricciones o carencias. La principal es que está limitado a entornos forestales o de vegetación baja (admite cortafuegos, carreteras y ríos). Por otro lado, aunque las reglas del comportamiento del fuego (conejos) ante una situación atmosférica dada son muy completas, existe una carencia en el modelo para tratar de forma explícita la propagación del fuego vía radiación. Finalmente, el modelo no incluye la posibilidad de extinción ajena de los incendios a través del uso de agentes extintores, dejando como única vía la propia auto extinción por agotamiento del combustible.

2.2.4. Entornos Urbanos

Evans et al. [27] realizan un estudio sobre la propagación de incendios en la zona de interfaz (*Wildland Urban Interface*). Su estudio es un informe técnico donde se analiza desde un punto de vista físico los mecanismos y formulación por la cual los edificios entran en combustión por acción directa del fuego forestal. En las primeras implementaciones del algoritmo ECOSMART no considera el viento como condición de propagación.

Lee et al. [28] han sido de los investigadores más relevantes en la evolución del fuego en entornos urbanos. Su modelo incluye ecuaciones empíricas que describen la velocidad de propagación del fuego según la dirección y velocidad del viento. La definición del terreno está basada en una subdivisión regular y uniforme, donde cada celda contiene la información relevante para el cálculo de las siguientes iteraciones del algoritmo.

Más recientemente se han desarrollado algunos modelos basados en comportamientos físicos. Este tipo de simulaciones ofrece mejores resultados, al utilizar ecuaciones que describen *i*) la transferencia de calor entre edificios, ya sea por radiación o por convección; *ii*) la evolución de la temperatura y *iii*) las características de las llamas que salen de los edificios a través de las ventanas (dirección y longitud) [29].

Los modelos físicos de simulación se utilizan también para simular el avance del fuego en ciudades no homogéneas (al contrario del modelo de Tanaka et al.

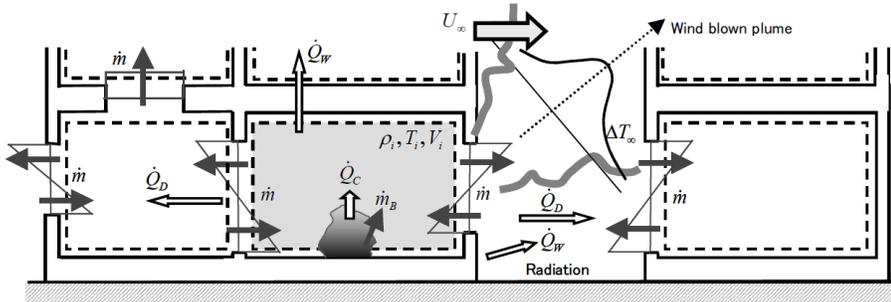


Figura 2.3: Distintos mecanismos de propagación de incendios urbanos [33].

[30]), requiriendo una descomposición de los terrenos en mallas de alta resolución [31].

Otras aplicaciones de los modelos físicos se propusieron en sistemas de autómatas celulares con mallas de $9 m^2$ [32], o en aproximaciones basadas en vectores, donde cada edificio se puede considerar un objeto de base poligonal [29, 30]. Ambos modelos limitan el cálculo de la propagación del fuego a ciudades con edificios compuestos por varios pisos, sin tener en cuenta la estructura interna de los edificios (habitaciones). Himoto et al. [33] sí consideran la estructura interna (ver figura 2.3).

2.2.5. Evolución de Incendios tras un Terremoto

Scawthorn [34] y Zhao [35] enfocan sus soluciones en un escenario muy particular: la simulación de la propagación de incendios surgidos como consecuencia directa de un terremoto. Lee [28] publicó un estudio comparativo entre varias aproximaciones entre las cuales están las descritas por Scawthorn y Zhao. Aunque un terremoto no suele causar fuego directamente, el propio movimiento sísmico y los movimientos del subsuelo provocan fracturas en infraestructuras críticas, como el tendido eléctrico (aéreo y en subsuelo) y sobre todo las conducciones y tuberías de gas, petróleo o almacenes de gasolina. Este tipo de eventos se ha podido observar en 2011 tras el gran terremoto de Japón, donde surgieron múltiples incendios urbanos a lo largo de las áreas afectadas.

Dada su naturaleza arbitraria, los sistemas FFE (*Fire Following Earthquake*) comienzan por un análisis más amplio sobre la posible localización de los focos de los incendios, que aún siendo potencialmente aleatorios, pueden seguir ciertas pautas geográficas. Posteriormente a la aparición de los incendios y su potencial

detección (en tales condiciones de emergencia las comunicaciones no son fáciles), uno de los mayores problemas es la gestión de recursos para minimizar daños. Finalmente, el resultado de las simulaciones ofrece un mapa de zonas peligrosas o calientes donde habría que actuar previamente al terremoto (optimizando recursos, mejorando infraestructuras, realizando mantenimiento preventivo) y otras zonas donde habrá que actuar rápidamente, con prioridad absoluta, por resultar infraestructuras claves para la sociedad civil o la economía local.

Zhao [35] utiliza un modelo para simulación de FFE basado en varios módulos o fases: la Ignición, que incluye el inicio del terremoto y los incendios que se pudieran ocasionar; el Descubrimiento y el Aviso de los incendios; el modelo de Respuesta por parte de los organismos; y la propagación y extinción del fuego, ya sea de manera natural o por acción de los bomberos.

Por cada módulo del sistema de simulación, Zhao propone un modelo de comportamiento. Por ejemplo, propone una serie de fórmulas y condiciones para calcular el instante temporal en el que podrían ocurrir los incendios.

Zhao modela la propagación de incendios contemplando dos escenarios: la evolución del fuego en un edificio y la propagación del fuego entre edificios. La evolución del fuego dentro de un edificio tiene principalmente en cuenta el tipo de combustible y el acceso a fuentes de oxígeno que alimenten el fuego (ventanas). Para la simulación de la propagación entre edificios, el sistema tiene en cuenta diferentes formas de propagación: por contacto directo, por radiación de calor, por contacto con la columna de humo y por emisión aérea de partículas que potencialmente puedan producir nuevos incendios. Para cada situación, Zhao ofrece una serie de fórmulas que modelan el comportamiento del incendio.

Posteriormente, Zhao [36] mejoró su sistema de representación de los entornos urbanos utilizando una subdivisión no regular, de manera contraria a como se realiza en otros modelos (autómatas celulares). La propia planta de los edificios es utilizada directamente en el criterio de propagación de incendios, basándose en varias formas elípticas asociadas a las distintas formas de propagación de los incendios en entornos urbanos (radiación, columna de humo, etc.).

2.3. Presentación de Información Geográfica

Tanto los incendios forestales como urbanos ocurren en localizaciones geográficas diversas. Es importante para las simulaciones poder visualizar la zona geográfica donde ocurren los incendios.

La visualización de información espacial a través de mapas ha sido muy común a lo largo de la Historia. La cartografía surge por la necesidad de documentar de una manera fiable los territorios o zonas de población, sirviendo para marcar rutas, elementos singulares (cimas, edificios, restaurantes, etc.), planificar estrategias militares o cualquier otra información georreferenciada. Aunque inicialmente los mapas cartográficos tenían poca resolución y eran totalmente inexactos, servían para su propósito. Hacia el siglo XV, en plena Era de los Descubrimientos, los primeros mapas cartográficos de los nuevos mundos y zonas inexploradas se dibujaron con ayuda de múltiples instrumentos perfeccionados, como la brújula.

La evolución moderna de la cartografía ha permitido el uso de satélites para cartografiar todo el globo terráqueo, obteniendo múltiples capas de información. Desde mapas de elevación, a imágenes de textura en luz visible, pasando por imágenes multiespectrales. El uso de satélites en misiones puntuales o permanentes está generando información global de altísima resolución para su inmediato o posterior análisis científico. Los satélites diseñados para meteorología nos ayudan a estudiar y prever la evolución del clima. Hay otros satélites cuyo propósito es el estudio de los océanos; otros el estudio de la vegetación global. La red de satélites GPS y Galileo nos ayuda a saber en qué posición exacta nos encontramos.

Sin embargo, la resolución obtenida en las imágenes satelitales puede no ser suficiente. Para situaciones donde se requiere mayor resolución, se requiere el uso de aviones o avionetas con instrumentos de medición apropiados y que sobrevuelen las zonas a cartografiar. Las imágenes obtenidas son las apropiadas para la visualización de mapas precisos a una escala media, que incluyen las características principales de las ciudades, carreteras y caminos.

Este tipo de información basada en imágenes, ya sean mapas de textura o de altura, se considera información ráster, es decir, que la información está dada en base a píxeles que determinan la resolución de los datos. Por el contrario, existe información vectorial, que en un principio no depende de la resolución. Por ejemplo, la red de carreteras de una población es información vectorial, compuesta por polilíneas 2D donde cada punto es una coordenada geográfica.

Actualmente, el auge de los mapas online, como *Google Maps* o *Microsoft Bing*, ha permitido su utilización en tareas tan diversas como la creación de rutas, sistemas de navegación GPS, geolocalización de negocios (gasolineras, hoteles, restaurantes, etc.) o visualización de datos demográficos históricos.

Recientemente, también se ha dado el paso a las tres dimensiones, pudiendo generarse modelos tridimensionales que incluyen el relieve 3D del terreno y la

adición de modelos 3D georreferenciados, como los edificios de las ciudades y pueblos. En este contexto, Google Earth y Virtual Earth (Microsoft) han permitido una visualización interactiva y en 3D a escala global. Este tipo de tecnología ha servido como base para la creación de diversas utilidades implementadas por terceras compañías, como varios prototipos de simuladores de vehículos, tanto terrestres como acuáticos.

Concretamente, en el caso de los incendios, los algoritmos iterativos introducidos en el apartado anterior utilizan una definición del terreno basada en celdas. Cada celda posee información discretizada del terreno que representa. La información geográfica disponible se mapea a dicha representación celular, realizando un muestreo de los datos en los puntos necesarios. Para los datos ráster este proceso de muestreo es bastante simple, utilizando un muestreo directo de las imágenes georreferenciadas. Para los datos vectoriales el método es algo distinto, ya que hay que muestrear una representación lógica (círculo, polígono, segmento, etc.). En general se suele realizar un paso previo de rasterización de los datos vectoriales, que permita un mapeo directo a la estructura celular final.

La información discretizada se puede organizar de diversas formas. La más fácil e intuitiva es mediante una retícula o estructura en red, representada en forma de matriz que organiza los datos. Pero existen otras representaciones, con sus ventajas y desventajas frente a la cuadrículada. Podemos encontrar subdivisiones regulares (ver figura 2.4) como la triangular o la hexagonal, subdivisiones no regulares como las jerárquicas, y subdivisiones totalmente irregulares o arbitrarias.

2.3.1. Subdivisión Cuadrículada

La representación de mapas a través de una rejilla cuadrículada uniforme se lleva utilizando mucho tiempo y para muchos ejemplos. Organizar la información y el estado de las celdas en forma de matriz (filas y columnas) es una forma muy conveniente de agilizar el acceso a la información y poder modificarla.

Aunque se puede utilizar para múltiples finalidades, históricamente este tipo de subdivisiones es la base para implementar algoritmos con algún tipo de implementación basada en reglas o, de forma más compleja, con algoritmos de Inteligencia Artificial. Por ejemplo, el Juego de la Vida es un autómatas celular que hace uso de un mapa 2D con distinta información en las celdas que se hace evolucionar en el tiempo sin ninguna intervención externa (juego de cero jugadores). Una de las conclusiones científicas más relevantes del Juego de la Vida es que se puede obtener

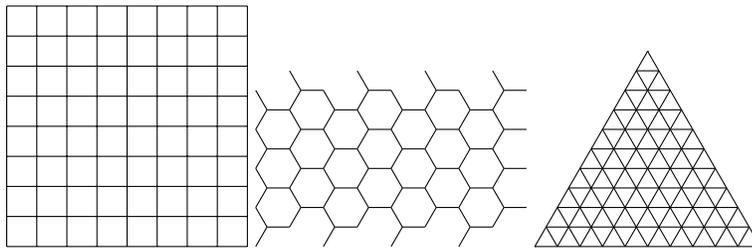


Figura 2.4: Representación Cuadriculada, Hexagonal y Triangular.

una complejidad altísima a partir de unas reglas bastante sencillas.

Dentro de las características más relevantes de la subdivisión cuadriculada se encuentra el acceso directo a los vecinos de una celda dada. Cada celda limita con 8 celdas vecinas (norte, sur, este y oeste en las direcciones principales y noreste, noroeste, sureste y suroeste en las diagonales), accesibles trivialmente a través de los índices de las filas y columnas de la matriz. Asimismo, controlar los límites del terreno es sencillo, teniendo almacenado el número de filas y columnas de la matriz de datos (ver figura 2.4). Sin embargo, debido a la naturaleza cuadriculada, no todos los vecinos de una celda están a la misma distancia (los vecinos en las distancias principales están a distancia 1, con un contacto claro a lo largo de un lado de la celda, y los vecinos en las diagonales a distancia $\sqrt{2}$, teniendo un sólo vértice como punto de contacto), teniendo que tener en cuenta este detalle a la hora del cálculo de distancias en el plano 2D.

Generalmente, los datos cualitativos asociados a cada celda de la cuadrícula se consideran datos de toda la celda. Por ejemplo, si una celda tiene un atributo *TerrainType*, se considera que toda la celda es de ese *TerrainType* dado. Por el contrario, los datos numéricos asociados a una celda pueden ser considerados como datos uniformes en la celda o como datos precisos del centro de la celda. Por ejemplo, si se dice que una celda tiene una altura de 100 m., se puede entender que toda la celda tiene 100 m. de altura (meseta) o que sólo el centro de la celda tiene 100 m. de altura, en representación de la celda. Si se dice que en una celda hay mil habitantes, se puede suponer que están uniformemente distribuidos en la celda.

2.3.2. Otras Subdivisiones Regulares: Hexagonal, Triangular

Existen otras formas de subdividir el espacio 2D de manera regular, estando entre ellas la subdivisión hexagonal y triangular.

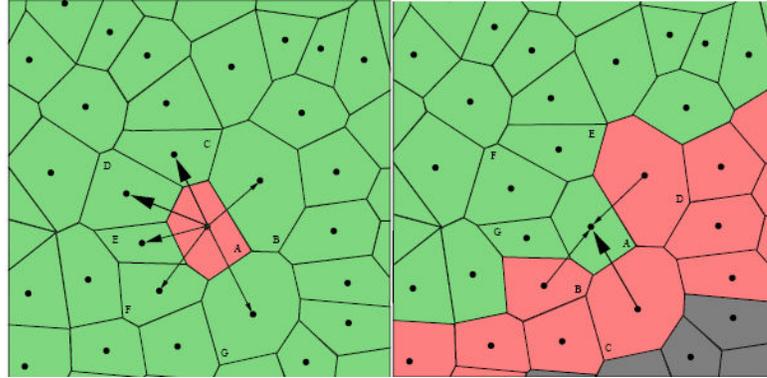


Figura 2.5: Subdivisión irregular del terreno basada en diagramas de Voronoi [37].

La subdivisión hexagonal posee ciertas características interesantes que la cuadrangular no tiene: *i*) todos los vecinos de una celda dada están a la misma distancia y *ii*) en las esquinas confluyen 3 celdas con contacto a lo largo de un lado. Sin embargo, se dificulta la propia identificación de las celdas (fila, columna) y la gestión de los bordes y límites, donde hay celdas no completas (ver figura 2.4). Las celdas hexagonales permiten una visualización isométrica (3D, 2D) de los mundos virtuales. Esta característica ha sido explotada masivamente en el mundo de los videojuegos de estrategia y simulación.

La subdivisión triangular se puede ver como un refinamiento de la representación hexagonal, donde los hexágonos se subdividen en 6 triángulos. La gran ventaja de la representación triangular estriba en la simplicidad de la figura geométrica utilizada, el triángulo, muy próxima al hardware gráfico. Para cada celda triangular, se pueden encontrar hasta 12 vecinos, lo cual suele dificultar el tratamiento y gestión de las reglas de comportamiento.

2.3.3. Subdivisiones Irregulares

Al margen de subdivisiones regulares, también existe la opción de discretizar un terreno utilizando una subdivisión irregular. Estas subdivisiones pueden generarse de una manera puramente geométrica, aunque también se puede generar de manera que simplifique u optimice algunas tareas de alto nivel.

Johnston et al. [38] utilizan una subdivisión irregular basada en *patches*. Cada *patch* está definido por un polígono manteniendo información tanto topológica, de conectividad y de aplicación, más relacionada con los conceptos de propagación de

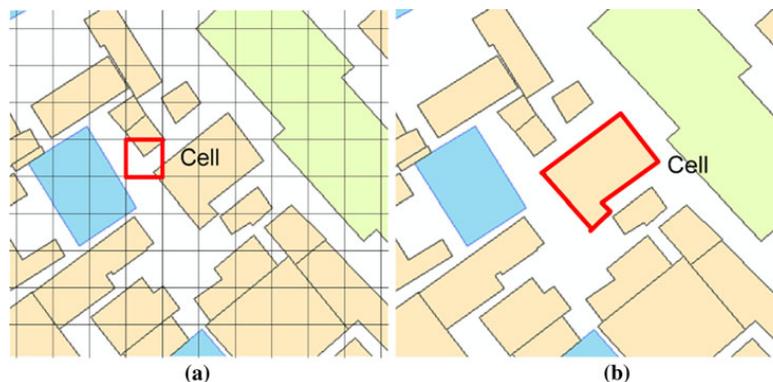


Figura 2.6: Subdivisión irregular en áreas urbanas basada en la planta de los edificios (derecha) en contraposición de una subdivisión regular (izquierda) [36].

incendios forestales. Una de las grandes ventajas de esta subdivisión irregular del terreno radica en utilizar *patches* mayores en zonas geográficas muy homogéneas, pero sin duda el gran objetivo de su utilización es intentar evitar la aparición de patrones muy regulares.

Para la generación del conjunto de *patches* irregulares, Johnston mezcla diferentes técnicas. Inicialmente, se muestrea el terreno en diversos puntos bajo ciertos criterios de aleatoriedad y de cercanía a otros puntos. Una vez añadidos todos los puntos, se crea el conjunto de *patches* irregulares calculando un diagrama de Voronoi (ver figura 2.5). Finalmente, se calculan la conectividad y otras variables necesarias para la simulación.

La utilización de mallas regulares puede resultar en situaciones donde la evolución de la simulación (sea de incendios forestales o de otra naturaleza) genera patrones fácilmente reconocibles que distorsionan el comportamiento real que intentan modelar. Este comportamiento suele estar asociado a los niveles de resolución del mallado regular, de una manera similar a la pixelación de imágenes de baja resolución (ver figura 2.6). La utilización de mallados regulares de más resolución, aumenta la calidad de los resultados, con el coste del aumento de celdas que discretizan el terreno.

Zhao [36] en sus trabajos sobre propagación de incendios urbanos utiliza una subdivisión irregular, pero dirigida por las plantas de los edificios que componen el área urbana a discretizar. De esta manera, cada edificio (o cada sección de un edificio más grande) define una celda, asociada inequívocamente a un edificio, con

sus metadatos fácilmente accesibles.

Esta subdivisión irregular permite evitar un problema que poseen las subdivisiones regulares en entornos urbanos: Puede haber celdas que contengan partes de varios edificios, o una mezcla de edificio y de carretera o vegetación. Una vez más, este problema es similar al de la baja resolución de las imágenes, donde los píxeles contienen una mezcla de la información real que se intenta representar. De una manera similar, aumentar la resolución de la discretización regular permite reducir el problema, pero no solucionarlo.

2.3.4. Terrenos Sintéticos o Reales

La elección de la forma de representar la información geográfica es independiente de si la escena representada es de zonas geográficas reales o si son escenas sintéticas y diseñadas con propósitos particulares. Desde un punto de vista técnico es indistinguible el uso de uno u otro tipo de escenas. Además, no existe una limitación estricta sobre qué escenarios son los más adecuados para su uso en entornos virtuales, ya que suele ser dependiente del objetivo formativo perseguido por la aplicación.

En el caso de la simulación de incendios forestales, ambas tipologías de entornos virtuales tienen cabida. Por un lado, los ejemplos sintéticos pueden hacer énfasis en cierto tipo de ejercicios y técnicas concretas de extinción y contención de incendios. La creación manual de este tipo de escenarios suele suponer tiempo, esfuerzo y, por consiguiente, puede suponer un gasto económico. Muchos son los ejemplos de este tipo de modelos sintéticos en la industria del entretenimiento, donde prácticamente todos los juegos incorporan un conjunto de escenas virtuales o mapas, que suponen la asignación de un grupo de desarrolladores y modeladores en exclusiva para el diseño, testeo y validación de dichos mapas.

Por otro lado, la utilización de escenarios 3D de zonas geográficas reales tiene múltiples ventajas y oportunidades de negocio interesantes. El entrenamiento virtual utilizando la propia geografía donde los alumnos ejercen sus funciones ayuda a familiarizarse con su entorno y a entrenar situaciones hipotéticas, pero que se pueden llegar a dar en un futuro. Además, ante el eventual descubrimiento de un nuevo incendio, el mismo sistema de simulación de la propagación de incendios puede ayudar en la toma de decisiones y en el seguimiento de la evolución del incendio.

Desde el punto de vista de la inmersión y el realismo, los usuarios se sentirán

más cómodos e interactuarán más naturalmente en escenarios que representen zonas que ya conocen o que pueden visitar ellos mismos. Si el nivel de realismo de los escenarios es pobre o hay errores graves, los usuarios pueden desconcentrarse de las tareas objetivo y distraerse criticando defectos o carencias de los escenarios.

Sin duda, el mayor reto en la generación de escenarios 3D de zonas geográficas reales radica en la correcta combinación de múltiples fuentes de datos, como puede ser el propio terrero, su clasificación, las redes de transporte (carreteras, ferrocarril, caminos, autopistas, etc.) y otras fuentes de información geográfica más relacionada con la prevención y la lucha contra incendios, como pueden ser los cortafuegos en los bosques, ríos, pistas forestales, etc. Además, en entornos urbanos hace falta una representación suficiente de los edificios y de la composición de su estructura, de forma que los algoritmos de simulación de la propagación de incendios puedan utilizar dicha información en los cálculos.

2.4. Resumen

La elección del tipo de modelos matemáticos es una decisión que afecta a los objetivos de la tesis. Para garantizar el objetivo de la interactividad de los usuarios, se utilizarán modelos orientados a VR. En concreto, nos basaremos en la representación celular que propone Achtemeier en su *Rabbit Model* para modelar el comportamiento de los incendios en entornos forestales. El modelo de Iwami [29] nos servirá como punto de inicio para desarrollar los algoritmos de propagación en entornos urbanos.

También se ha visto que la utilización de datos geográficos es necesaria para ubicar correctamente la localización espacial de las simulaciones. Se requerirá de una arquitectura que englobe la adquisición y tratamiento de los datos geográficos para su utilización dentro de los escenarios basados en celdas que se utilizarán en los algoritmos propuestos en esta tesis.

Capítulo 3

Sistemas de Entrenamiento en Extinción de Incendios

Este capítulo está dedicado al estado del arte en el entrenamiento en tácticas de extinción de incendios. Se tratan en primer lugar los sistemas de simulación real, es decir, aquellos donde los alumnos se encuentran ante situaciones reales pero con condiciones controladas. Estos sistemas se subdividen en grupos diferenciados, según se utilice fuego real o simulado. También se hace referencia a algunos avances en sistemas virtuales que han derivado hacia productos comerciales dentro de la industria del videojuego.

A los sistemas de entrenamiento real se les denomina “instrucción real”, “simulacros reales” o, genéricamente, “simulación real”, aunque el mero hecho de ser ejercicios programados, preparados y bajo supervisión continua por cuestiones obvias de seguridad, elimina gran parte del realismo que pudieran tener estos ejercicios. Sin embargo, son prácticas muy útiles para los bomberos, ya que les permite obtener sensaciones y habituarse a condiciones físicas similares a las que se enfrentarán en el futuro (condiciones de calor, humedad y visibilidad, soportar el equipo, bombonas, máscaras y mangueras, etc.).

Iniciamos este capítulo con una breve exposición de los roles del personal del cuerpo de bomberos, que además sirve para introducir cierta terminología necesaria para los próximos capítulos.

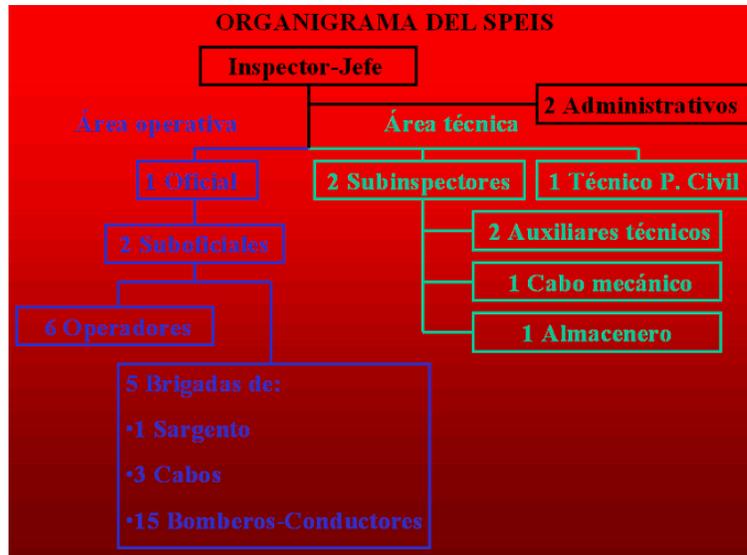


Figura 3.1: Organigrama funcional del SPEIS de San Sebastián (Servicio de Prevención, Extinción de Incendios y Salvamentos) [39].

3.1. Organización Funcional de los Cuerpos de Bomberos (roles)

La estructura organizativa de los bomberos difiere ligeramente entre los diferentes países e incluso dentro de cada propio país. Generalmente la estructura interna de los cuerpos de bomberos se puede ver como un conjunto de unidades operativas, que se encargan de las salidas a campo. Dependiendo de la localización y peculiaridades de la región donde se encuentre la sede central, la composición de las brigadas puede diferir tanto en cualidades técnicas como numéricas.

Por lo general, una brigada se compone del Jefe de Brigada (*Brigade Leader* o *FB Leader*), que aparte de ser el enlace con el Centro de Control, es el encargado de gestionar el despliegue y uso de recursos de las operaciones de control y extinción de incendios (y de rescate si fuere de aplicación).

El resto de componentes de la brigada se organizan más libremente, siendo habitual la creación de diversas escuadras, con un cabo o bombero de primera clase (*Crew Manager*) al mando de un grupo reducido de bomberos y que recibe las instrucciones directamente del Jefe de Brigada.

La existencia de unidades especializadas como puede ser la Unidad de Rescate

Marino (*Marine Rescue Unit*) o la Unidad de Extinción de Incendios Químicos (*Chemical fire suppression unit*) depende exclusivamente de las peculiaridades de su zona de actuación. Siguen más o menos la misma organización interna, pero con una alta especialización en su trabajo.

Cada unidad operativa o brigada está comandada desde el Centro de Control por medio de los oficiales y suboficiales, que tienen una perspectiva global de los recursos disponibles y destinados en campo y además, reciben la información disponible de distintas fuentes para poder realizar una toma de decisiones apropiada. Las instrucciones destinadas a las brigadas se informan a través de los operadores asignados a cada brigada, que informarán a los Jefes de Brigada.

Los oficiales y suboficiales además tienen la posibilidad de contactar con distintas entidades locales, provinciales e incluso estatales en caso de necesidad, ya sea para solicitar información o para pedir recursos extra en caso de extrema gravedad o de ver sobrepasada la capacidad de su propia estación de bomberos.

En las figuras 3.1 y 3.2 se puede ver la estructura operativa de dos Cuerpos de Bomberos (San Sebastián [39] y Madrid [40]).

3.2. Simuladores Reales para el Entrenamiento de Bomberos

El mundo de la simulación real no es ajeno al problema del entrenamiento de bomberos, que se puede considerar una actividad de altísimo riesgo. Como tal, las medidas de seguridad necesarias para la realización de estas prácticas tienen que ser muy exigentes y controladas.

En general, las características principales de los entornos de simulación real son dos:

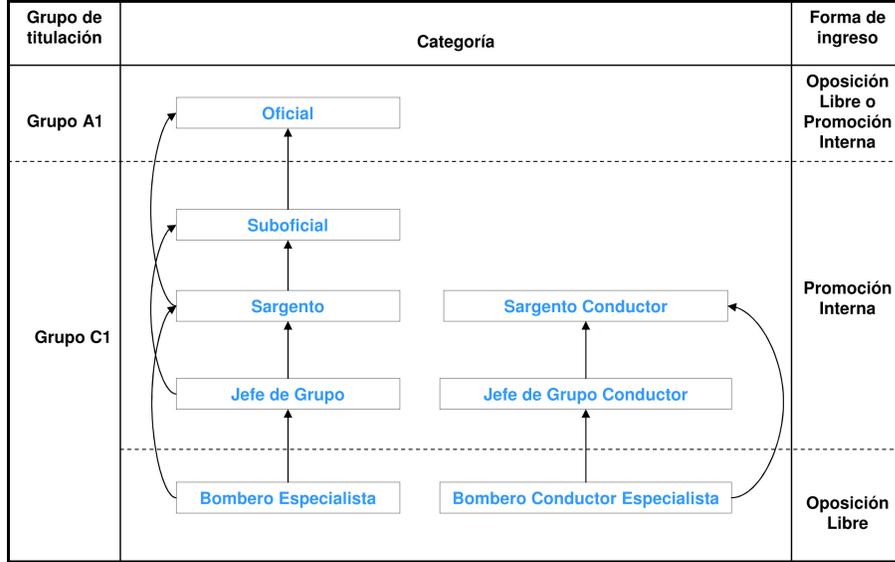
- Entrenamiento basado en simulacros, con fuego real (o simulado).
- No se pueden practicar en condiciones realistas ni en entornos no controlados (no se puede quemar un bosque o un edificio para practicar)

Dentro de los distintos sistemas de simulación real que se pueden encontrar en el mercado y/o en los centros de formación, podemos destacar los siguientes.

FireBlast [41] comercializa una serie de simuladores de entrenamiento móviles, en donde los centros de enseñanza o cualquier organización puede ofrecer



SISTEMAS DE INGRESO Y PROMOCIÓN



Organigrama operativo

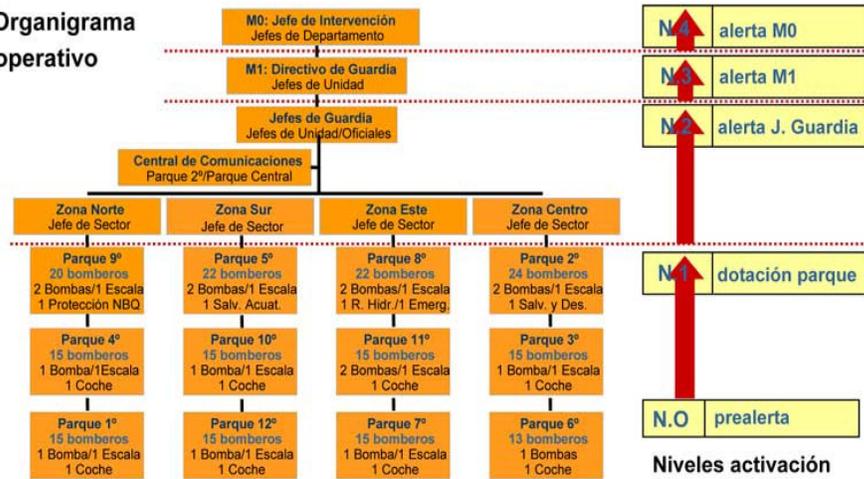


Figura 3.2: Organización y operativa del Cuerpo de Bomberos de Madrid [40].

distintos niveles de entrenamiento a bomberos, incluyendo escenarios con fuego real.

Kiddle Fire Trainers [42] ofrece una serie de simuladores de entrenamiento con fuego real, incluyendo simuladores al aire libre (carcasas de aviones, coches), entornos industriales (simulación incendios químicos) o incendios estructurales (variando desde entrenamiento básico de extinción de incendios a ejercicios de búsqueda y rescate). En estos simuladores, *Kiddle Fire Trainers* utiliza gas para alimentar el fuego.

CFBT (*Compartment Fire Behaviour Training*) [43] posee múltiples planes de entrenamiento orientados a fuegos estructurales. Los distintos niveles de los cursos van desde prácticas simples y simuladas (sin fuego real) a ejercicios con fuego real. Sus sistemas de aprendizaje están basados en los que denominan *Fire Fidelity* [44], un detallado esquema conceptual donde se muestran todos los aspectos que afectan a la experiencia de una sesión práctica. Un esquema similar se presenta para analizar los aspectos fundamentales a la hora de diseñar ejercicios prácticos de extinción de incendios, donde el factor *Fire Dynamics*, que engloba el aspecto de cómo los usuarios perciben el avance y movimiento del fuego, se categoriza como muy importante. También se pueden encontrar exhibiciones didácticas que tratan de concienciar sobre los peligros del fuego y la capacidad de los agentes extintores [45].

3.3. Sistemas Virtuales Específicos para Entrenamiento de Bomberos

Actualmente ya existen diversas soluciones para entrenamiento simulado o virtual de bomberos. Estos entrenamientos tienen el objetivo de enfrentar a bomberos de diversas categorías ante ejercicios teóricos sin la necesidad de tener instalaciones preparadas para ejercicios con fuego real.

Por ejemplo, *Parasol EMT* [48] tiene varios sistemas de entrenamiento basados en simuladores específicos con fuego virtual. Sin ser exactamente un sistema de Realidad Virtual, en él se puede aprender a apagar pequeños incendios, tanto individualmente como en grupo, en cocinas u otros entornos predefinidos. Una de las grandes peculiaridades de estos sistemas es la utilización del fuego virtual y algunos efectos de humo, conseguidos mediante paneles LED donde se representa una imagen de una o varias llamas. Los usuarios, mediante los aparatos extintores mo-



Figura 3.3: Ejemplos de juego comercial (*Emergency 2012* [46]) y aplicación didáctica (*US Fire Department* [47]).

dificados, actúan sobre estos fuegos virtuales obteniendo una respuesta tanto visual (humo, imagen de la llama modificada) como sonora. Una de las grandes ventajas de estos sistemas simulados es la carencia total de fuego real, lo que incrementa la seguridad. Por otro lado, este tipo de simuladores permiten una interactividad completa con los usuarios, aunque el éxito está supeditado a la combinación de elementos visuales-sonoros.

Illinois Fire and Safety Company [49] ofrece tanto equipamientos, como recursos y programas de entrenamiento para bomberos. Entre toda su oferta, comercializa un sistema patentado de Realidad Virtual compuesto por un sistema retroproyector y extintores de mano modificados. En este sistema, un escenario en llamas se muestra a los usuarios, que deberán intentar apagarlo mediante el uso de los extintores manuales.

3.4. Industria del Entretenimiento

Por otro lado, la industria del entretenimiento también se ha fijado en las tácticas de los bomberos y ha sacado al mercado diversos juegos de simulación, donde los usuarios tienen como objetivo genérico “apagar incendios con los recursos disponibles”. Este estilo de simuladores entra dentro de la categoría “Juegos Serios”, ya que aunque no se deja de lado la faceta lúdica, se intenta enseñar a los jugadores muchas de las tácticas, equipamiento y terminología relacionada con la extinción de incendios.

El nivel de estilismo de estos juegos serios va desde productos comerciales con una alta calidad gráfica (*Emergency 2012* [46], *Real Heroes firefighters* [50]) a



Figura 3.4: Simuladores de extinción de incendios de la empresa *Cultimedia* [51].

pequeñas aplicaciones de carácter puramente instructivo y/o educativo (ver figura 3.3).

Entre las empresas que desarrollan este tipo de aplicaciones, podemos encontrar *Cultimedia* [51], que tiene varios juegos simples relacionados con la gestión de recursos en incendios como pueden ser los mostrados en la figura 3.4.

Con la irrupción de las nuevas tecnologías, se están desarrollando nuevos sistemas de Realidad Virtual que permiten a los usuarios interactuar con los sistemas de simulación de formas novedosas. Estos sistemas, también se han fijado en la extinción de incendios como un escenario válido y donde estos sistemas de interacción pueden resultar muy útiles [52, 53].

3.5. Conclusiones

Las ventajas que aporta la simulación virtual sobre la simulación real estriban en la posibilidad potencialmente ilimitada de realización de ejercicios prácticos. La utilización de sistemas virtuales permite la generación de escenarios donde se practiquen las tácticas instruidas durante los cursos teóricos de formación. Estos escenarios, al contrario con la simulación real, pueden ser de diferentes escalas, con diferentes elementos, con condiciones meteorológicas variables, etc. y permiten el entrenamiento de diversas situaciones que serían prácticamente imposibles de conseguir en los simuladores reales, quedando de esta manera en un conocimiento puramente teórico.

La utilización de un sistema virtual para entrenamiento de bomberos necesita garantizar tanto la interactividad como el realismo de los procesos simulados. En

este caso en concreto, el sistema más complejo es el correspondiente a la propia simulación de la propagación del fuego. En los próximos capítulos se introducen algoritmos que cumplen con las necesidades de interactividad, tanto en entornos forestales como urbanos.

Capítulo 4

Algoritmos de Propagación y Extinción de Incendios Forestales

El primer apartado de este capítulo introduce de modo sucinto los conceptos básicos para la definición del terreno. El siguiente apartado detalla los conceptos básicos y los algoritmos de propagación de incendios en entornos forestales.

El tercer apartado presenta el modelo de extinción de incendios forestales. Es un método genérico y computacionalmente eficiente que permite a los usuarios planificar el control de la propagación de incendios, atacando un fuego forestal activo.

El capítulo siguiente extiende estos modelos y algoritmos al caso de zonas urbanas. El capítulo 7 analiza el comportamiento de los algoritmos expuestos en este capítulo y el siguiente.

4.1. Modelización del Terreno y Parámetros

El terreno se define como una estructura regular de celdas cuadradas de tamaño uniforme. En la bibliografía se han visto otras soluciones de representación. La elección de una subdivisión regular se ha basado en dos criterios:

- Permite simplificar al máximo las operaciones asociadas a la geometría de las celdas que permita definir una relación bidireccional entre coordenadas 3D del terreno y las coordenadas de una celda concreta dentro de la matriz de celdas que representa el terreno.

- Permite conocer la conectividad de una celda con sus vecinos.

Bajo estos criterios, la elección de subdivisiones irregulares quedan descartadas para los objetivos de esta tesis, puesto que obtener a qué celda pertenece una posición 3D no es un método trivial computacionalmente hablando. Además la información de conectividad entre una celda y sus vecinas, aunque se pueda precalcular, no es regular a lo largo de toda la extensión del terreno.

Entre las subdivisiones regulares clásicas existentes en la bibliografía (típicamente: triangular, cuadrículada y hexagonal), hemos elegido la subdivisión regular cuadrículada por la natural adaptabilidad a estructuras matriciales y la fácil conceptualización mental en el uso de los índices de las celdas para un acceso directo rápido y eficiente.

Caballero [54] mejora el proceso de cálculo de distancias en este tipo de representaciones cuadrículadas, contemplando las diagonales como parte integral de los cálculos de distancias y trayectorias. En la elección para esta tesis, optamos por el cálculo de distancias euclídeas en 3D, teniendo en cuenta las distancias entre los centros de las celdas y su altitud, que vendrá dada por la orografía del terreno.

En cuanto al tamaño de la celda, se debe balancear para poder cumplir con los requisitos de eficiencia y tiempos de cómputo de esta tesis. En el capítulo 7 se analiza la elección del tamaño de celda y que, como se verá en el próximo capítulo, también se utiliza en los escenarios urbanos.

Cada celda se caracteriza geoméricamente con su origen, tamaño y elevación. Además, cada celda incorpora información adicional relacionada con el método de propagación del fuego, que se dividen en dos categorías: *i*) información estática, que incluye toda aquella información invariable en el tiempo y que es necesaria para caracterizar la naturaleza de cada celda e *ii*) información dinámica, que incluye las variables que se van calculando y modificando durante la simulación.

El objetivo del algoritmo de propagación de incendios es que sea computacionalmente muy ligero, es decir, que el tiempo de procesado de cada iteración sea bajo, pero intentando ser fiel al comportamiento real de la evolución del fuego.

Dentro de las simplificaciones llevadas a cabo para alcanzar este objetivo, se han elegido el conjunto de variables más relevantes que están involucradas en la evolución del fuego en los entornos forestales y urbanos, que son la orografía del terreno, en concreto la pendiente, y el viento reinante en la zona [31]. El resto de variables se han descartado, aunque son necesarias para simulaciones con una exigencia mayor en la precisión. Por ejemplo, no se considera la características químicas del terreno, la humedad relativa, los fenómenos atmosféricos, etc.

La información estática de cada celda contiene tanto los datos geométricos (posición, tamaño y elevación de cada celda) como los semánticos que la caracterizan. La información semántica contiene información sobre la naturaleza de la celda (hierba, arbustos, árboles, etc.) y la cantidad inicial de combustible.

El algoritmo de combustión de una celda sigue el utilizado por Achtemeier [24] y otros trabajos derivados. El algoritmo considera que el fuego va consumiendo unidades de combustible en cada paso de simulación. Las unidades de combustible abstraen la variedad de materiales combustibles que pueden estar presentes en una celda: árboles, hierba, matojos, etc.

La cantidad de combustible presente en una celda se completa con su combustibilidad, que caracteriza la velocidad de combustión de este material. Este parámetro abstrae el comportamiento de los diversos materiales. Por ejemplo, una celda con hierba seca tendrá un valor asociado bastante mayor que una con árboles.

La intensidad del fuego (*FirePower*) en una celda en un momento dado modula la velocidad de combustión, es decir, la cantidad de combustible consumido en una iteración dependerá de la intensidad del fuego (variable en el tiempo) y de la combustibilidad del material presente en la celda (parámetro estático). Esta modulación requerirá de otro parámetro que limitará la máxima velocidad de consumo de combustible en una celda. Este parámetro común en la literatura lo denominamos *MaxFirePower*, y depende de la tipología del material combustible presente en la celda.

Los valores asignados a estos parámetros para los materiales considerados en este trabajo se calculan partiendo de la clasificación de Rothermel de los combustibles en 13 categorías (ver en el Anexo B). Estos parámetros determinan la velocidad de propagación del incendio. Según la vegetación y tipología completa de la zona afectada, dichos factores podrían sufrir correcciones, de forma que el comportamiento simulado sea lo más parecido al real. Por ejemplo, los factores de simulación para el tipo de vegetación que se utiliza en esta tesis están ajustados para que el comportamiento obtenido sea similar al obtenido experimentalmente por Beutling et al. [55].

Más adelante se expone cómo el algoritmo de propagación del fuego es un proceso iterativo, donde en cada iteración la simulación calcula un nuevo valor de las variables dinámicas asociadas a las celdas utilizando la información disponible: cantidad de combustible, intensidad del fuego, el estado del incendio, etc. Toda esta información es utilizada para producir el estado final del terreno tras una iteración, momento en el que se podrá utilizar para actualizar la representación gráfica de la

simulación virtual.

La información necesaria para generar los modelos requeridos para los análisis se consideran con más detalle en el capítulo 6, donde se propone la conexión de los modelos requeridos para el análisis con la información disponible en sistemas GIS. En ese capítulo se presta especial atención a los aspectos semánticos.

4.2. Propagación de Incendios Forestales

Al presentar la propagación de incendios forestales, un primer apartado trata de la evolución temporal de la combustión (el fuego) en una celda, e introduce unos conceptos básicos que se utilizarán a lo largo de la tesis. Los dos apartados siguientes tratan con más detalle los algoritmos que implementan los dos métodos de propagación considerados: entre celdas contiguas y por radiación (saltando barreras tales como ríos). Los algoritmos se presentan y analizan con más detalle en los apartados correspondientes.

4.2.1. Conceptos Básicos

En primer lugar se introducen los estados considerados en la propagación de incendios. A continuación se expone el proceso de combustión. En los siguientes apartados se detallan los dos algoritmos que se ocupan conjuntamente de estimar la propagación del fuego.

Cada una de las celdas que componen el terreno tiene asociado un estado, que corresponde al estado en el que se encuentra el incendio en dicha celda durante la simulación. En los siguientes párrafos se describen los estados considerados en el algoritmo propuesto.

Un celda está en estado *Safe* cuando no hay fuego en ella, y actúa como el estado inicial en el que la mayoría de las celdas comienzan la simulación. El estado *Activated* indica que una celda está activa y por lo tanto, existe fuego en evolución. La transición de las celdas al estado *Activated* puede ocurrir por dos vías principales: *i*) por propagación desde celdas ya activas, y *ii*) por activación programada o aleatoria de nuevos focos, como podrían ser los incendios provocados por la caída de un rayo o los provocados intencionadamente por el ser humano.

Una vez una celda haya consumido todo su combustible, su estado pasa a *Burnt*, un estado que indica que la celda ha llegado a su final (sin fuego activo y sin combustible disponible que permita reiniciar el incendio). Se contempla un estado in-

termedio entre *Activated* y *Burnt*: el estado *Survived*, cuyo propósito es modelar aquellas celdas que ya han consumido su combustible y no poseen fuego activo, pero aún poseen suficiente calor residual como para provocar la activación de nuevos focos en celdas vecinas. Finalmente, estas celdas perderán gradualmente ese calor residual, decayendo en el estado final *Burnt*.

El estado *RiverCrossing* es un estado especial que modela aquellas celdas pertenecientes a ríos, barreras y otras estructuras similares. Las celdas de estos cortafuegos pueden pasar de estado *Safe* a *RiverCrossing* y eventualmente permitirá al fuego saltar la barrera. Este comportamiento se explica en detalle en próximas secciones.

Finalmente, el estado *FireStopped* modela a las celdas activas cuyo fuego ha sido detenido por acciones externas, generalmente, por la adición de agentes extintores como el agua. En este estado, la celda aún posee combustible y eventualmente, el fuego se podrá reactivar. Una condición importante para poder reactivarse es que el agente extintor remanente que pudiera quedar en la celda desaparezca, generalmente por evaporación del mismo. Cuando una celda ve reducido su cantidad de agente extintor a cero, el fuego puede volver a ser reiniciado si las condiciones lo permiten, siendo equivalente a como si estuviera en el estado *Safe* pero con menos cantidad de combustible disponible.

La figura 4.1 presenta la máquina de estados finita (*Finite State Machine*, FSM) con los estados de las celdas y las transiciones permitidas.

La clasificación de estos estados sigue los planteamientos clásicos de la bibliografía y se ha extendido con los estados requeridos para habilitar la nueva forma de propagación aportada por la tesis: *Spotting Fires*, tema que se analizará en un apartado posterior.

El algoritmo para el cálculo de la evolución del fuego en zonas forestales se basa en evolucionar los datos de las celdas de un estado (instante i) al siguiente (instante $i+1$). El método propuesto se fundamenta y extiende el método *Rabbit Model* propuesto por Achtemeier [24], que basa la propagación del fuego en desplazamientos de los conejos.

Un foco activo se inicia tras activar una celda o serie de celdas adyacentes, pasando su estado interno a *Activated*. A partir de ese momento, las celdas entrarán en el ciclo de actualización del algoritmo, aplicando las reglas correspondientes en función de su propio estado y del estado de las celdas vecinas.

Si no existe una intervención externa (acción de extinción), los focos activos irán adquiriendo mayor intensidad según se va consumiendo el combustible. Así,

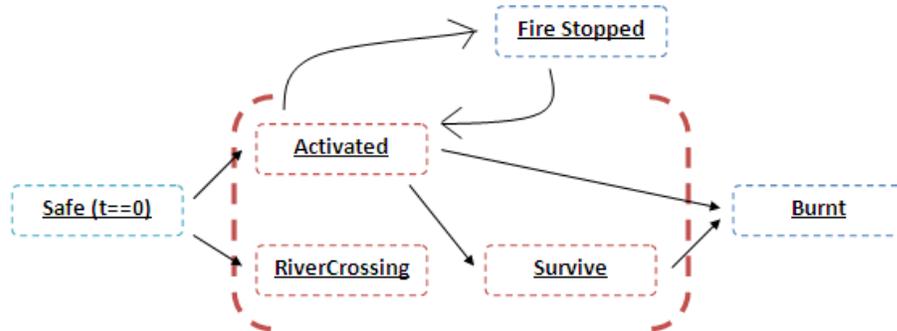


Figura 4.1: Máquina de estados finita que representa los estados de las celdas y las transiciones permitidas.

una celda activa que vaya consumiendo su combustible, irá incrementado su intensidad de fuego en una cantidad equivalente al combustible consumido. Este planteamiento emula el comportamiento agresivo de la propagación de incendios. Este crecimiento agresivo de consumo de combustible por unidad de tiempo alcanza un límite, a partir del cual el consumo de combustible por unidad de tiempo se mantiene constante. Este límite depende de la tipología de la celda.

Además, existe un límite práctico definido por la cantidad de combustible de la celda. Una vez consumido todo el combustible, el fuego no podrá sostenerse y la celda, según los casos, decaerá al estado *Survived* o *Burnt*. Este tema se discute posteriormente.

Basándose en los conceptos que se acaban de comentar, los siguientes apartados tratan de los dos algoritmos que se ocupan del proceso de propagación de incendios forestales.

Es común a muchos algoritmos desarrollados el incluir unos elementos estocásticos. Los valores asignados a estos comportamientos se recogen en el apartado [7.3.5](#).

4.2.2. Propagación Básica, Comportamiento Elíptico

La formulación clásica que modela la evolución del fuego en espacios abiertos se basa en el principio de Huygens. Finney [10] describe la expansión de una ola u onda elíptica según dicho principio. Por ser similar la forma que adquieren los frentes activos de los incendios forestales se les puede aplicar ese mismo principio.

En los métodos que utilizan el principio de Huygens, la elipse se simula combi-

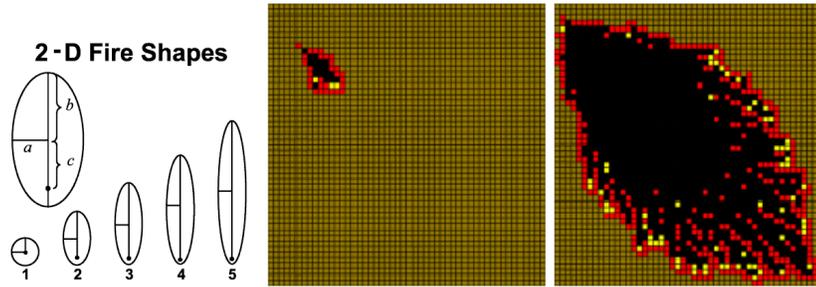


Figura 4.2: Comportamiento elíptico de la simulación. El comportamiento teórico expuesto por Finney [10] (izquierda) es comparado con el resultado obtenido en una simulación (centro y derecha).

nando el efecto de la pendiente y el viento. Se añade cierta aleatoriedad al comportamiento a través de comportamientos aleatorios o estocásticos, para que el fuego pueda evolucionar en contra de la pendiente y/o el viento. Ajustando las distintas variables del modelo, se pueden obtener resultados que adopten las formas elípticas que están asociadas a la evolución real de los incendios forestales. En la tabla 7.3 se recogen algunas de las probabilidades asignadas en esta tesis.

Esta definición del comportamiento básico es muy sencilla de implementar, y su sencillez y rapidez permiten ser adoptados como base de los algoritmos interactivos de simulación de propagación de incendios. En la figura 4.2 se muestra la excentricidad de la elipse que define el comportamiento de la propagación del fuego. Finney [10] utiliza el viento y la pendiente del terreno para definir los parámetros de la elipse. En la figura central y derecha, se puede ver el comportamiento elíptico de los algoritmos de esta tesis en dos instantes temporales de una simulación en un terreno horizontal y con viento dirección sureste.

La aplicación del principio de Huygens al escenario planteado en el apartado anterior requiere de la definición de reglas que permitan a una celda expandirse a las celdas vecinas, según las condiciones locales y globales. Dada una celda activa, es decir, en estado *Activated*, se calcula un porcentaje de propagación a cada una de las celdas vecinas teniendo en cuenta:

- La cantidad de fuego o *FirePower* de la celda.
- Pendiente del terreno.
- Velocidad y dirección del viento.

Algoritmo 4.1 Algoritmos del paso de simulación (*simulation_step*), la actualización de la intensidad y estado de una celda de vegetación (*VegetationCell::updateState*) y el proceso de expansión del fuego a una celda vecina (*VegetationCell::igniteFire*).

```

1: simulation_step
2:   // update ActiveCellList
3:   for each cell nc in ActivatedCellList do
4:     Add nc to ActiveCellList
5:     Initialize nc
6:   end for each
7:   // compute new states of ActiveCellList
8:   for each cell c in ActiveCellList do
9:     if c is BURNT, ActiveCellList.remove (c)
10:    c.updateState()
11:  end for each
12: end simulation_step

1: VegetationCell::updateState
2:   consumeFuel()
3:   EvaporationPhase()
4:   (FirePower == 0)? => FIRESTOPPED and return
5:   // Propagation to other cells
6:   propagatedCells.Add ( propagate_slope() )
7:   propagatedCells.Add ( propagate_wind() )
8:   propagatedCells.Add ( propagate_spotting_fires() )
9:   for each cell cc in propagatedCells do
10:    igniteFire ( cc )
11:  end for each
12:  (Fuel == 0)? => BURNT | SURVIVE
13: end VegetationCell::updateState

1: VegetationCell::igniteFire (VegetationCell c)
2:   calculate intensity ( neighbour cells)
3:   c.setState ( ACTIVATED )
4:   c.setFirePower ( intensity )
5:   // In next simulation step, this cell c will be active
6:   Add c to ActivatedCellList
7: end VegetationCell::igniteFire

```

A continuación se explica cómo cada punto afecta a la propagación de los incendios forestales.

4.2.2.1. Algoritmo Propagación por Contacto Directo

El algoritmo 4.1 recoge las acciones que se realizan en cada paso de simulación (*simulation_step*) y dos métodos (*updateState* y *igniteFire*). El método *updateState* expone las acciones que se realizan sobre una celda activa en cada paso de simulación. El método *igniteFire* recoge las acciones sobre una celda cuando ésta es incendiada (el fuego se ha propagado a ella).

El algoritmo *updateState* calcula en primer lugar el nuevo estado para una celda activa (actualiza su combustible y *FirePower*). A continuación se evalúa la propagación. Si la celda ha perdido todo su *FirePower*, no se propaga. En caso contrario (que aún conserve algo de *FirePower*), se analizan las celdas vecinas para calcular las probabilidades de propagación (ver algoritmo 4.2).

Si una celda vecina no está activa, se calcula una probabilidad de activarse, que combina el valor de la pendiente entre ambas celdas y la dirección y velocidad del viento. Cada clase de celda tiene su propio método de actualización (*updateState*) e ignición (*igniteFire*). Esta arquitectura permite considerar las diversas combinaciones entre celdas de distinta clase. Por poner un ejemplo más concreto del mundo real, es muy sencillo que un árbol en combustión se propague a regiones cercanas con arbustos o hierba seca. Sin embargo, al revés la situación es más difícil que se produzca.

Finalmente, si una celda acaba todo su combustible, pasa a estado SURVIVE o BURNT. En este último caso, la celda será eliminada de la lista de celdas activas en la siguiente ejecución de *simulation_step*.

El paso de una celda a modo *Activated* conlleva la asignación de una intensidad inicial calculada en el método *igniteFire*. Esta intensidad tiene relación con la intensidad del fuego de las celdas de su alrededor, no solamente la de aquella que ha sido la responsable de activarla. La intensidad final se limita para tener en cuenta la intensidad máxima (*MaxFirePower*) de cada clase de celda. De esta manera, un incendio intenso se puede propagar a celdas próximas con un valor inicial muy alto, permitiendo un avance voraz de los incendios.

Las celdas activadas e inicializadas de esta manera serán actualizadas en próximas iteraciones, incrementado la intensidad del fuego y consumiendo su combustible de la manera ya comentada, y a su vez, podrán ser capaces de propagar el

Algoritmo 4.2 Selección de celdas vecinas para su propagación según la pendiente (*propagate_slope*) y el viento (*propagate_wind*).¹.

```

1: cellList propagate_slope
2:   create new cell list Res
3:   for each neighbor cell vc do
4:     if vc is active, continue
5:     calculate slope
6:     P = get probability (slope)
7:     if passTest (P) then Res.add (vc)
8:   end for each
9:   return Res
10: end propagate_slope

1: cellList propagate_wind
2:   create new cell list Res
3:   for each neighbor cell vc do
4:     if vc is active, continue
5:     P = get probability (wind)
6:     if passTest (P) then Res.add (vc)
7:   end for each
8:   return Res
9: end propagate_wind

```

fuego a otras celdas vecinas.

Sin embargo, la propagación por contacto directo no es la única vía. En el apartado 4.2.3 se complementa este algoritmo con los *Spotting Fires*, que permiten a los incendios forestales propagarse a distancia, siendo el mecanismo por el cual un incendio puede cruzar un cortafuegos o un río si las condiciones de viento son las apropiadas.

4.2.2.2. Efectos de la Pendiente del Terreno

La propagación de los incendios reales tiende a ascender por las laderas de las montañas que les rodean, siguiendo la pendiente del terreno. Sin embargo, aunque

¹Al principio del apartado 4.2.2 se expone que es necesario introducir una cierta aleatoriedad. En estos y otros algoritmos se aplica este criterio mediante una función de probabilidad. Las funciones se consideran triviales y no se detallan en esta memoria. Las probabilidades asignadas se agrupan en el apartado 7.3.5.

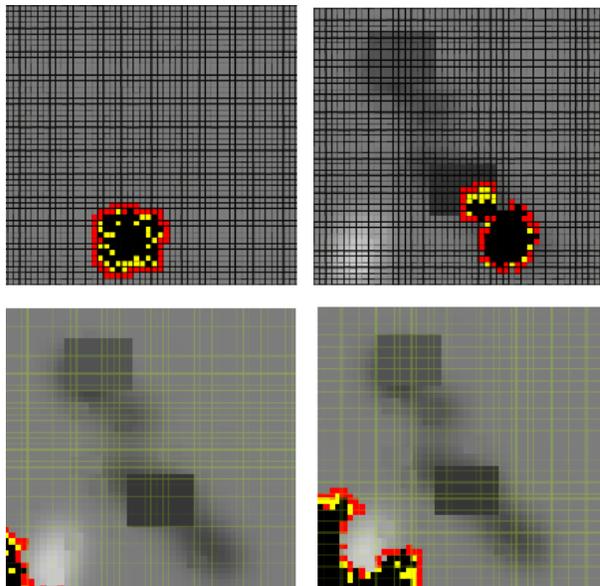


Figura 4.3: Simulación en un terreno con distintos tipos de pendiente. Fila superior: terreno horizontal y pendiente ascendente. Fila inferior: dos instantes temporales mostrando que el fuego evita bajar a un valle (pendiente negativa).

menos frecuentemente, un incendio también se propaga hacia abajo, en favor de la pendiente (ver figura 4.3).

El capítulo 7 muestra cómo los algoritmos presentados producen este efecto.

4.2.2.3. Efectos de las Condiciones de Viento

Tanto la dirección como la velocidad del viento tienen un impacto real en la evolución de los incendios forestales. Junto con la pendiente del terreno, están entre las variables que más afectan a su desarrollo.

El viento incrementa enormemente las probabilidades de propagación a las celdas vecinas orientadas en su misma dirección. A la propagación hacia atrás (en contra del viento) se le da un pequeño porcentaje de probabilidades, puesto que es una situación posible aunque improbable.

El capítulo 7 muestra cómo los algoritmos presentados producen estos efectos.

4.2.3. *Spotting Fires*

Los incendios no solamente se propagan por contacto directo, sino que el fuego se puede propagar a distancia, por medio de los efectos de radiación y convección y por el transporte de material en proceso de combustión. La simulación de los *Spotting Fires* tiene una importancia crucial para permitir a un fuego saltar barreras naturales o cortafuegos. En ciertas condiciones de dirección y velocidad del viento, un incendio activo podría ser capaz de cruzar una carretera, un río o un cortafuegos artificial.

Se ha simplificado la terminología y la casuística definiendo *Spotting Fires* como la propagación a distancia de los incendios, y que incluye los efectos más técnicos y específicos anteriormente descritos. Esta decisión se toma en base al objetivo primordial de los algoritmos aquí desarrollados: la eficiencia y el tiempo real. La unificación de métodos de propagación a distancia, permite una simplificación de los algoritmos y las reglas del comportamiento de la evolución del fuego.

El método *propagate_spotting_fires* del algoritmo 4.3 describe el proceso de celdas para su posible ignición. Se delimita una zona elíptica con un foco situado en el centro de la celda activa y cuyos ejes están definidos y orientados por la dirección y velocidad del viento, de una manera muy similar a como está definido el principio de Huygens. Para cada celda que cae dentro de este área elíptica, se calcula una probabilidad de activación que incluye tanto la pendiente del terreno como las condiciones del viento. Los factores que se tienen en cuenta para el cálculo de probabilidades incluyen el estado de las celdas, la diferencia de alturas y la intensidad del fuego combinada con la distancia entre las celdas.

Las celdas que pasen el test se activarán (se seleccionan para ser activadas en el método *igniteFire* ya descrito en el algoritmo 4.2.2) y se convertirán en nuevos focos activos para las siguientes iteraciones. Cabe la posibilidad de que algunas de esas celdas correspondan a zonas de barrera compuestas por celdas no combustibles (típicamente, un río o una carretera). En este caso, el método *igniteFire* que se utiliza es el asociado a las celdas de barrera (*BarrierCell::igniteFire* en el algoritmo 4.3). La peculiaridad de este método es que cambia su estado a RIVERCROSSING en vez de al estado ACTIVATED que se utiliza en las celdas de vegetación. Puesto que en las celdas barrera no hay nada que consumir, no se utiliza *FirePower*. Se define *crossingIntensity* como un valor de intensidad del fuego que pasa a través de celdas de una barrera.

El valor inicial de *crossingIntensity* se asigna en función de las celdas vecinas.

Algoritmo 4.3 Selección de celdas cercanas para su propagación a distancia (*propagate_spotting_fires*) y los métodos *updateState* e *igniteFire* de las celdas correspondientes a las barreras.

```

1: cellList propagate_spotting_fires
2:   create new cell list Res, Candidates
3:   get ellipse parameters (wind)
4:   Candidates = select Cells ( ellipse )
5:   for each cell cc in Candidates do
6:     if cc is active, continue
7:     calculate slope
8:     P = get probability (wind, slope)
9:     if passTest (P) then Res.add (cc)
10:  end for each
11:  return Res
12: end propagate_spotting_fires

1: BarrierCell::updateState
2:   // all the probabilities are reduced by 75
3:   propagatedCells.Add ( propagate_spotting_fires() )
4:   for each cell cc in propagatedCells do
5:     // if any cell cc is a vegetation cell,
6:     // the fire crosses the barrier
7:     igniteFire ( cc )
8:   end for each
9: end BarrierCell::updateState

1: BarrierCell::igniteFire (BarrierCell c)
2:   calculate crossingIntensity ( neighbour cells)
3:   if crossingIntensity > 1 then
4:     c.setState ( RIVERCROSSING )
5:     c.setCrossingValue ( crossingIntensity )
6:     // In next simulation step, this cell c will be active
7:     Add c to ActivatedCellList
8:   end if
9: end BarrierCell::igniteFire

```

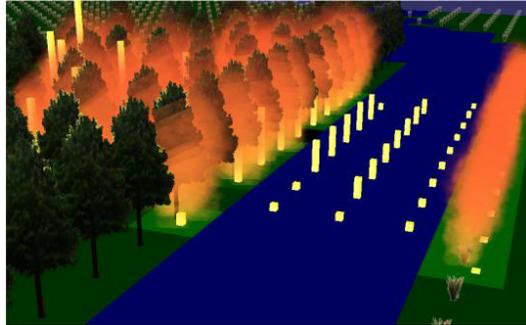


Figura 4.4: Visualización del comportamiento de la propagación por *Spotting Fires*. Las celdas del río representan mediante las barras amarillas el valor de *crossingIntensity*.

Un árbol alto y con gran intensidad (*FirePower*) aportará más *crossingIntensity* que la hierba con la misma intensidad. En concreto, el valor asignado a una celda de barrera es el 20% de la suma de las aportaciones de sus vecinos. Si una celda de barrera sólo tiene vecinos de su mismo tipo (barrera), ninguna celda aportará al valor inicial. En este caso, su valor de *crossingIntensity* se inicializa a la mitad del máximo valor de *crossingIntensity* de sus vecinas.

El tipo de vegetación es muy importante en la propagación de incendios a distancia. Los árboles altos (mejor aún si poseen una copa densa) permiten una mayor dispersión de partículas que pueden propagarse por el aire y llegar a distancias más lejanas que arbustos o hierba. Este comportamiento se ve reflejado en la como una aportación mayor al valor inicial de *crossingIntensity* que hace más factible la propagación a través de la barrera.

Una celda en estado RIVERCROSSING se considera activa, por lo que usará su propia versión del método *updateState*. Sólo se tendrán en cuenta los procesos de propagación por *SpottingFires*, descartando el efectos de la pendiente. El viento se tiene en cuenta dentro del método *propagate_spotting_fires*. Ya que se trata celdas de barrera, se simula la dificultad de propagación a través de una penalización consistente en una reducción de la probabilidades del 75%. Si aún así, se se propaga a una celda de vegetación (del otro lado de la barrera), se activará y por lo tanto, se considera que el fuego ha cruzado la barrera. En el próximo step, dicha celda se convierte en un foco activo del incendio.

También es posible que se propague a otra celda barrera. En este caso, se calcula su valor *crossingIntensity* y su estado pasa a RIVERCROSSING sólo si tiene

un valor mínimo de 1. Si no se cumple, la celda no se modifica lo que impide que el fuego se propague al otro lado de la barrera a través de ella (puede que logre pasar a través de otras celda barrera).

En la figura 4.4 se puede ver un ejemplo donde el fuego ha conseguido cruzar el río. Sus celdas visualizan mediante barras amarillas verticales el valor de *crossingIntensity*. En este caso, el valor ha sido suficiente para que se hayan activado los focos del otro lado del río, convirtiéndolos en focos del incendio.

4.3. Extinción de Incendios

El comportamiento de un incendio activo tiende a ser de crecimiento continuo, hasta que las condiciones del terreno (combustible, pendientes, barreras) o de viento impidan su propagación y por tanto, tienda a reducir su intensidad. Eventualmente, el fuego se acabará extinguiendo por inanición (agotamiento de combustible en celdas activas).

Sin embargo, este proceso puede durar horas o incluso días, siendo el coste inasumible por la sociedad. Para evitar que un incendio se des controle, las brigadas de bomberos se organizan para poder limitar el alcance y/o apagar el incendio en curso. Las tácticas a emplear por los bomberos son muy variadas y se enseñan en los cursos de formación, de una manera teórica y en situaciones simuladas.

Desde un punto de vista de interacción con el incendio activo, las armas de las que disponen los bomberos se pueden resumir en dos.

- Arrojar agente extintor, que incluye cualquier tipo y cantidad de agente extintor, ya sea a un foco activo, a un foco ya extinguido o a zonas aún sin quemar, para evitar su activación.
- Crear cortafuegos o trincheras, que sirvan de barrera que impida o dificulte la propagación.

En la definición de terreno utilizada en el apartado anterior, se contempla que la definición de las celdas pueda variar en el tiempo. En el caso de la creación dinámica de cortafuegos o trincheras más pequeñas, se asociaría el tipo correspondiente a una barrera, como si fuera una carretera o un río. Estas acciones no requieren implementar algoritmos especiales. Se solucionan a nivel de interfaz de usuario. Por lo tanto, en el resto de la sección, se procederá a comentar y analizar cómo se ha resuelto la simulación de la extinción de incendios, desde el punto de vista del uso de agentes extintores.

Algoritmo 4.4 Proceso de Evaporación (*evaporationPhase*) que invoca al proceso de extinción de cada celda (*Cell::EvaporateWater*).

```

1: Cell::EvaporationPhase
2:   create new cell list Affected
3:   // this active cell evaporates cells
4:   // within a radius (range)
5:   calculate affected cells (range)
6:   for each cell v in Affected do
7:     if v contains extinguisher agent then
8:       calculate factor ( FirePower, distance )
9:       v.EvaporateWater ( factor )
10:    end if
11:  end for each

1: Cell::EvaporateWater ( factor )
2:   calculate reduction ( factor, ExtinguisherAgentType )
3:   AmountWater = AmountWater - reduction
4:   if AmountWater <= 0 then
5:     AmountWater = 0
6:     if getState () == FIRESTOPPED then
7:       setState ( ACTIVATED )
8:     end if
9:   end if
10: end Cell::EvaporateWater

```

El conjunto de elementos extintores lo denominaremos *Agua*. El concepto *echar agua* es un término de amplio valor semántico, que sirve para definir a bomberos de a pie con mangueras manuales, arrojando agua constantemente, o para definir el comportamiento de hidroaviones, que suelen arrojar grandes cantidades de agua de manera puntual.

4.3.1. Conceptos Básicos

La simulación de la extinción de incendios se puede ver como una operación inversa al proceso de propagación de incendios. Mientras el fuego intenta consumir el combustible de su celda y propagarse a sus vecinos, el proceso de extinción intenta limitar ambos comportamientos.

Por un lado, arrojar agua a una celda activa reduce instantáneamente la cantidad de calor o *FirePower*, de dicha celda. Si la cantidad de calor llega a cero, la celda

pasa al estado *FireStopped*, un estado en el que la celda ha detenido su actividad, pero aún posee combustible, por lo que podría reiniciarse si se dan las condiciones.

Si una celda ya ha pasado a dicho estado y por lo tanto, su actividad ha cesado, el agua sobrante se mantiene en dicha celda. El agua sobrante actúa como colchón, de forma que impide que la celda vuelva a activarse. En la realidad esto ocurre así, pero la cantidad extra de agua no es para siempre, ya que las celdas activas cercanas y el calor ambiental de la zona van evaporando el agua residual.

La simulación de este efecto no se ha encontrado en la bibliografía y se ha añadido al modelo de simulación de la extinción de incendios propuesto en esta tesis.

4.3.2. Efecto Evaporación

El efecto Evaporación (ver algoritmo 4.4) permite que el agua residual en las celdas en estado *FireStopped* se vaya evaporando poco a poco, en función de las celdas activas cercanas. Durante el ciclo de actualización de las celdas, las celdas activas merman el agua residual de las celdas *FireStopped* situadas dentro de un radio determinado.

Si tras esta eliminación, la celda se queda sin agua residual, se realiza un cambio de estado, pasando a *Activated*, es decir, la celda vuelve a ser una celda activa.

4.3.3. Tipología de Agentes Extintores

Conceptualmente hablando, nos hemos referido a los agentes extintores como *Agua*, siendo un término genérico muy fácil de comprender. Pero la realidad es que existen múltiples tipos de agentes extintores, cada cual con sus características y propósitos.

Por simplicidad, hemos reducido el modelo de los agentes extintores a dos variables. *PowerFactor*, que sería equivalente a decir “cuanto fuego quita una unidad de este agente extintor” y *EvaporationFactor*, que sería equivalente a decir “cuánta cantidad de agente extintor se elimina (evapora) en cada unidad de tiempo ante una cantidad de fuego dada”.

Se ha tomado como referencia el agua, a la que se le ha asociado factores de valor 1.0. El resto de agentes extintores tendrán factores mayores o menores de 1.0, en función de su comportamiento relativo comparado con el del agua.

En el Anexo B se puede ver una clasificación de dichos agentes [56], que sirve de base para justificar los valores que asignamos a los parámetros usados en el

algoritmo propuesto.

4.4. Simulación Iterativa

Como se ha comentado al principio del capítulo, los algoritmos presentados se utilizan de manera continua para ir actualizando el estado de las celdas que representan el terreno. De este modo, se pueden describir con los siguientes métodos.

- **Inicialización.** Creación de la estructura de celdas de terreno e inicializar sus datos. Además, se añaden los focos activos que iniciarán el incendio.
- **Finalización.** Destrucción y liberación de los recursos utilizados por la simulación
- **Actualización.** Se ejecuta una iteración de los algoritmos. Por cada celda activa se actualizan sus variables internas y su estado, si procede, siguiendo las reglas definidas por su tipología de celda. Posteriormente se evalúa si alguna de las celdas se debe eliminar de la lista de celdas activas por haber llegado al final de su vida y se incorporan aquellas que han sido activadas durante la actualización.
- **Información.** Se obtiene información sobre una celda en concreto y su estado.

Una de las decisiones de diseño más importante a la hora de implementar los algoritmos reside en cómo definir la actualización de las celdas en términos temporales. Es decir, cada vez que se ejecuta un paso de la simulación, cuánto tiempo real avanza. Si es necesario simular el estado del terreno tras una hora de tiempo real, habrá que evaluar si es necesario ejecutar 3600 veces una simulación de un segundo o 60 veces una simulación correspondiente a un minuto de tiempo real.

Estos aspectos y su impacto en la simulación final se analizan en el capítulo 7, al presentar los resultados de esta tesis.

4.5. Resumen

En este capítulo se han presentado los algoritmos para la simulación de la propagación y la extinción de incendios en zonas forestales, así como las ideas principales detrás de su diseño.

Las características más importantes se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Definición de terreno basada en la subdivisión regular.
- Lógica basada en reglas de comportamiento de cada uno de los tipos de celda contemplados.
- Se utilizan los elementos más importantes que afectan a la evolución de un incendio forestal, como es la orografía del terreno y su categorización.
- Se hace uso de la información del viento, tanto velocidad como dirección, que es la variable que más impacto tiene en el desarrollo de un incendio junto con la pendiente del terreno.
- Se tienen en cuenta los efectos que permiten a los incendios propagarse aunque haya un cortafuegos o un río de por medio.
- El modelo de extinción de incendios se basa en la aportación de agentes extintores en las celdas del terreno. Cada unidad de agente extintor tiene una capacidad de restar potencia al incendio y eventualmente, pararlo. El agente extintor residual se queda en la celda, como remanente.
- Las celdas que están activas o recién quemadas generan calor que reduce el agua (agente extintor) de las celdas vecinas. Este efecto permite que celdas previamente apagadas se puedan eventualmente reavivar.

Parte del contenido de este capítulo se ha publicado en los congresos *GRAPP* 2010 [57], *3DGeoInfo* 2010 [58] y *3DGeoInfo* 2011 [59].

En el siguiente capítulo se presentará la extensión de este algoritmo para dar cabida a la simulación de la propagación y extinción de incendios en entornos urbanos.

Capítulo 5

Algoritmos de Propagación y Extinción de Incendios Urbanos

En este capítulo se extienden los algoritmos presentados en el capítulo anterior para dar soporte a la propagación y extinción de incendios en entornos urbanos. Una ventaja importante de esta extensión es que permite analizar de modo unificado ambos escenarios. Esto es especialmente importante para integrar zonas habitadas en territorios forestales.

Primero se comentan las peculiaridades del entorno urbano respecto de la propagación de incendios, incluyendo cuáles son los métodos más clásicos.

A continuación se caracterizan los incendios urbanos. En consecuencia se extiende la definición de las clases de terreno propuesta en el capítulo anterior. También se proponen nuevos parámetros para dar soporte al elemento clave del entorno urbano: el edificio. El tercer apartado presenta los nuevos algoritmos para la propagación del fuego.

En el apartado 5.4 se abordan los algoritmos de extinción de incendios para entornos urbanos. Para ello se incorporan nuevas estructuras y funcionalidad al método aportado para la propagación y extinción de incendios en el entorno forestal.

5.1. Entornos Urbanos y Forestales

En el capítulo anterior se han descrito los algoritmos relacionados con la propagación y la extinción de incendios en entornos forestales. Estos se basan princi-

palmente en las pendientes del terreno y el viento para el cálculo de la propagación. Además, se ha presentado cómo el algoritmo permite la propagación del fuego a través de elementos como carreteras, ríos y cortafuegos.

Sin embargo, los algoritmos descritos no pueden ser utilizados en entornos urbanos o semiurbanos, es decir, en las zonas mixtas o de interfaz entre la vegetación y las casas o edificios.

En la bibliografía, generalmente se suele separar los modelos de simulación en entornos puramente urbanos, *Urban Fires*, y simulación en entornos mixtos o de *interface* entre zonas urbanas y forestales, *Wildland-Urban Interface*. La razón es muy clara: los cálculos utilizados en los modelos que se aplican en entornos forestales y urbanos difieren en muchos aspectos. Una contribución de esta tesis propone la unificación de ambos modelos bajo una misma definición y metodología.

La diferencia más sustancial entre los incendios forestales y urbanos está ligada al comportamiento del fuego. Como se ha visto en el capítulo anterior, el fuego, aunque se trate de un sistema caótico, tiene un comportamiento bastante específico en entornos forestales. Simplificando mucho, se puede decir que el fuego tiende a subir pendientes y a ir a favor del viento. En entornos urbanos, la situación es sustancialmente distinta. Aunque la pendiente y el viento tienen influencia, la presencia de los edificios y su estructura y composición prevalece en entornos urbanos sin conectividad con áreas forestales.

La propia propagación del fuego en entorno urbano difiere notablemente de los forestales, ya que la forma del frente de fuego se diluye al incorporar elementos como las casas y edificios. El efecto de la meteorología también se analiza de manera diferente en entornos forestales y abiertos que en zonas urbanas.

La situación descrita hace que la integración de ambos modelos no sea algo trivial en lo referente a la obtención de resultados. La propagación de un fuego forestal a una casa introduce nuevas variables y condiciones a la formulación clásica, que complica sobremedida la obtención de resultados. En la bibliografía no se han encontrado trabajos que intenten realizar esta unificación. Sólo se han encontrado trabajos que abordan el problema bajo la denominación *Wildland-Urban Interface* (WUI) los cuales están orientados a los programas de simulación de alta carga computacional (ver apartado 2.1). Estos trabajos, por su propia orientación, evitan el problema de integrar ambos entornos [60].

Por otra parte, los modelos matemáticos empíricos, es decir, que surgen de la observación directa y captación de datos, requerirían la obtención de datos de incendios urbanos reales en la zona de interfaz forestal-urbana. Aunque han existido

y existirán incendios de urbanizaciones en zonas forestales, los datos no suelen ser capturados y medidos bajo criterios científicos (dado su carácter imprevisible).

Una contribución novedosa respecto al estado del arte es la unificación de los modelos de simulación en entornos forestales y urbanos, concebidos para su utilización dentro de los parámetros de interactividad definidos en los objetivos de la tesis. Así pues, no se contempla una separación conceptual de los métodos y algoritmos de propagación en áreas urbanas y se ha optado por la utilización de una representación celular que extiende la propuesta en el capítulo anterior para los entornos forestales. De esta manera, las zonas de interfaz o mixtas no resultan un problema, puesto que las celdas forestales y las urbanas conviven dentro de la misma definición.

El análisis del escenario urbano requiere un análisis acerca de las características más importantes de los edificios, sobre todo aquellas que afectan sensiblemente a la propagación del fuego. Igualmente se analizan los conceptos generales sobre cómo se propaga el fuego en áreas urbanas. Posteriormente también habrá que tener en cuenta aquellas variables que ayuden a dar soporte a la extinción de incendios.

En el resto del capítulo, se desarrollan los algoritmos orientados a la simulación aproximada de incendios en edificios, teniendo en cuenta la necesaria interrelación con el modelo utilizado en el capítulo anterior para simulación de incendios forestales. A su vez, se extenderán los conceptos de extinción de incendios a las zonas urbanas.

5.2. Caracterización de los Incendios Urbanos

El factor más diferencial de los modelos de simulación de incendios en entornos urbanos es la caracterización de los **edificios**. Para ello, en este apartado se revisa qué tipo de información es importante de manera conceptual para la simulación de incendios para, posteriormente, elegir aquellas variables que se ajusten a los objetivos abordados en esta tesis.

Desde un punto de vista muy simplificado, hay dos características de un edificio a tener en cuenta: La estructura interna del edificio y su composición (material).

Un edificio se puede ver como un conjunto de pisos, donde cada piso o planta posee una estructura interna basada en habitaciones conectadas por puertas. Además, se añaden características específicas para elementos como el tejado, escaleras, ascensores o las medidas de seguridad.

Puesto que la tesis está orientada al entrenamiento virtual desde una perspec-

tiva externa a los edificios, los modelos de propagación de incendios presentados no incluyen la formulación necesaria para obtener una simulación detallada de la propagación dentro de los edificios. Además, no se contemplan tampoco modelos específicos para distintos tipos de techo. Así pues, los métodos propuestos en esta tesis se orientan específicamente a obtener resultados aproximados en las fachadas de los edificios, sin un techo definido. Para realizar estas simulaciones, hace falta conocer la estructura interna de los edificios, pero con un objetivo muy preciso: simular los tipos de propagación que se dan en los edificios y que se detallan más adelante.

Por otro lado, la influencia de los materiales de construcción en la propagación del fuego es muy alta. Un ejemplo muy claro es la evolución del fuego en estructuras de madera comparadas con otro tipo de estructuras, como el hormigón. A su vez, la existencia de mobiliario afecta de manera muy determinante a la evolución del fuego, llegando al extremo de la posible deflagración debida a las conducciones de gas, o explosiones de bombonas de butano.

Aunque esta información es necesaria para obtener modelos exactos de propagación del fuego, en esta tesis se utiliza un enfoque simplificado que integra en un número reducido de parámetros el modelo de un edificio. Como se describe más adelante, se contempla un conjunto limitado de materiales tipo junto con su comportamiento ante los incendios. El efecto del mobiliario se abstrae mediante un factor numérico que asocia a cada habitación un factor multiplicador respecto del comportamiento por defecto.

5.2.1. Tipos de Propagación

El comportamiento dinámico de los incendios urbanos difiere de los forestales y tiene mucha más variabilidad, sobre todo teniendo en cuenta la existencia de edificios de mayor o menor altura. En un entorno puramente urbano, clásicamente compuesto por calles y bloques de edificios, un incendio activo puede propagarse por varias vías.

La propagación ascendente y la propagación en la misma planta son los métodos más comunes. El primero es el mecanismo por el cual un incendio activo se propaga a pisos superiores (ver figura 5.1). En este caso suele ser necesario que el incendio haya cogido una cierta intensidad y que la naturaleza del edificio facilite la propagación, como los edificios con estructura de madera o similar.

La propagación dentro de la misma planta es bastante más frecuente, y no es

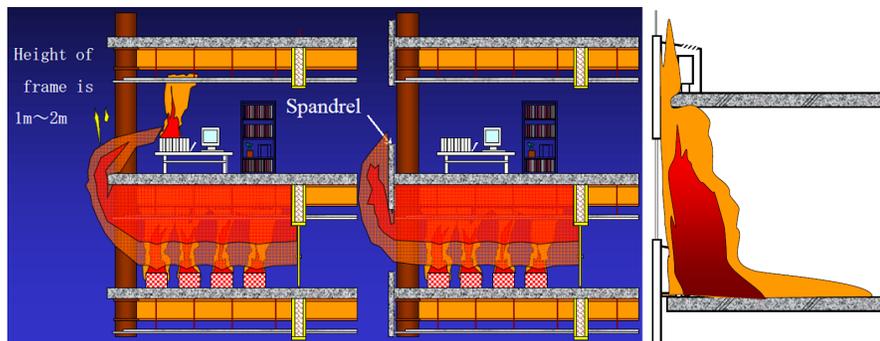


Figura 5.1: Mecanismos de propagación de incendios en sentido vertical [61].

necesaria una intensidad muy alta. En este caso, la conectividad de las habitaciones interiores y el estado de las puertas (abiertas o cerradas) son determinantes a la hora de la propagación del fuego. Aunque el tipo de estructura y paredes del edificio contribuye, no es el elemento más reseñable en este tipo de propagación.

Es menos común que un incendio se propague a pisos inferiores, pero no imposible, como se pudo ver en el incendio del edificio Windsor (Madrid) en 2005 [61]. En este caso en concreto, el incendio se produjo en la planta 21 y se expandió hasta la planta 17, y parece que se debió a deficiencias en la instalación de las medidas anti-incendios. Por otro lado, el desplome de parte del suelo donde está activo el incendio, suele permitir que el material incendiado caiga a la planta inferior, provocando que el incendio continúe en dicha planta. Típicamente, este comportamiento es bastante más común en edificios con estructura de madera.

La propagación del fuego entre edificios adyacentes es también factible y se asemeja a la propagación de incendios en una misma planta, teniendo en cuenta que la separación entre edificios, aunque adyacentes, es mucho más robusta y sin conectividad (sin puertas o ventanas).

El último caso a contemplar es la propagación del fuego entre edificios no adyacentes, típicamente, edificios que están en lados opuestos de una calle estrecha. En estos casos, aún no habiendo contacto entre los edificios, la probabilidad de propagación es alta, sobre todo en incendios altamente desarrollados y con existencia de llamas hacia el exterior. A la hora de controlar la evolución de un incendio es muy importante intentar evitar que se extienda a otros edificios, ya que se puede perder el control de la situación y extenderse a un área mucho mayor, provocando graves dificultades en la ciudad [62].

Las situaciones de emergencia ocurridas tras un terremoto dan una idea de cómo los incendios urbanos sin control pueden devastar grandes áreas urbanas, expandiéndose entre edificios libremente [35]. En estos casos, los incendios suelen ser provocados por roturas de canalizaciones de gas y de los sistemas básicos de electricidad, provocando múltiples explosiones en un breve período de tiempo y en localizaciones muy diversas.

5.2.2. Tipos de Edificios

Como se ha comentado en el apartado anterior, uno de los factores más importantes en el estudio de la propagación de incendios en entornos urbanos son las características de los edificios. Básicamente, nos podemos centrar en dos aspectos: los materiales de construcción y la conectividad interior.

Los materiales de construcción son diversos, encontrando edificios con estructuras de hormigón, de acero o edificios cuyo material principal es la madera. La distinción entre los tipos de edificio tiene impacto real en relación con los incendios. Los edificios con estructura de madera tienen una facilidad inherentemente mayor para propagar los incendios.

La subdivisión interna de los edificios se refiere tanto a la organización de cada planta del mismo, como a la subdivisión de cada una. Se han considerado para este trabajo dos tipologías concretas de edificios. Aquellos orientados a las viviendas particulares, y los orientados a oficinas. Está claro que existen multitud de edificios que se quedan fuera de esta simplificación, como fábricas, instalaciones industriales, aeropuertos, estaciones de metro, parkings, estadios deportivos, etc. pero casi todos estos edificios se pueden considerar “demasiado” especiales y requieren un análisis propio e individualizado al margen de soluciones generales. Por ejemplo, una fábrica de cartón, cuya materia prima y los productos químicos que maneja se pueden considerar de alto riesgo. En estas situaciones especiales la propagación de posibles incendios difiere bastante de la norma general, y por lo tanto las técnicas de extinción y contención de los bomberos deberán ajustarse a dicha situación, requiriendo un alto grado de especialización al personal involucrado.

Las situaciones de incendios en instalaciones o pisos subterráneos son sustancialmente distintas y de una manera similar al ejemplo anterior, se requiere de tácticas específicas para poder combatir incendios subterráneos. Típicamente, el riesgo en los incendios en las zonas subterráneas está más focalizado en el humo generado que en el propio incendio en sí.

Generalmente, en edificios orientados a la vivienda se puede encontrar uno o varios huecos de escalera, a los cuales convergen las entradas principales de varias viviendas particulares. Dentro de cada una, solemos denominar habitaciones a cada una de las subdivisiones de la misma, y pasillos a las zonas de unión o de paso. Aunque no hay una única distribución interna, se puede generalizar diciendo que una vivienda cuenta con una cocina, un cuarto de baño, habitaciones de tamaño medio y un pasillo que conecta el resto de estancias con la puerta de entrada.

Hay otra tipología de edificios cuya función está más orientada a servir de oficinas. En estos edificios la altura de cada piso suele ser mayor y además, la estructura interna es más abierta, con muchos espacios abiertos y con pocas habitaciones individuales (como pueden ser los despachos o las salas de reuniones). Además, la composición de las paredes no suele ser muy robusta con el objetivo de permitir una mayor flexibilidad de configuración.

Esta tesis considera que los entornos urbanos donde se llevarán a cabo las simulaciones de propagación y extinción de incendios se componen de edificios de viviendas y oficinas, ya sean altos (varias plantas) o de un sólo nivel. Se restringe los cálculos de la propagación de incendios a las zonas por encima del nivel del terreno (que excluye, por ejemplo, a los parking subterráneos). Más adelante se expone la subdivisión de los pisos en celdas y sus propiedades. Las propiedades de combustión se asocian a las celdas, no a los edificios o a sus diversas plantas.

5.2.3. Modelos y Discretización

Como se ha visto en el apartado 2.3.3 hay diversos modos de discretizar entornos urbanos. En este caso se modela el entorno usando celdas regulares (cuadrados). Como se verá en el apartado 7.3.1 se ha considerado conveniente el usar celdas de 3 metros en los entornos forestales. Esta decisión facilita la discretización de los entornos urbanos pues las aproximaciones del modelo a la realidad constructiva son bastante precisas.

El tipo de celda que define la tipología del terreno o *Land Use*, se ha extendido para dar cabida a nuevos tipos asociados a los edificios. De una manera similar, la naturaleza tridimensional de los edificios requiere la utilización de información adicional para almacenar la información de todos y cada uno de los pisos que componen los edificios. Así, se pasa de una estructura 2D a una estructura también regular en 3D. Las propiedades necesarias para la simulación se definen en cada celda, pues el modelo no asigna propiedades a nivel de edificios o plantas. En

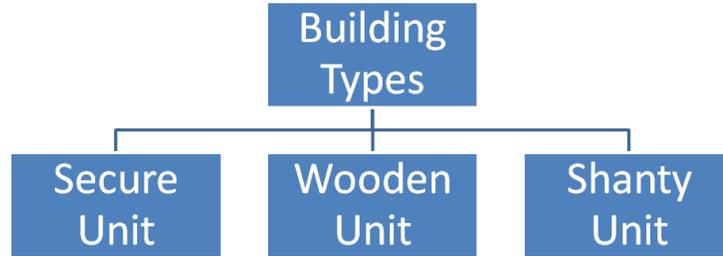


Figura 5.2: Tipos de celdas contemplados en esta tesis: *SecureUnit*, *WoodenUnit* y *ShantyUnit*.

definitiva, el modelo planteado se asemeja a modelos usados en otros tipos de análisis donde una realidad se discretiza en celdas (como los Métodos de Elementos Finitos) y en las celdas (regulares o irregulares) se establecen propiedades que representan (integran, abstraen) el contenido modelado por cada celda.

En el siguiente apartado se trata de la caracterización de las celdas.

5.3. Algoritmo para la Propagación de Incendios Urbanos

El algoritmo para la simulación de la propagación de incendios en entornos urbanos se basa en los mismos principios básicos que el anteriormente descrito para zonas forestales. De hecho, es una extensión del mismo.

Un primer apartado analiza el problema del modelado de edificios. Los siguientes proponen los algoritmos de propagación.

5.3.1. Modelado de Edificios: Tipos de Celdas

Para representar las celdas de los distintos tipos de edificios contemplados en esta tesis se utiliza la misma subdivisión regular que en el algoritmo de propagación de incendios forestales. Para añadir el soporte a los edificios se ha extendido el tipo de las celdas con los posibles tipos de edificios que se contemplan en esta tesis.

Los nuevos tipos de celdas que se han introducido en el algoritmo están basadas en la clasificación que hacen Iwami et al. [29], que utilizan tres tipos de edificios: *Fireproof*, *CoveredWooden* y *UncoveredWooden*. Cada tipo tiene una evolución distinta ante un incendio. También hay que reseñar que para Iwami el elemento básico de modelado es el edificio, no la celda. En nuestro caso, hemos considerado los siguientes tipos (ver figura 5.2):

Algoritmo 5.1 Algoritmo de la actualización (*updateState*) de las celdas de los edificios.

```

1: FloorUnit::updateState
2:   consumeFuel_BuildingType()
3:   EvaporationPhase()
4:   (FirePower == 0)? => FIRESTOPPED and return
5:   horizontal_Spread()
6:   vertical_Spread()
7:   // if this cell is exterior, it may propagate
8:   // to nearby buildings or vegetation areas
9:   if IsFacade then
10:    SpottingFires_Spread ()
11:    VegetationSpread ()
12:  end if
13:  (Fuel == 0)? => BURNT | SURVIVE
14: end FloorUnit::updateState

```

- **SecureUnit:** Unidad de edificio difícil de arder, ya que está compuesta mayoritariamente de cemento, hormigón y otros materiales no combustibles donde el fuego es propagado principalmente por el mobiliario y elementos no estructurales. Salvo catástrofes de grandes dimensiones, es muy difícil que colapsen edificios de este tipo. En el escenario de esta tesis, este hipotético colapso no se dará nunca. Equivalente al tipo *Fireproof* que define Iwami.
- **WoodenUnit:** Unidad de edificio de madera, de combustión muy rápida y donde la propia estructura puede consumirse. Este tipo da lugar al fenómeno *flashover* que se explica más adelante. Es similar en comportamiento al tipo *CoveredWooden* definido por Iwami.
- **ShantyUnit:** Unidad de edificio bajo, normalmente de madera, muy típico en la construcción de cabañas individuales o de construcciones muy bajas y de mala calidad, generalmente de muy poca altura. Su característica principal es que son muy combustibles, pero poco duraderos debido a la poca cantidad de material disponible. La propia estructura arde casi inmediatamente, así que no hay *flashover* en su evolución. Similar al tipo *UncoveredWooden* definido por Iwami.

En el algoritmo 5.1 se puede ver cómo funciona de manera genérica la actualización de estado de una celda correspondiente a una planta de un edificio. La función *consumeFuel_BuildingType* implementa el comportamiento y evolución de *FirePo-*

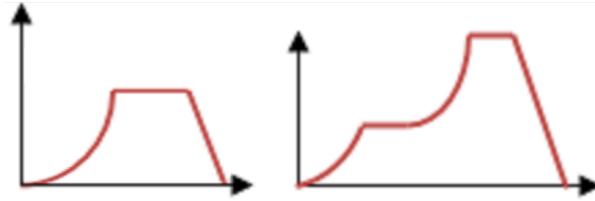


Figura 5.3: Esquemas de evolución de la intensidad de fuego (*FirePower*) utilizados en esta tesis para la celda *SecureUnit* y la celda *WoodenUnit*. En esta última se puede observar la existencia de un *flashover*.

wer según el material de la celda. La principal diferencia entre los tipos de celdas presentados anteriormente es precisamente la implementación de esta función, que define la evolución de un incendio libre a lo largo del tiempo.

El resto del algoritmo se irá desglosando en sucesivos apartados.

5.3.1.1. Flashover

El *flashover* (ver figura 5.3) es una de las características más reseñables en la evolución de un incendio en un edificio o casa. Suele ocurrir en edificios cuya estructura tiene capacidad de arder por sí misma. Inicialmente el fuego consume el interior del edificio, aumentando la intensidad progresivamente. Generalmente la intensidad máxima se llega a estabilizar, hasta que finalmente, la propia estructura del edificio arde. En este momento ocurre el *flashover*: Simultáneamente, gran parte del edificio arde, siendo una reacción muy violenta, donde la intensidad del fuego crece muy rápidamente en poco tiempo.

El *flashover* también se puede encontrar en el trabajo de Iwami, donde define un esquema de evolución que contempla dos *flashover* antes de la combustión total. En esta tesis se utiliza un esquema de evolución que incorpora un sólo evento *flashover*.

5.3.1.2. Modelo de Iwami

La formulación de Iwami considera que un edificio está compuesto por varias plantas con un área determinada (A_i). Relacionado con los aspectos tratados en esta tesis, Iwami calcula dos valores importantes: el combustible inicial de cada planta y la máxima intensidad del fuego.

El combustible inicial se calcula sumando el combustible de la propia estructura y el contenido de la misma (W_b y W_l). En las ecuaciones 5.1 se observa que Iwami divide el cálculo del combustible estructural según el tipo de edificio (*WoodenUnit* vs. *non-WoodenUnit*).

$$\begin{aligned}
 W &= W_b + W_l \\
 W_b &= 0,5 \times 1,5 \times H_c \times A_i \text{ (nonWoodenUnit)} \\
 W_b &= 60A_i + 90A_0 \text{ (WoodenUnit)} \\
 W_l &= w_l \times A_i
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
 W &: \text{Initial Fuel Quantity (kg)} \\
 A_i &: \text{Floor area of the } i\text{th story (m}^2\text{)} \\
 H_c &: \text{Floor height (m)} \\
 w_l &: \text{Fuel Density (kg/m}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

El valor máximo de la intensidad (Q_{max} , ver ecuaciones 5.2) depende de dos elementos: el área con elementos combustibles (A_f) y el flujo de aire que entra a la habitación (m_{in}). El valor A_f es una suma de distintos valores en los que participan el número de pisos (N), la densidad de combustible (w_l), el combustible estructural (W_b), la altura de cada planta (H_c) y el área de las mismas (A_i , A_0).

El flujo de entrada de aire m_{in} tiene en cuenta la anchura de la ventana (B) y la altura a la que la presión interna y externa se igualan (Z_n). Además, se utilizan diversos coeficientes (densidad del aire dentro y fuera de la habitación, coeficiente de flujo del aire) y la gravedad como datos de entrada.

$$\begin{aligned}
 A_f &= (0,54w_l^{1/3}A_i + 2NA_0 + 8NA_0^{1/2}H_c + 0,09(\frac{W_b}{A_0})^{2/3}A_i \\
 m_{in} &= \frac{2}{3}\alpha B\sqrt{2g(\rho_\infty - \rho_{in})(Z_n - H_c)^{3/2}} \\
 Q_{max} &= \min\{100 \times A_f, 3200 \times m_{in}\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_f &: \text{Surface area of combustibles (m}^2\text{)} \\
 N &: \text{Number of Stories} \\
 Z_n &: \text{Height Position equal pressure} \\
 \alpha &: \text{coefficient of air flow} \\
 B &: \text{Width of opening (m)} \\
 g &: \text{gravity (m/s}^2\text{)} \\
 \rho &: \text{Density of air (kg/m}^3\text{)}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Algoritmo 5.2 Algoritmos para el cálculo del combustible inicial según el tipo de material y el máximo *FirePower*.

```

1: WoodenUnit::initialFuel
2:   init_Fuel = 150 × FUEL_M2 × Area
3: end WoodenUnit::initialFuel

4: SecureUnit::initialFuel
5:   init_Fuel = 0.5 × 1.5 × HeightFloor + FUEL_M2 × Area
6: end SecureUnit::initialFuel

7: FloorUnit::calculateMaxFirePower
8:   Af = 0.54 × Area × pow (FUEL_M2, 1/3)
9:   Af += 2 × NumberOfFloors × Area
10:  Af += 8 × HeightFloor × sqrt (Area)
11:  Af += 0.09 × Area × pow (init_Fuel / Area, 2/3)
12:  m = (1/3) × 25 × WindowSize
13:  Qmax = min (FACTOR (BuildingType) × A,
14:             , FACTOR (BuildingType) × m )
15: end FloorUnit::calculateMaxFirePower

```

5.3.1.3. Modelo Propuesto

Por lo general cada planta de un edificio ocupará varias celdas, para lo que hay que adaptar las ecuaciones de Iwami que calculan el combustible inicial a nuestro modelo (ver ecuaciones 5.1).

La distribución en planta se abstrae mediante el conjunto de celdas. Las celdas de un edificio se consideran conectadas entre sí. Esta conexión se modela asumiendo puertas abiertas en cada uno de los lados de la misma que conecten con otras celdas del mismo edificio. Sin embargo, en el caso de celdas en contacto por pertenecer a edificios colindantes, se considera que no están conectadas por puertas.

Las celdas que representan a edificios necesitan almacenar información, tanto para datos estáticos como dinámicos. Los datos estáticos son aquellos asociados al identificador de edificio, número de planta, altura de la planta, *WindowSize* (se explica más adelante), cantidad de combustible inicial y el máximo *FirePower* o *MaxFirePower*. Los datos dinámicos permiten llevar el control de la propia evolución del fuego, llevar la cuenta de la cantidad de calor (*FirePower*), de la cantidad de combustible que queda, del estado interno de la celda (cada tipo de edificio tiene

una evolución distinta) y del soporte a la extinción de incendios que se expondrá más adelante.

Los algoritmos 5.2 muestran cómo se calcula el combustible inicial (*Initial-Fuel*) para los tipos *WoodenUnit* y *SecureUnit* y el *MaxFirePower* adaptando la formulación de Iwami. Estos valores sólo se han de calcular una vez para cada celda.

La conectividad interna no es necesaria representarla explícitamente ya que se ha supuesto que todas las celdas están conectadas por puertas abiertas. Sin embargo, sí es necesario representar las ventanas y balcones de las fachadas exteriores de los edificios. El área de las ventanas o balcones influye en cómo evoluciona un incendio y también en la longitud e intensidad de las llamas exteriores (si se producen). A su vez, el área de las ventanas influye directamente en las probabilidades de propagación del incendio a edificios cercanos (vía contacto directo o por radiación).

En nuestro caso, las celdas que son exteriores tienen un atributo denominado *WindowSize*, que define el área de las ventanas o aperturas hacia el exterior. Este factor también afecta a la propia evolución del incendio, puesto que a mayor apertura de ventana, el flujo de oxígeno es también mayor y el fuego se alimenta de dicho flujo para aumentar su intensidad.

Una vez la celda ha consumido todo su combustible (incluida su propia estructura si es el caso), el incendio comienza a apagarse por sí solo. Finalmente, sólo quedará calor residual que suponemos que no va a ser suficiente para iniciar otros focos en celdas vecinas, salvo que correspondan a celdas de vegetación, donde los criterios a aplicar se explicarán más adelante.

5.3.2. Propagación Horizontal: en la Misma Planta

En una celda que esté ardiendo, su cantidad de calor irá incrementándose según se vaya quemando el combustible (ver algoritmo 5.3) y, si procede, su propia estructura. Llegado un límite, el incendio entra en un estado en el que puede propagarse a las habitaciones colindantes. Se calcula una probabilidad en función de la cantidad de calor existente en la celda, siendo baja en condiciones cercanas al límite anteriormente reseñado y más alta según se incrementa la cantidad de calor.

Si el fuego se propaga a una celda adyacente, se actualiza su estado y se activa el foco del incendio con una intensidad baja. Este foco evolucionará según sus propias reglas en siguientes iteraciones temporales del algoritmo.

Algoritmo 5.3 Algoritmos de propagación horizontal y vertical en edificios¹.

```

1: FloorUnit::horizontal_Spread
2:   neighbors = GetNeighborsCells ()
3:   SelectCandidates (neighbors, FirePower)
4:   for each candidate fc do
5:     P = get probability (FirePower, BuildingType)
6:     if passTest (P) then IgniteFire (fc)
7:   end for each
8: end FloorUnit::horizontal_Spread

1: FloorUnit::vertical_Spread
2:   if FloorAbove.getState() == SAFE then
3:     P = get probability (FirePower, BuildingType)
4:     if passTest (P) then IgniteFire (FloorAbove)
5:   end if

6:   Repeat with FloorBelow with smaller probability
7: end FloorUnit::vertical_Spread

```

Una de las restricciones del modelo urbano propuesto es que las acciones contra incendios se llevan a cabo desde fuera de los edificios. Por ello, el algoritmo de propagación horizontal se ha diseñado para que la evolución horizontal sea lo más sencilla posible, pero que permita que un incendio pueda comportarse de una manera similar a como ocurre en la realidad.

Otro caso especial son los incendios que ocurren en los pisos bajos de los edificios y que están al borde de vegetación. En ellos el fuego se puede propagar al terreno circundante y viceversa. Estos casos se analizan más adelante.

5.3.3. Propagación Vertical: Hacia Arriba

En incendios con un alto grado de intensidad, la probabilidad de propagación del incendio a plantas superiores se dispara, sobre todo en estructuras de madera. En la simulación se ha modelado un mecanismo similar al expuesto para la propagación en horizontal (ver algoritmo 5.3). En este caso, una vez superado un límite de intensidad mínima, se calculan las probabilidades de que el incendio se propa-

¹En el capítulo 4 se comentó el uso de probabilidades en los algoritmos.

Algoritmo 5.4 Algoritmos de propagación por *Spotting Fires* y de *Building a Vegetación*.

```

1: FloorUnit::SpottingFires_Spread
2:   if FloorUnit is not Facade then return
3:     get ellipse parameters (wind)
4:     List = select Building Cells ( ellipse )
5:     for each BuildingUnit b in List do
6:       for each FloorUnit fc do
7:         calculate distance and angle
8:         P = get probability (wind, distance, angle)
9:         if passTest (P) then IgniteFire (fc)
10:      end for each
11:    end for each
12: end FloorUnit::SpottingFires_Spread

1: FloorCell::Vegetación_Spread
2:   Check FloorUnit is Facade
3:   select Neighbor Cells
4:   for each candidate cell cc do
5:     P = get probability (wind)
6:     if passTest (P) then IgniteFire (cc)
7:   end for each
8: end FloorCell::Vegetación_Spread

```

que tanto hacia arriba, como hacia abajo, donde sólo se tienen en cuenta el tipo de edificio o de celda en la que estamos y la propia intensidad de fuego. Como la propagación en dirección descendente es mucho menos probable, se tiene en cuenta esta característica aplicando un factor de reducción bastante radical.

Finalmente, si el incendio se acaba propagando verticalmente, ya sea hacia abajo o hacia arriba, se actualiza el estado correspondiente de la celda y en sucesivas iteraciones del proceso de simulación, dichos focos nuevos seguirán sus propias reglas para la evolución del incendio.

5.3.4. Propagación entre Edificios: *Spotting Fires*

Otro efecto que es necesario considerar al tratar con incendios urbanos es la posibilidad de que un incendio se propague a edificios cercanos, ya sean contiguos

(con contacto directo) o no (por contacto con la llama exterior o por traslado de partículas encendidas).

En el caso de entornos forestales, este efecto se soluciona en un terreno conceptualmente bidimensional. En entornos urbanos, hay que extender el método hacia las tres dimensiones. Dada una celda exterior de un edificio (en la fachada), con un incendio activo y suficientemente desarrollado, se calcula la probabilidad de que el incendio se propague a los edificios cercanos de la siguiente manera (ver algoritmo 5.4):

- Se define una zona elíptica 2D que delimitará la celda exterior del edificio. La elipse tendrá en cuenta la dirección y velocidad del viento.
- Por cada celda en dicha zona se calculará la distancia 2D y la desviación angular respecto al plano horizontal.
- La probabilidad de propagación será función de ambos valores (viento y desviación angular), pudiendo ocurrir que el incendio se propague o que no.

Cada celda conoce la altitud geográfica de la base del edificio, la altura de planta (todas las plantas tienen la misma altura) y su número de planta, pudiendo pues, conocer la altitud absoluta de cada celda de un edificio. Conociendo la distancia 2D entre dos celdas y las altitudes absolutas de las mismas, se puede conocer la desviación angular respecto de la horizontal.

5.3.5. Propagación desde y hacia Zonas Exteriores de Vegetación

Los edificios pueden estar localizados en zonas urbanas, donde la existencia de carreteras y caminos entre los edificios hace de cortafuegos. De esta manera, la propagación entre edificios se basa mayormente en la propagación que se ha introducido en el punto anterior.

Sin embargo, existen edificios o casas que están rodeados parcial o totalmente por vegetación, ya sea hierba, arbustos o árboles. Las zonas verdes de las ciudades y las urbanizaciones en el medio del bosque cumplen esta condición. En estos casos, si un incendio se declara en área forestal, existe la probabilidad de que se propague a viviendas de la zona.

La combinación de ambos esquemas de propagación de incendios está contemplada en esta tesis de manera natural e integral. Para que un incendio en un edificio pueda propagarse al entorno, debe de encontrarse en celdas exteriores del edificio.

La propagación es más probable si el incendio se encuentra en la primera planta que en la segunda y así sucesivamente. Además, el incendio debe estar suficientemente desarrollado para que existan llamas exteriores a través de las aperturas (ventanas, balcones) (ver algoritmo 5.4).

Juntando estos condicionantes, se calcula una probabilidad de que el incendio se propague al entorno, donde también entra en juego el tipo de vegetación (la hierba seca prenderá mejor y más rápido que los árboles más grandes). Las celdas de vegetación que se incendien por este mecanismo verán actualizados sus estados correspondientes y en siguientes iteraciones de la simulación aplicarán sus propias reglas de comportamiento, ya expuestas en el capítulo anterior.

A la inversa, también puede ocurrir que un incendio forestal amenace urbanizaciones o edificios que se pudieran encontrar en su camino. La formulación por la cual un incendio puede propagarse a un edificio es muy similar. Si la evolución de un frente activo le lleva a toparse con una o varias celdas de edificios, se calculará la probabilidad de propagación en base al tipo de edificio y la intensidad del fuego. En cualquier caso, por simplicidad se considera que será la primera planta del edificio la que se verá afectada por el incendio.

5.4. Algoritmo de Extinción

En la lucha contra incendios urbanos es importante intentar controlar el incendio activo para evitar que se propague a otros edificios o plantas y así limitar los daños. Así pues, la utilización de los recursos hídricos sobre edificios es una de las técnicas más utilizadas para combatir un fuego en un edificio. Esto se puede resumir en tirar agua con mangueras presurizadas hacia el interior del edificio. Estas mangueras pueden ser operadas manualmente por uno o varios bomberos o estar montadas en camiones con grúa.

El problema inverso, controlar la propagación de un incendio forestal a viviendas u otros edificios, queda también cubierto por este planteamiento, pues al añadir agente extintor sobre un edificio, se simula una protección frente a las celdas activas cercanas que tienden a elevar la temperatura y eventualmente propagar el incendio al edificio.

Los siguientes apartados describen la contribución de esta tesis para abordar la extinción en entornos urbanos, presentando el algoritmo implementado y sus parámetros.

Algoritmo 5.5 Algoritmo del proceso de extinción con agentes extintores.

```

1: FloorCell::SuppressionWithWater ( factor )
2:   calculate reduction ( factor, ExtinguisherAgentType )
3:   if getState () == ACTIVATED then
4:     FirePower = FirePower - reduction
5:     if FirePower <= 0 then
6:       setState ( FIRESTOPPED )
7:       AmountWater = -1 × FirePower
8:       FirePower = 0
9:     end if
10:  else if getState () == FIRESTOPPED then
11:    AmountWater = AmountWater + reduction
12:  end if
13: end FloorCell::SuppressionWithWater

```

5.4.1. Modelo *WaterJet*

De cara a modelar la acción de las mangueras, se utilizará el término *WaterJet*. Un *WaterJet* define un chorro de agua dirigido hacia una de las fachadas de un edificio, más exactamente, a una celda de tipo *Building*. Está parametrizado por la cantidad de agua que expulsa por unidad de tiempo, así como su alcance (fuerza) y la capacidad total de agua disponible.

El algoritmo de propagación de incendios interpreta que el agua incorporada por un *WaterJet* a una celda del edificio reduce la cantidad de fuego existente, *FirePower*. Eventualmente el fuego perderá toda la intensidad y pasará a estado *FireStopped* (ver algoritmo 5.5) y el agua no consumida quedará como remanente en la celda. Si la celda ya estaba en dicho estado, el agua seguirá acumulándose.

Un modelo más completo, podría permitir que el agua remanente pudiera filtrarse a otros pisos y que redujera las probabilidades de propagación de incendios cercanos a otras celdas, debido a la reducción de la temperatura ambiental. Sin embargo, modelos de este estilo están fuera del alcance de esta tesis, centrándonos en modelos más eficientes y por tanto más sencillos.

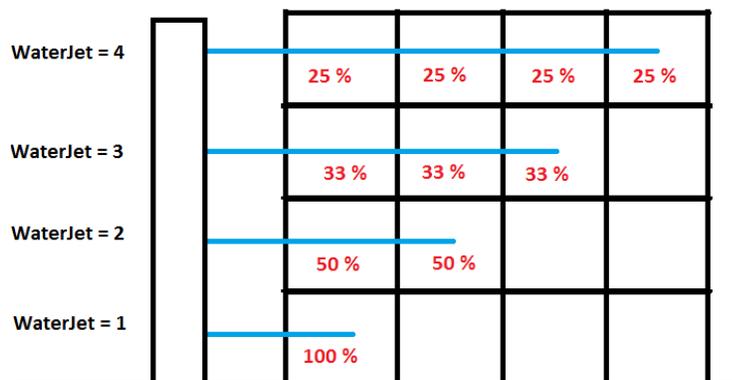


Figura 5.4: Diagrama del comportamiento de los chorros de agua (*WaterJet*).

5.4.2. WaterJets: Modelo del Alcance

La fuerza o alcance de un *WaterJet* se define mediante el parámetro *WaterJetLevel* que indica a cuantas celdas en línea recta llega el agua expulsada. Un *WaterJetLevel* de valor 1 indica que el agua del *WaterJet* no va más allá de la celda a la que está dirigida. Un valor de 2 indica que el agua es capaz de llegar a la siguiente celda en línea recta, y así sucesivamente (ver figura 5.4).

Sin embargo, con un *WaterJetLevel* con valor 2, la cantidad de agua depositada a cada una de las celdas a las que es capaz de llegar se reduce a la mitad de su capacidad. Similarmente, con un valor de 3, el *WaterJet* dejaría una tercera parte de su capacidad en cada una de las tres celdas a las que llega.

El desarrollo de este comportamiento se observa en el algoritmo 5.6. Inicialmente se calcula la dirección de avance del *WaterJet* (*dirección_WaterJet*) y el porcentaje a aplicar a cada celda afectada. Seguidamente se van visitando celdas vecinas según la dirección indicada hasta que se llega al *WaterJetLevel* o nos hemos salido del edificio. Cada celda afectada por el *WaterJet* llama al método *SuppressionWithWater*, anteriormente descrito en el algoritmo 5.5, ajustando el factor al porcentaje previamente calculado.

5.4.3. Aplicaciones del Modelo WaterJet

El algoritmo de extinción de incendios mediante *WaterJets*, aunque es simple, permite emular una gran variedad de equipamiento y tácticas de combate de in-

Algoritmo 5.6 Algoritmo del comportamiento del modelo *WaterJet*.

```

1: SuppressionFire_WaterJet ( FloorCell, WaterJetLevel )
2:   calculate direction_WaterJet
3:   percent = 100 / WaterJetLevel
4:   cellIndex = c
5:   for each WaterJetLevel do
6:     cellIndex.SuppressionWithWater ( percent )
7:     advance cellIndex in direction_WaterJet
8:     Stop for if cellIndex is outside the building
9:   end for
10: end SuppressionFire_WaterJet

```

ceñidos en edificios. Desde el equipamiento manual de bomberos, a los camiones pequeños y las grandes torres, todos los elementos de ataque exterior caben en la definición de chorro de agua y por lo tanto puede definirse en términos de *WaterJet*. Por ejemplo, los camiones conectados a la red de distribución de agua serían representados mediante un *WaterJet* con una capacidad sin límite (infinita en la práctica), mientras que las mangueras manuales conectadas a un camión independiente poseen una capacidad limitada por la capacidad del mismo.

El algoritmo presentado aquí permite la modificación de los parámetros de un *WaterJet* en cada iteración de la simulación. Por ejemplo, se puede simular el efecto de una manguera que recorra en zig-zag distintas ventanas y balcones de una fachada.

Por otro lado, el algoritmo permite que una misma manguera esté compuesta por varios *WaterJet*'s que sería la forma de modelar una manguera que lance agua con una dispersión muy alta (estilo lluvia fina) que abarque varias celdas del edificio a la vez.

5.5. Resumen

Se ha presentado los algoritmos propuestos para la simulación de la propagación y la extinción de incendios en zonas urbanas. Teniendo en mente la velocidad de cálculo que exige la simulación en tiempo real, se han realizado las siguientes asunciones y simplificaciones:

- Subdivisión regular, con celdas cuadradas

- Zonas urbanas con edificios no singulares (no se consideran naves industriales, polideportivos, etc.).
- Tres esquemas de evolución del fuego asociado a tres tipos de edificios
- La estructura interna y la conectividad de las plantas se ha simplificado

Es importante remarcar que los algoritmos forestales y urbanos están unificados bajo un mismo modelo. De una manera similar a los algoritmos forestales, se han tenido en cuenta los requisitos de velocidad e interactividad de la tesis para su desarrollo. El comportamiento de los algoritmos se analizan en el capítulo 7.

Para el algoritmo de extinción, se considera el ataque y contención desde el exterior de los edificios y no se consideran acciones desde su interior. La técnica más utilizada para extinción en edificios es tirar agua con mangueras presurizadas, ya sean manuales (operadas por bomberos) o por camiones con grúa. Esta tesis propone unificar ambas situaciones, definiendo el concepto de *WaterJet*. Un *WaterJet* es la entidad abstracta de un chorro de agua expulsado por una manguera hacia una fachada de un edificio.

Parte de los contenidos de este capítulo han sido publicados en los congresos *3DGeoInfo* 2010 [58] y *3DGeoInfo* 2011 [59].

Capítulo 6

Arquitectura del Sistema de Simulación Virtual e Integración con GIS

Los algoritmos presentados en los capítulos anteriores necesitan tener acceso a distintos tipos de información geográfica y meteorológica. En este capítulo se analiza el problema de conseguir esa información. Se presta especial atención al problema de la coherencia al integrar información procedente de diversas fuentes. Esto conduce a considerar las ventajas obtenibles con una adecuada semántica.

Tanto en los escenarios de entrenamiento, como en los de toma de decisiones asociadas a emergencias en curso, la información geográfica tiene una importancia máxima. Sin un terreno con elevaciones de gran detalle o sin la clasificación del uso del suelo, el simulador no podrá obtener resultados que se parezcan a la realidad. Este mismo problema existe también en los sistemas de predicción utilizados comercialmente: sin datos de entrada de calidad, los resultados obtenidos pierden credibilidad y fiabilidad.

A su vez, los datos geográficos asociados a una zona determinada tienen características muy diferentes, siendo en el caso extremo, casi incompatibles o contradictorios. Esta heterogeneidad deberá ser abordada a la hora de la preparación de los datos geográficos que serán utilizados por los algoritmos.

La utilización de modelos 3D generados a partir de datos reales tiene grandes ventajas para los alumnos de las escuelas de entrenamiento. También ofrece ventajas para los bomberos de una determinada estación [30], ya que la reconstrucción

3D de su propia zona ofrece oportunidades únicas para practicar y entrenar situaciones hipotéticas. Además, ante situaciones reales, la toma de decisiones puede verse mejorada utilizando sistemas de simulación que ofrezcan datos sobre la evolución esperada de los fuegos activos y que permita planificar el despliegue de efectivos [34]. Para estos casos, los datos 2D y 3D se combinan con información en tiempo real que viene de la red de monitorización de la zona.

Sin embargo, se puede considerar que la integración de estos datos para su uso en simuladores tiene diversos retos. Aquí nos centramos en dos retos que afectan a los objetivos de la tesis: Cómo integrar datos que vienen de fuentes heterogéneas y cómo presentarlos a los distintos usuarios del sistema de simulación.

El primer apartado presenta la arquitectura global del sistema para abordar la resolución de los retos planteados y estructura el contenido del capítulo.

El segundo apartado trata los datos GIS y meteorológicos requeridos por los algoritmos y presenta el problema de la heterogeneidad en la geoinformación. El tercer apartado aborda el reto de la integración semántica de fuentes heterogéneas y el segundo reto se trata en el último apartado.

6.1. Arquitectura Propuesta

La figura 6.1 presenta de un modo simple los elementos que integran una arquitectura que se propone como base para la gestión de los retos planteados en este capítulo. En la parte izquierda (módulo de color verde) encontramos el conjunto de fuentes de datos del sistema. El origen y naturaleza de las fuentes de datos nos genera un conjunto de datos geográficos heterogéneos: mapas de elevación, ortofotos, uso del suelo, información catastral, datos meteorológicos,... Este análisis de detalla en el apartado 6.2.

El módulo central (de color azul) engloba los modelos 3D con información semántica (submódulo superior), y el núcleo semántico del simulador (submódulo inferior). Los modelos 3D semánticamente enriquecidos abordan el problema de la heterogeneidad de las fuentes de datos (apartado 6.2.3) a través de la integración semántica. En el apartado 6.3.3 se expone un caso práctico de integración semántica (módulo naranja) que extrae la altura de los edificios integrando varias fuentes geográficas. En la figura se representa el flujo de información de esta caso práctico con unas flechas con trazo discontinuo. El núcleo semántico define la formalización necesaria asociada a la Gestión de Emergencias e incluye la categorización de los usuarios, los procesos y las tareas.

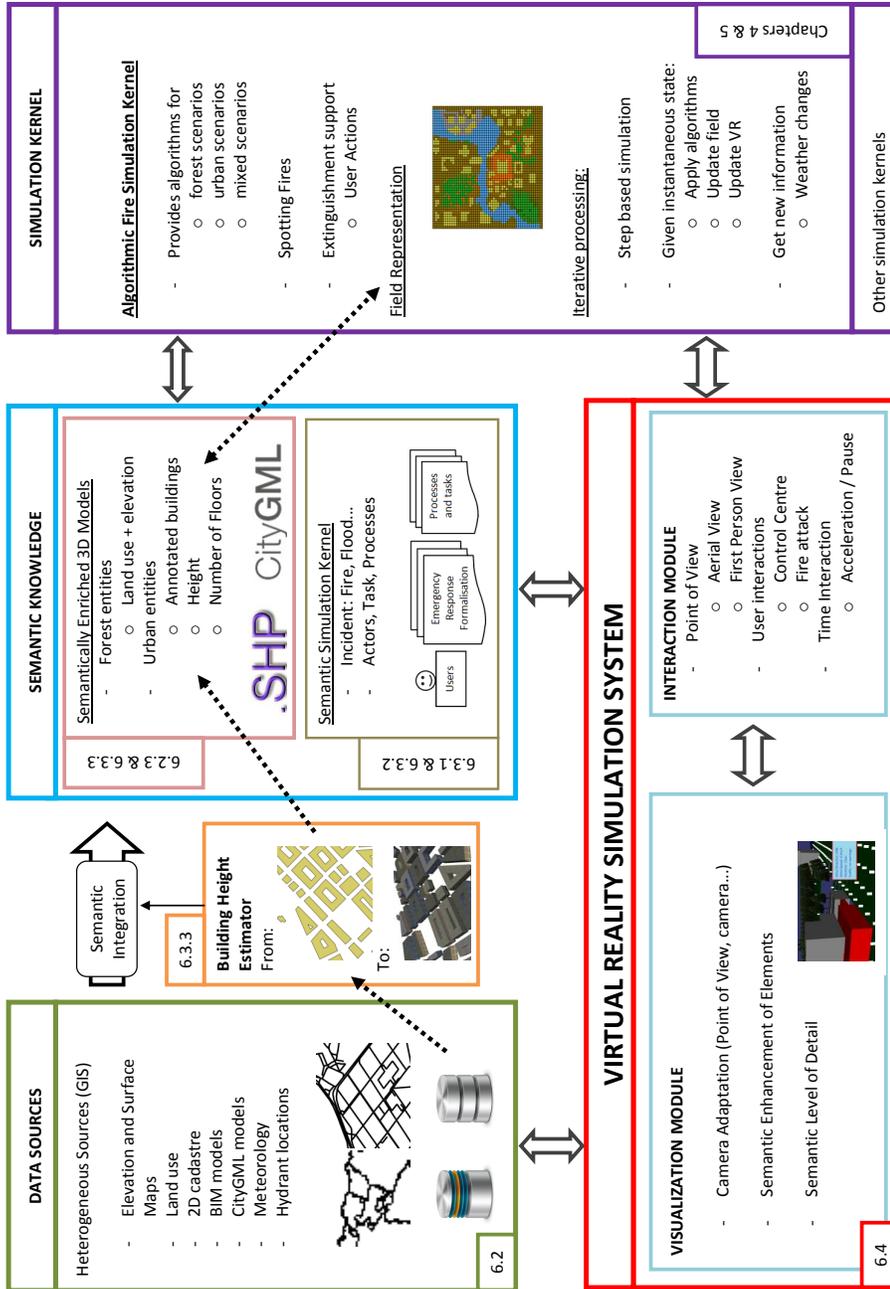


Figura 6.1: Arquitectura del sistema

El núcleo de simulación (módulo morado en la parte derecha de la arquitectura) incluye los algoritmos de simulación definidos en los capítulos anteriores. Aunque en esta tesis se trata el caso de los incendios forestales y urbanos, la arquitectura permite incluir otros sistemas de simulación (cálculo de inundaciones, de iluminación solar urbana,...).

El módulo que se encarga de la Realidad Virtual (de color rojo) incluye las adaptaciones del simulador a los conceptos semánticos del módulo semántico (azul) en las técnicas de visualización y de interacción (apartado 6.4).

6.2. Datos Requeridos

En el apartado 2.3.4 se introdujo la importancia que tiene la utilización de escenarios reales y reconocibles dentro de los sistemas de Realidad Virtual. En este apartado se analizan cuáles son los datos geográficos necesarios para que los algoritmos presentados en los capítulos anteriores puedan funcionar correctamente bajo este tipo de escenarios. Este apartado se cierra exponiendo un caso práctico.

6.2.1. Resumen de Datos y Fuentes

Este apartado resume los datos que necesitan los algoritmos para realizar simulaciones de propagación y extinción de incendios forestales y urbanos. También se citan sus fuentes. Al acabar el resumen, se añaden unos subapartados con más información de interés. Un último subapartado trata sobre los datos meteorológicos.

A continuación se resumen los datos geográficos:

- La cartografía del terreno afectado: la representación de las elevaciones del mismo. Típicamente se podrán encontrar este tipo de datos como *Elevation Maps* (imágenes en escala de grises), curvas de nivel (SHP) y mallas triangulares (3D). La resolución debe ser adecuada a la subdivisión de celdas. Los modelos de terreno que se pueden encontrar en SRTM¹ son de baja resolución, pero tienen la ventaja de que prácticamente todo el planeta está disponible. Las fuentes de datos regionales suelen ofrecer datos de terreno de alta resolución, generalmente obtenidos a través de vuelos de baja altura.
- El uso del suelo. La clasificación del suelo es necesaria para poder asociar a las celdas su tipo. Típicamente, esta información se puede extraer de pro-

¹ Shuttle Radar Topography Mission. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

ductos asociados a la base de datos *Corine* (*Corine Land Cover*²). El acceso a esta información se puede realizar a través de ficheros SHP. La clasificación del suelo se asocia a cada polígono mediante *features*. Otra opción más común es ofrecer un fichero SHP por tipo de suelo, donde el tipo se codifica en el propio nombre del fichero. La resolución de los datos debe ser lo más pareja posible a la resolución de los datos geográficos del terreno.

- Carreteras, caminos forestales y calles. Esta información podría estar integrada en el uso del suelo anteriormente descrito. Sin embargo, es mucho más común obtener la información sobre las carreteras y vías urbanas de un territorio de manera independiente, generalmente en ficheros en formato *ShapeFile* (SHP). Dependiendo de la fuente de datos, podremos encontrar que sólo se provean carreteras y calles importantes. En otros casos también estarán disponibles las carreteras locales y comarcales e incluso pistas forestales que podrían servir de cortafuegos.
- Entorno urbano. De una manera similar, la obtención de datos urbanos puede estar integrada con el uso del suelo, de forma que se tenga una representación en planta de los edificios. Sin embargo, este tipo de información carece de información semántica sobre los edificios que es importante para el algoritmo de propagación en entornos urbanos. En concreto, a partir de la proyección en planta de un edificio no se puede conocer la altura ni el número de pisos del mismo, así como tampoco se tienen datos sobre a qué tipo de edificio de los contemplados en el capítulo anterior corresponde. La información urbana más detallada se podrá encontrar en los modelos 3D de los edificios, representados en formato estándar como BIM o CityGML. Estos formatos permiten anotar semánticamente los elementos. En el caso de CityGML, la representación semántica de los edificios (número de pisos, altura, división interna, año de construcción, su tipología y uso) es inherente al propio formato.
- Información más específica de lucha antincendios. Hay información muy especializada y que es de gran interés para los bomberos y que engloba la red de suministro de agua y en concreto la geolocalización de los hidrantes de una ciudad o pueblo. A su vez, en los entornos forestales es importante

²CORINE Land Cover, Commission of the European Communities. 1994. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.

Datos GIS	Fuentes de Datos (ejemplos)
Cartografía	SRTM / ASTER
	Escáner Digitales Aéreos
Imágenes	SRTM / ASTER (falso color)
	Escaner Digitales Aéreos
Uso del Suelo	Corine Land Cover (Europa)
Carreteras	OpenStreetMap
	TomTom, NAVTEQ, GeoEye...
Edificios y modelos 3D	Extrusión planta 2D
	Modelos 3D
Hidrantes	Subconjunto OSM
Cortafuegos montaña	Preguntar a autoridades

Tabla 6.1: Resumen de distintos tipo de información geográfica.

definir dónde están localizados los cortafuegos (que raramente aparecen en la cartografía de las zonas), las torretas de vigilancia, las canalizaciones de agua cercana disponibles para su utilización y las masas de agua disponibles para helicópteros y avionetas.

En la tabla 6.1 se puede ver un resumen de los distintos tipos de datos geográficos junto con posibles fuentes de obtención. Comentar cada una de las fuentes queda fuera del ámbito científico, y por este motivo no se detallan en esta memoria.

6.2.1.1. Datos de Elevación

Como se ha dicho, para realizar la reconstrucción 3D del terreno donde se realizará la simulación, se puede partir tanto de imágenes que codifican las alturas en escala de grises como de fichero SHP, que incluyen las curvas de nivel como entidades poligonales.

En el primer caso, es común tener acceso a imágenes (en formato PNG, TIFF, GeoTIFF, etc.). Para su tratamiento es necesario conocer el origen y extensión de los datos codificados, así como el rango de valores que cada píxel de la imagen puede tomar. *Virtual Planet Builder* es un software basado en *OpenSceneGraph* que permite generar reconstrucciones triangulares a partir de este tipo de imágenes.

Si los datos de elevación se ofrecen como una colección de curvas de nivel (contornos 2D en formato *ShapeFile*, SHP), será necesario conocer la altitud de

cada curva de nivel y proceder a una reconstrucción 3D de la superficie que representa, para posteriormente muestrear la altura para cada punto 2D. Para este tipo de reconstrucciones, se puede generar primeramente una imagen en escala de grises y así situarnos en el ejemplo anterior, o utilizar algoritmos de *skinning* como *Nuages* [63].

Una vez obtenida la representación 3D de los datos de terreno, hay que diseñar un método que permita calcular las alturas en el centro de las celdas. Este proceso se realiza de manera sencilla a través del *sampling* del terreno. Por cada centro de la celda, se intersecta la geometría con líneas verticales. La elevación del punto de intersección se asigna a la celda en cuestión como su altura.

6.2.1.2. Uso de Suelo

En el ámbito europeo, la clasificación del uso del suelo se puede obtener de la base de datos de *Corine*. Clasifica el territorio de prácticamente toda Europa a una resolución de 1:100.000 en 44 clases, entre las que se encuentran las necesarias para poder distinguir los distintos tipos de vegetación, estructuras urbanas y superficies no combustibles. La información está accesible de manera vectorial a través de ficheros *ShapeFile* (SHP), por lo que es necesario realizar un muestreo para poder asociar a las celdas del terreno su tipología.

Este proceso de muestreo obtiene el tipo de suelo de manera numérica. Es necesario consultar la tabla de usos de suelo que asocia el dato numérico con su valor semántico.

En caso de utilizar otra fuente de datos para la clasificación del suelo, es muy posible que la clasificación no sea compatible con los datos de *Corine*. En este caso, aunque el proceso de muestreo pueda ser el mismo, la traducción semántica del valor numérico al tipo de suelo será distinta. Este es el caso de la información del uso del suelo almacenada en OpenStreetMap³. Así pues, nos encontramos con una fuente de heterogeneidad en los datos de entrada que no permite implementar una solución única y genérica.

En cualquiera de los casos, hay que realizar una adaptación de los datos externos a la infraestructura interna que se utiliza en los algoritmos de esta tesis. Para ello se realiza un mapeo de la información recibida a la utilizada en los algoritmos. El problema de la heterogeneidad es más complejo cuando se recurre a varias fuentes de datos externas para tener un mapa completo del uso del suelo. Se pueden

³OpenStreetMap, collaborative map. <http://www.openstreetmap.org/>

encontrar incluso con ambigüedades y contradicciones.

6.2.1.3. Datos de Edificios

La clasificación del uso del suelo representa las zonas que son consideradas edificios, calles o carreteras. Para poder acceder a información urbana de alto detalle es necesario tener acceso a sistemas o bases de datos que incluyan información sobre los edificios que componen una ciudad o pueblo.

Como se ha expresado en el capítulo anterior, las características que se necesitan saber sobre los edificios son:

- Proyección en planta. Generalmente esta información se obtiene en formato *ShapeFile* (SHP) como una capa nominativa dentro de la datos del uso del suelo.
- Altura respecto del nivel de la calle, número de pisos y tipología de edificio. El proyecto colaborativo *OpenStreetMap* (OSM) está promoviendo que dicha información sea anotada por los usuarios, de forma que la base de datos OSM se vaya enriqueciendo semánticamente.

Generalmente se dispone de una proyección en planta de los edificios, pero no así de su altura. Para poder estimar dicho valor, se pueden recurrir a ciertas aproximaciones o heurísticos como pueden ser:

- Fijar un valor uniforme; por ejemplo, una altura entre pisos de tres metros.
- Asignar a los edificios en ciudades entre 2 y 8 pisos de manera aleatoria, que sean de tipo *SecureUnit* si tienen más de 4 pisos y de tipo *WoodenUnit*, si tienen 2 o 3 pisos.
- En pueblos pequeños, la variación sería entre 1 y 4 pisos, de tipo *WoodenUnit* si tiene 2 o 3 pisos y *ShantyUnit* si tiene sólo 1 piso.

Existe otra opción para calcular la altura de los edificios de una zona determinada. Los mapas digitales de elevación (DEM) están generados de forma que se eliminan las desviaciones producidas por la vegetación o las construcciones artificiales (edificios, puentes,...). Por otro lado, existen productos cartográficos que sí incluyen esta información y se suelen denominar mapas digitales de superficie o DSM (*Digital Surface Map*), generados a partir de los datos en bruto de radares LIDAR y vuelos en baja altura.

La existencia de mapas de elevación (DEM) y superficie (DSM) para una misma zona permite muestrear ambos modelos en la misma coordenada geográfica y calcular la diferencia de altura. Si dicha coordenada está contenida en un edificio, la diferencia de altura corresponde aproximadamente con la altura del edificio en dicho punto. Este hecho permite automatizar la extracción de la altura de los edificios de una ciudad a partir de las proyecciones en planta de los mismos. Primeramente, se parte de un fichero *ShapeFile* (SHP) que represente los edificios a muestrear. Por cada edificio, se calculan varios puntos de muestreo que estén contenidos dentro del mismo y se calculan la diferencia de elevaciones entre el modelo DSM y el DEM. Finalmente, se asocia la altura del edificio como la media de los valores obtenidos. El algoritmo o método final es algo más complejo que el presentado (ya que hay que tener en cuenta varios aspectos técnicos de los modelos DSM y DEM, así como la existencia de edificios cuya proyección en planta se representa con polígonos cóncavos y con agujeros).

La representación conjunta de toda la información disponible sobre ciudades puede ser un problema, debido a la gran heterogeneidad en las fuentes de datos. En los últimos años se han desarrollado estándares como BIM (*Building Information Model*) o CityGML. Suministran herramientas y una representación estandarizada de carácter claramente semántico para ser utilizadas en la representación de la información asociada a las ciudades.

6.2.1.4. Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos disponibles abarcan múltiples variables. Así podemos encontrar información relativa a la temperatura, viento, humedad, precipitaciones e incluso datos sobre la calidad del aire. La lectura y tratamiento de todo este tipo de información se ha plasmado en diferentes publicaciones científicas [64, 65].

Sin embargo, para la implementación de los algoritmos presentados en los capítulos anteriores es necesario tener acceso a las condiciones de viento existentes en la zona. La dirección y velocidad del viento son datos que van asociados a cada celda del terreno, pero en muchas ocasiones ocurre que sólo se dispone de la información de viento global a la zona afectada, es decir, una dirección y velocidad únicas para todas las celdas que aproximan el terreno.

Adicionalmente, las condiciones del viento varían en el tiempo y más teniendo en cuenta que un incendio activo afecta a las condiciones de viento locales.

Aunque el cálculo de los flujos de viento dinámicos queda fuera del alcance

de esta tesis, es interesante remarcar que los algoritmos presentados utilizan direcciones y velocidades instantáneas en cada celda. Bajo este esquema, cualquier sistema que genere información detallada de las condiciones de viento a nivel de suelo podría utilizarse como módulo de entrada a la simulación de la propagación de incendios forestales. Desafortunadamente, el cálculo preciso de las corrientes de aire en presencia de un incendio activo es un proceso complejo en su fundamentación y por lo tanto, costoso computacionalmente. Así pues, la utilización de sistemas que modelan los flujos de viento locales requiere de recursos informáticos paralelos a los empleados en la simulación del fuego y extinción.

El siguiente apartado incluye un caso práctico.

6.2.2. Caso de Uso Práctico: País Vasco

Para analizar cómo se crean e integran las distintas fuentes de datos, se ha tomado como ejemplo al País Vasco. A través de la iniciativa *OpenData*⁴ del País Vasco se tiene acceso a múltiples datos geográficos que sirven para reconstruir escenarios reales donde simular la propagación de incendios forestales y urbanos. Esta información es de libre acceso y gratuita.

La preparación de los datos del terreno conjuga información procedente de varias fuentes para crear y rellenar la estructura de celdas del modelo virtual. En el proceso se asocia a cada celda los datos necesarios: datos de elevación, uso del suelo, infraestructuras civiles y los datos meteorológicos asociados a las condiciones de viento.

6.2.2.1. Datos de Elevación

En el caso del País Vasco, los datos de elevación que se ofrecen son imágenes en escala de grises más la metainformación necesaria para poder comprender y geolocalizar dichas imágenes. Además, para cada imagen de elevación se ofrece una imagen en luz visible u ortofoto que permite texturar el modelo 3D resultado de la reconstrucción. Usando esa información detallada, Virtual Planet Builder ofrece la posibilidad de generar modelos 3D multiresolución haciendo uso de los nodos *PagedLoD* de *OpenSceneGraph*. De esta manera, la visualización de modelos de terrenos tan extensos como el País Vasco se puede conseguir en tiempo real y sin un consumo excesivo de recursos (ver figura 6.2).

⁴*OpenData Euskadi*: www.opendata.net/euskadi/localizar

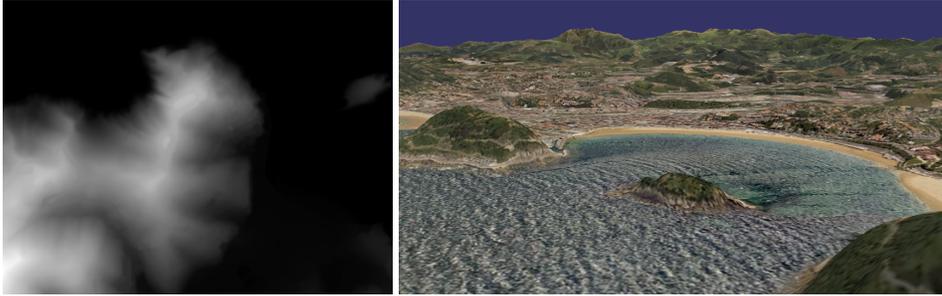


Figura 6.2: Visualización de los datos cartográficos del País Vasco. Izquierda: Imagen en escala de grises que codifica las elevaciones del terreno. Derecha: Reconstrucción final del terreno con textura.

Para la generación del modelo de celdas necesario para la simulación es necesario muestrear la altura en todos aquellos puntos que corresponden con el centro de las celdas. Ésto se realiza en preproceso, utilizando el propio modelo 3D reconstruido anteriormente, utilizando la clase *HeightAboveTerrain* de *OpenSceneGraph*.

6.2.2.2. Clasificación del suelo

La metodología para generar la información del uso del suelo es una extensión al muestreo de la altura del terreno. De igual manera, el uso del suelo se determina en preproceso.

En el repositorio de datos *OpenData*⁵, está disponible la información geográfica asociada a infraestructuras, que están integradas en la clasificación del uso del suelo (ver figura 6.3) que está basada directamente en los datos de *Corine*, y que incluye alguna corrección en los datos. En el Anexo B se puede encontrar un resumen de los tipos de suelo utilizados en *Corine*.

Así pues, se ofrece información sobre las zonas residenciales e industriales (pabellones industriales); autopistas, autovías y carreteras generales; zonas de playa y los límites de las zonas de agua como son los ríos y la línea de mar. Esta clasificación es suficiente para su utilización en el simulador. En un principio, tanto el agua, como la arena de la playa y las carreteras se pueden englobar dentro de un tipo de terreno que no sea combustible. Sin embargo, la clasificación de los edificios urbanos, aunque es útil, no es suficiente debido a las carencias de información sobre los propios edificios: altura, número de pisos, materiales de construcción, etc.

⁵Repositorio *OpenData*: <ftp://ftp.geo.euskadi.net/cartografia/>



Figura 6.3: Datos de clasificación de terreno de la zona de San Sebastián.

6.2.2.3. Información del entorno urbano: edificios

En el País Vasco encontramos en el sistema OpenData la clasificación del uso del suelo de las zonas residenciales. Como se ha visto anteriormente, desde el punto de vista de la información de los edificios, esta información está incompleta, ya que faltan aspectos importantes como la altura, el número de pisos y la composición.

En la generación de modelos para pruebas se han usado dos estrategias.

Una estrategia sencilla construye esta capa de datos (asociada a las zonas residenciales) con tres de pisos de altura y del mismo tipo (ver figura 6.4).

La segunda estrategia es más precisa. Los servicios cartográficos de OpenData ofrecen en su catálogo tanto los mapas digitales de elevación (DEM) como los de superficie (DSM) y para todo el territorio del País Vasco. Ésto nos permite extraer algorítmicamente la altura de los edificios. Este método se explica posteriormente en el apartado 6.3.3.

6.2.2.4. Información meteorológica

El acceso a la información meteorológica del País Vasco se realiza a través de la Agencia de Meteorología, Euskalmet⁶. En dicho sitio Web se pueden encontrar valores históricos de diferentes variables meteorológicas (temperatura, precipitación, humedad), incluyendo datos de viento. El sistema de monitorización del País Vasco consta de unas 100 estaciones automáticas, entregando nuevas lecturas cada 10

⁶EUSKALMET, Agencia de Meteorología de Euskadi. <http://euskalmet.net/>



Figura 6.4: Reconstrucción de los edificios de San Sebastián en base a extrusión de las proyecciones en planta y altura fija.

minutos aproximadamente. Además posee un radar meteorológico que muestrea la atmósfera y permite obtener información precisa e instantánea de la precipitación y perfiles de viento en todo el territorio. Dicho trabajo de investigación fue publicado como parte de los trabajos relacionados con la Seguridad Medioambiental dentro del Workshop *Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security* organizado por la OTAN [66].

La información recibida de las estaciones meteorológicas es discreta, y por lo tanto, no siempre será posible obtener valores exactos de una zona geográfica concreta. Como aproximación, se obtienen los valores de las estaciones más cercanas y se combinan para obtener un valor aproximado.

En aplicaciones de entrenamiento no se necesitan valores instantáneos de la información de viento. Por tanto, se pueden utilizar valores medios o históricos con el fin de tener valores de viento más estandarizados o normalizados. La elección de una situación de viento, en este caso, dependerá de la situación que se desee simular.

6.2.3. Heterogeneidad en la Geoinformación

Como se acaba de ver, la creación de las celdas que representan el terreno necesita de cierta información de entrada (la figura 6.5 detalla la conectividad y flujo de los datos con los algoritmos de simulación, representados en el módulo morado

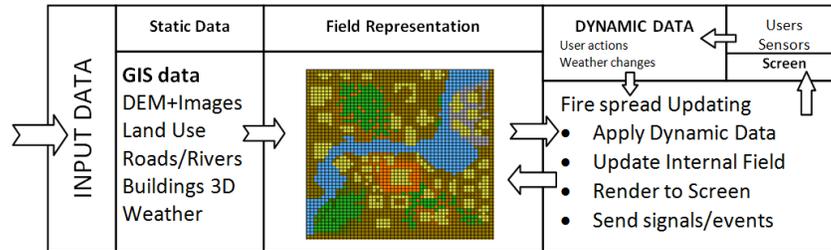


Figura 6.5: Resumen de las fuentes de datos necesarias para reconstruir el terreno.

de la arquitectura del sistema; figura 6.1). Por lo general, podemos encontrar una representación de baja resolución para casi cualquier región del mundo a través de los datos proporcionados por la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) o el satélite ASTER⁷. A nivel nacional, regional o incluso local, algunas instituciones ofrecen datos de elevación de mayor resolución y más actualizados de sus respectivas regiones, incluyendo ocasionalmente ortofotos de gran resolución. Con este tipo de datos, se puede generar reconstrucciones 3D de alta calidad de dichas regiones y por lo tanto, la información de las celdas que representarán dicho terreno tendrán información de elevación y pendientes más detallada y exacta.

Pero la información topográfica no es la única entrada necesaria para los algoritmos de propagación de incendios. La clasificación del suelo se debería obtener de servicios GIS, normalmente bajo responsabilidad de las autoridades administrativas. En el caso de la base de datos *Corine*, la Comunidad Europea es la encargada de su custodia y actualización.

La cantidad de información en los sistemas GIS puede ir aún más allá, añadiendo a la información sobre el uso del suelo la propia composición detallada, que incluye la clasificación de los árboles, densidad y edad de los mismos o las características completas de los edificios, como el año de construcción, los materiales, clasificación del edificio respecto de la peligrosidad ante incendios. Para los escenarios contemplados en esta tesis, también es interesante disponer de una localización de los recursos hídricos de la región, así como de sus características. Parte de dichos recursos se pueden encontrar mapeados en el uso del suelo (mar, lagos, embalses, ríos...), aunque en entornos urbanos, rara vez los sistemas disponibles incorporan información sobre los hidrantes (localización, tipo de hidrante, presión

⁷ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

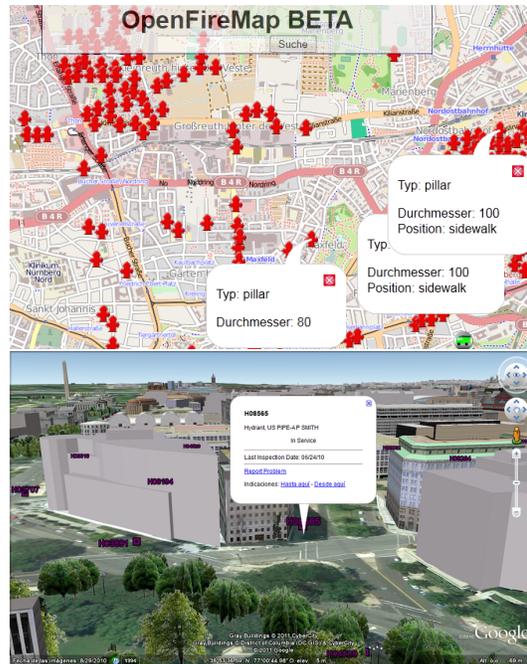


Figura 6.6: OpenFireMap [67] muestra la localización de estaciones de bomberos y de varias bocas de riego en Nuremberg (Alemania) utilizando los datos de OpenStreetMap. DC Water [68] ofrece un fichero KML con la localización de bocas de riego y su estado de mantenimiento.

mínima y máxima del agua o estado actualizado sobre el mantenimiento y nivel de funcionamiento).

OpenStreetMap ofrece datos cartográficos de manera libre, generados por usuarios anónimos de Internet de manera colaborativa. Aunque está focalizado en datos GIS tradicionales (calles, carreteras, edificios), hay varias propuestas de extensión que incluyen aspectos relacionados con las emergencias, como la localización de las estaciones de ambulancias, de bomberos, los tanques de agua, hidrantes o teléfonos de emergencia. OpenFireMap [67] (ver parte superior de la figura 6.6) es un prototipo para la visualización de datos de OpenStreetMap sobre la localización y metadatos de las estaciones de bomberos y los hidrantes de la ciudad de Nuremberg (Alemania). DC Water [68] mantiene actualizado un fichero KML (Google Earth) con la localización y estado del mantenimiento de los hidrantes de Washington DC (ver parte inferior de la figura 6.6).

En resumen, el simulador de propagación y extinción contra incendios debe poder trabajar con un alto grado de heterogeneidad en los datos disponibles, debido a las múltiples fuentes de datos, las diferentes calidades de los mismos, los formatos de archivo existentes y, posiblemente, los distintos tipos de representación en los sistemas de proyección (sistemas de coordenadas). Hay iniciativas europeas, como INSPIRE [69], que trata de mejorar y asegurar la interoperabilidad de los Sistemas de Información en toda Europa. Siendo una tarea actualmente en curso, aún tendrá que pasar cierto tiempo para ser ampliamente difundido en toda Europa.

Aunque uno de los principales problemas es la falta de datos o la dificultad para acceder a ellos (ver tabla 6.1), a veces el exceso de datos es también un problema importante, en el que hay que seleccionar o filtrar la información disponible dependiendo de la tipología de los usuarios, y su rol durante la simulación.

Desde el punto de vista conceptual, la heterogeneidad de los datos provoca una pérdida sensible de los conceptos semánticos, donde muchas veces se refiere al mismo concepto con diferentes representaciones o con identificadores diferentes, dando lugar a conflictos en los datos. La utilización de formatos de archivo tradicionales orientados a las representaciones de geometría para fines de visualización incluye una pérdida dramática de la semántica, reduciendo toda la información disponible a objetos geométricos sin distinción semántica, como pueden ser los conjuntos de triángulos que representan a un árbol o un edificio. Ling et al. [70] introdujeron una definición conceptual y una implementación preliminar de una capa *middleware* para hacer frente a este tipo de datos GIS heterogéneos, dados en una serie de formatos de archivo distintos. Sin embargo, la preservación semántica no está realmente garantizada, ya que sólo se considera un método de conversión entre dos formatos de archivo.

Por lo tanto, uno de los temas principales a resolver para obtener una solución escalable para el simulador de propagación y extinción de incendios es cómo los datos de entrada pueden ser recuperados por la aplicación, preservando en lo posible los conceptos semánticos intrínsecos de los mismos.

6.3. Integración Semántica de Fuentes Heterogéneas

En primer lugar hay que hacer notar una observación importante. En el ámbito de la información geográfica, la palabra *Semántica* se ha utilizado con frecuencia para referirse a la mejora y enriquecimiento de los GIS. Sin embargo, este enfoque no coincide totalmente con la acepción habitual de los términos semánticos de un

sistema de información [71]. A partir de aquí se expondrá y usará la perspectiva semántica común al dominio GIS.

Los productores de datos geográficos suelen utilizar el término *Semántica* para referirse a la parte de los datos geográficos que están relacionados con las propiedades y atributos, como el número de carriles de una carretera. En muchos modelos virtuales se pueden encontrar dos tipos de datos: las coordenadas y las texturas. Stoter et al. [72] clasificaron los distintos tipos de estándares 3D según distintas características (ver tabla 6.2, donde se resalta el soporte semántico de los estándares).

El enriquecimiento de estos datos con la semántica puede ser interpretada como sigue: hacer explícitas, en el nivel de datos, las características, así como su naturaleza y propiedades. Esto es lo que se propone en varios modelos y formatos de archivo, incluidos los orientados a la visualización, como VRML/X3D que incluye primitivas de bajo nivel, o BIM [73] y CityGML, que aportan un mayor nivel de abstracción [74, 75]. La conceptualización que ofrece CityGML de los elementos urbanos ha sido estudiada y validada por la iniciativa INSPIRE, donde se está posicionando como el estándar de referencia para el modelado de ciudades y sus entornos (ciudades digitales).

Los modelos BIM son modelos detallados y muy ricos semánticamente hablando, de los edificios y otras construcciones. Pueden ser utilizados para detallar los tipos de habitaciones y edificios. En el caso de CityGML, los autores utilizan la Semántica para denotar propiedades de las entidades espaciales. CityGML integra elementos semánticos relacionados con la gestión de desastres, gracias a una taxonomía de clases que distingue entre los edificios, objetos de vegetación, cuerpos de agua, y facilidades de transporte, como calles y vías férreas. Todos estos objetos son útiles para apoyar los análisis automatizados como por ejemplo, para encontrar la manera más rápida de ir a un edificio.

Como se dijo antes, BIM y CityGML son formatos de archivo adecuados para las aplicaciones de esta tesis. Permiten la representación de objetos con un alto nivel semántico, con elementos explícitos relacionados con zonas forestales y urbanas. Por lo tanto, pueden ser utilizados para enfocar semánticamente la resolución de parte de los problemas de heterogeneidad en los datos de entrada.

En el campo de “Gestión de Emergencias” (como es el caso de los incendios), todas las actividades tienen que estar formalizadas dentro de procedimientos legales, compuestos por una serie de tareas y procesos, donde se debe tener una clara relación entre los objetos, datos y los usuarios definidos [76]. Por esta razón, antes

	DXF	SHP	VRML	X3D	KML	Collada	IFC-BIM	CityGML	3D PDF
Geometry	++	+	++	++	+	++	++	+	++
Topology	-	-	0	0	-	+	+	+	-
Texture	-	-	++	++	0	++	0	+	+
LOD	-	-	+	+	-	-	-	+	-
Objects	0	+	+	+	-	-	+	+	+
Semantic	+	+	0	0	0	0	++	++	+
Attributes	-	+	0	0	0	-	+	+	+
XML Based	-	-	-	+	-	-	+	+	-
Web	-	-	+	++	++	+	-	+	0
Georeferenced	+	+	-	+	+	-	-	+	+
Acceptance	++	++	++	0	++	+	0	+	++

Tabla 6.2: Comparación de estándares de modelado 3D. Leyenda: '-' significa que no está soportado; '0' que incluye un soporte básico; '+' que está soportado; y '++' que tiene un soporte muy amplio [72].

de abordar el reto en el apartado 6.3.2, introducimos unas breves anotaciones sobre la formalización de los procesos contra incendios (apartado 6.3.1). Finalmente el apartado 6.3.3 muestra mediante un caso concreto la materialización de estas ideas.

6.3.1. Formalización de los procesos contra incendios

La mejor manera de obtener una formalización es estudiando e investigando los procedimientos de “Respuesta ante Emergencias” existentes. Los gobiernos locales y nacionales y las organizaciones internacionales cuentan con legislaciones que prescriben detalladamente los flujos de trabajo y los procedimientos de respuesta ante las distintas emergencias que pudieran surgir en su ámbito. El proyecto EU-FIRELAB [77, 78] publicó un detallado informe sobre los protocolos de actuación ante incendios forestales para varios países europeos. Teniendo en cuenta estos documentos y el análisis de la labor de los servicios de emergencia, es posible especificar qué tipo de datos pueden ser de interés, sobre todo cuando se realizan algunas tareas determinadas [79]. Los principales componentes de este modelo formal son los actores, sus tareas y la información que necesitan tener a su disposición. Por lo general, el lenguaje utilizado para representar este conocimiento es UML (*Unified*

Modelling Language).

El objetivo de extinguir un incendio es evitar los daños personales, a las propiedades y limitar la emisión de sustancias peligrosas a la atmósfera. El flujo de trabajo puede ser muy específico de cada lugar o región, pero tiene varios elementos comunes más importantes: el centro de llamadas recibe la llamada de emergencia, se registra el incidente e informa a la unidad rápida de intervención que suele estar compuesta de una brigada de bomberos (posiblemente especializada o con equipamiento diverso que pueda ser utilizado en múltiples escenarios).

El oficial en servicio (y los coches de bomberos que se necesiten) se desplaza a la zona del incendio. Justo antes o de camino hacia el fuego, es necesario examinar varias fuentes de información, tales como diferentes mapas topográficos, la ubicación de los recursos hídricos (aguas abiertas y bocas de riego), la ruta óptima a la zona, objetos vulnerables de la zona (disponible en los mapas de riesgo), información sobre las poblaciones cercanas, etc. Si el fuego cubre o amenaza un área grande (como a menudo sucede con los incendios forestales o que involucren infraestructuras críticas), un equipo de Operación Regional (*ROT*) es creado y será el que coordine las acciones.

En este caso, se pueden distinguir los siguientes actores: *CallCentre*, que representa al centro de recepción de emergencias; *Fbleader*, el jefe de brigada de un retén de bomberos; *OfficerDuty*, el oficial en servicio; y *ROT (Regional Operational Team)*, el equipo de operación regional. Las tareas más importantes relacionadas con la búsqueda y tratamiento de la información que se pueden identificar son: *RegisterIncident*, *FightFire*, *Report*, *OperationalLead* y *TacticalLead*. Por ejemplo, la tarea del operador en el centro de llamadas es registrar el incidente e informar a la brigada de bomberos que se ocupa del sector correspondiente. *Fbleader* es el responsable de las acciones directas para la extinción de incendios de un equipo. El oficial de guardia realiza las labores de liderazgo del funcionamiento en campo. Estos dos actores deben estar en contacto regular con el *ROT*.

La información necesaria para los procesos implicados difiere con respecto a los agentes involucrados. Algunos de ellos (el operador en el centro de atención telefónica, y los equipos de *Fbleader* y el oficial en servicio) tienen mapas topográficos a escala grande (es decir, *Topo1000*, escala 1:1000). El *ROT* (ubicado en un centro de comando fuera de la zona peligrosa) requiere de mapas de una escala menor (*Topo10000*, escala 1:10.000), la información sobre los ciudadanos o poblaciones cercanas, los objetos vulnerables (disponibles a través de Mapas de Riesgo) y, a menudo los mapas de servicios públicos (por ejemplo, las tuberías de gas). El

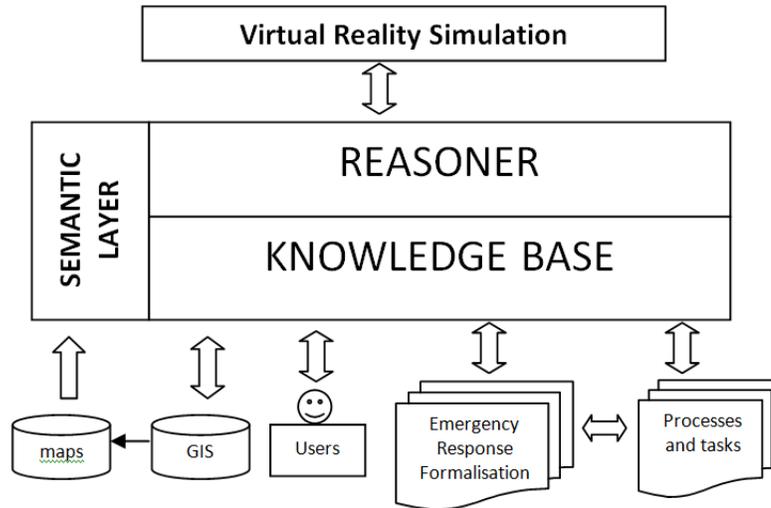


Figura 6.7: La capa semántica maneja los distintos tipos de información que será posteriormente utilizada en el simulador [81].

proceso descrito anteriormente puede mejorarse aún más con los agentes, tareas y la información necesaria para tipos específicos de incendios.

Por lo tanto, la información proporcionada por el simulador de Realidad Virtual también debe ser adaptada a la meta de la formación de cada actor, por ejemplo, para la formación de los bomberos en el campo o para el entrenamiento operativo y táctico.

6.3.2. Heterogeneidad y Semántica

Teniendo en cuenta la breve introducción de subapartados, podemos volver al núcleo del primer reto propuesto: heterogeneidad y semántica.

La heterogeneidad inherente a los datos y los usuarios puede ser abordada mediante una combinación de tecnologías semánticas. El conjunto de información debe integrarse en una arquitectura común o base de conocimiento. Por ejemplo, Marchese et al. [80] presenta algunas pautas para resolver la concordancia semántica entre fuentes de datos heterogéneas en la Gestión de Emergencias. Su trabajo incluye la descripción del modelo de conocimiento necesario, sus relaciones y la adecuación de los esquemas conceptuales.

Stoimenov et al. [82] desarrolló una solución basada en ontologías para hacer

frente a las fuentes de datos heterogéneas en el ámbito de la Gestión de Emergencias. Su solución se basa en la plataforma de interoperabilidad GeoNis para integrar el sistema.

Por motivos de simplificación, es común englobar todas las entidades y relaciones semánticas utilizadas para resolver la heterogeneidad en una capa independiente [83]. Su conceptualización de la capa semántica se encuentra entre la capa de la geoinformación y la que representa a los usuarios de los datos, ya que los usuarios son los consumidores finales de los datos.

En el caso de las simulaciones de Realidad Virtual [81], concebimos el middleware semántico como un conector entre el sistema de Realidad Virtual y los datos y los usuarios (la figura 6.7 es una abstracción del módulo azul de la arquitectura del sistema; figura 6.1). En este esquema, los usuarios y sus funciones se modelan después de la formalización de la lucha contra el fuego en procesos y tareas, por lo que se incluyen en la entrada de datos al simulador de Realidad Virtual. Según lo comentado en el apartado 6.3.1, la formalización del proceso de la lucha contra incendios provoca la categorización y la representación de diferentes entidades, procesos, tareas, subtareas y funciones. Una modificación en los roles de usuario, por ejemplo, debido a los cambios a nivel organizativo, permite modificar la conceptualización de las entidades de la capa semántica para actualizar la definición del usuario.

Bajo la arquitectura propuesta, la información GIS externa se mapea a través de dos repositorios distintos, pero relacionados.

El repositorio de los mapas digitales se compone de la información no vectorial, como pueden ser los mapas de elevación u ortofotos. En nuestro caso, esta información se encuentra reconstruida en forma de modelo 3D, listo para ser cargado por la aplicación. Así pues, este repositorio define dónde se almacenan y referencian los modelos 3D. También se pueden añadir otros modelos 3D que pudieran ser de utilización práctica en el simulador. Particularizando en el simulador de incendios, tenemos una lista de edificios 3D correspondientes a la zona de San Sebastián, siguiendo la georeferenciación y sistema de anotación que la capa semántica provee.

El repositorio de información GIS almacena aquella información de carácter vectorial y que está normalmente representada en capas. Bajo este repositorio podemos encontrar la red de carreteras y el uso del suelo (clasificación).

Ambos repositorios se mapean en la Base de Conocimiento de la arquitectura propuesta utilizando conectores GIS, que adaptan las características geográficas

individuales a las utilizadas en el dominio. De esta manera, se unifica bajo una misma definición las potenciales diferencias que pudiera haber entre distintas fuentes de datos.

En el País Vasco podemos encontrar fuentes de datos representadas en los sistema de referencia ED50 y ETRS89. Este último se ha elegido para ser el sistema de referencia central del dominio, por lo que se ha construido un módulo de adaptación que permite encapsular la información representada en el sistema de referencia ED50 a ETRS89.

Este proceso se puede repetir para cualquier otro tipo de dato que se quiera integrar en el sistema de simulación.

En la arquitectura, también se incluye la clasificación de los usuarios del dominio, y los procesos y tareas asociados a los protocolos de actuación ante emergencias. Esta información es necesaria de manera conceptual para dar cabida a diferentes entornos particulares. El objetivo de esta inclusión es permitir abstraerse de situaciones particulares.

Por lo tanto, toda la información relevante, compuesta por la información GIS, la categorización de usuario y todos los términos y conceptos de los procedimientos de respuesta a emergencias se almacena y se conceptualiza en un conjunto de repositorios y ontologías dentro de esta capa semántica, donde los métodos de razonamiento disponibles producen información que se conecta directamente con el simulador de Realidad Virtual.

Los procesos y las tareas que se muestran en la figura 6.8 (que detalla el contenido del cuadro inferior del módulo azul de la arquitectura del sistema; figura 6.1) son el resultado de la formalización de los procedimientos de respuesta a emergencias relacionadas con el proceso de extinción de incendios. La categorización del usuario se rige por los roles existentes en los procesos y tareas. Toda esta información además de todos los datos GIS relevantes debe ser utilizada por la capa semántica para analizar y accionar todas las mejoras semánticas en la simulación de Realidad Virtual. La información cartográfica, mapas 3D y la información estática de los edificios se cargan directamente por la simulación de Realidad Virtual, pero la selección de las mismas se realiza mediante decisiones tomadas entre la capa semántica y los datos GIS.

Todo este problema y su formalización trascienden el objetivo de la tesis y se encuentran expuestos con más detalle en otros trabajos [82, 84]. Aquí nos centramos en el problema de la integración semántica de la información relevante al simulador. El caso concreto se expone a continuación.

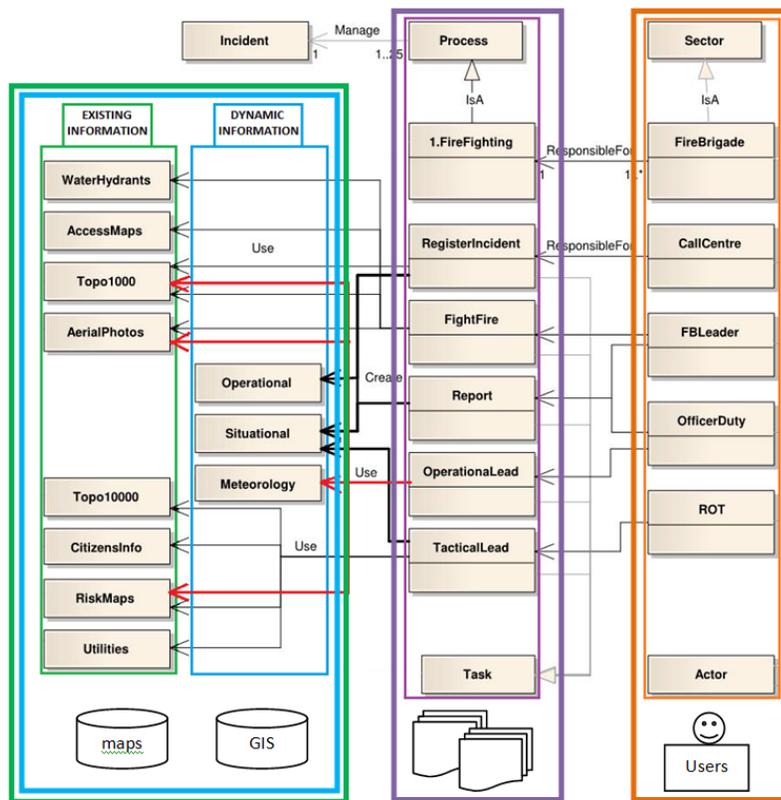


Figura 6.8: La categorización semántica mapea las entidades UML en el sistema de Realidad Virtual [59].

6.3.3. Combinación de fuentes de datos heterogéneas

En este apartado se presenta un ejemplo de cómo la información semántica puede ser utilizada para la integración de distintas fuentes de datos y que queda englobado en el módulo naranja la arquitectura del sistema (ver figura 6.1).

Contamos con acceso a los ficheros *ShapeFile* (SHP) de Euskadi, provistos por el programa OpenData. Por cada sector de Euskadi, se ofrece una serie de capas vectoriales entre las que se encuentra una correspondiente con la mayoría de edificios. En nuestro caso concreto hemos optado por la ciudad de San Sebastián. En la figura 6.9 se puede ver en la parte superior que los datos son bastante completos, pero hay ciertas carencias. Primero, hay algunos edificios que no están representados y segundo, los patios interiores de los edificios tampoco están representados.

Del proyecto OpenStreetMap se pueden extraer datos vectoriales de la misma zona (mostrados en la parte inferior de la figura 6.9). En ellos se puede observar que los patios interiores sí que están modelados, mientras que otros edificios no lo están. Así pues, es un buen ejemplo de que fuentes de datos de la misma zona pueden contener diferente información, pero combinándolas, se puede generar información nueva más completa.

Aún combinando las distintas fuentes, las capas vectoriales disponibles no informan sobre la altura de los edificios dentro de la ciudad. Sin embargo, una altura aproximada se puede calcular indirectamente, a partir de los modelos de elevación (DEM) y de superficie (DSM) de Euskadi.

El diagrama de la figura 6.10 muestra el proceso que se ha realizado para reconstruir San Sebastián en 3D a partir de diferentes fuentes de información pública. Primero se ha descargado la información de OpenStreetMap correspondiente a la zona de San Sebastián, representada en XML. Se ha creado una utilidad que permite construir ficheros SHP a partir de dicha información XML, haciendo uso de los tags semánticos (*Building*) y las relaciones geoespaciales.

El siguiente paso es mezclar los ficheros SHP, resultado del proceso anterior y los datos SHP del GV (Gobierno Vasco) (ver parte superior de la figura 6.11). El proceso selecciona primeramente los edificios de la capa OSM al ser más completos que los ofrecidos por GV. Posteriormente, por cada edificio de la capa GV se realizan operaciones geométricas para verificar si hay algún edificio en la capa OSM en las mismas coordenadas (intersección booleana de polígonos). Si no existe, se añade el edificio a la capa final. El resultado del proceso es una capa más completa que las capas iniciales.



Figura 6.9: Arriba: Fichero SHP de Gobierno Vasco (OpenData). Abajo: Visualización OpenStreetMap.

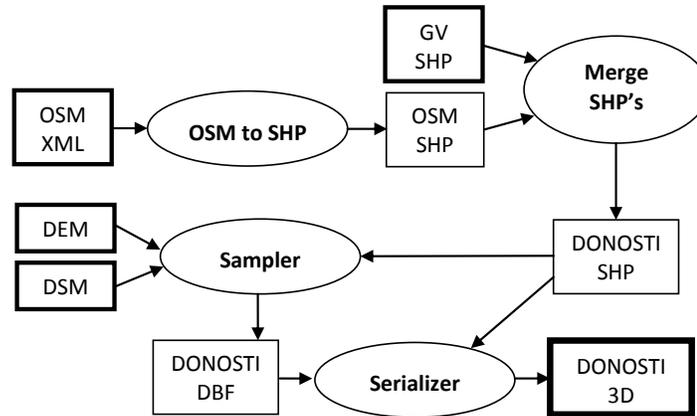


Figura 6.10: Diagrama del proceso de generación del modelo 3D

Para poder reconstruir los edificios de la ciudad de San Sebastián, es necesario calcular la altura de los edificios. Para ello, hacemos uso de los datos DEM y DSM de Euskadi (ver parte central de la figura 6.11). Evaluando ambos en un mismo punto geográfico, podemos saber la altura a nivel de suelo y a nivel de superficie. Si dicho punto se encuentra dentro de un edificio, la diferencias de alturas se corresponde aproximadamente con la altura del edificio.

El proceso para calcular la altura de los edificios genera un nuevo fichero DBF (*Shapefile attribute format*) con dos atributos nuevos que almacenan la altura del edificio y la elevación de su base (sobre el nivel del mar). Ambos ficheros se pueden cargar en aplicaciones GIS para ser explorados en 2D. Estos ficheros también se pueden visualizar en 3D con *osgEarth*. Para ello hay que crear un sencillo fichero en formato *.earth* (ver parte inferior de la figura 6.11). El submodelo correspondiente a los edificios 3D de la ciudad se puede exportar por separado para su uso en otras aplicaciones.

El proceso aquí descrito es un ejemplo de cómo la integración semántica de varias fuentes de datos es factible. Se han calculado las alturas de los edificios (una característica no presente en los datos originales) de manera indirecta a partir de otras fuentes de datos. En este caso se ha generado una combinación de ficheros SHP y DBF, con atributos personalizados y no estándares para representar el conocimiento adquirido. Esta información al exportarla a *CityGML* con un *Level of Detail 2 (LoD 2)* representa el conocimiento de una manera estandarizada y acce-

sible (el apartado 6.4.3 muestra los *Level of Detail* de CityGML).

6.4. Tecnologías de Visualización Semántica

Este apartado expone el segundo reto semántico abordado en la tesis: cómo presentar los datos geográficos adquiridos en el apartado anterior a los usuarios del simulador. Aquí se esbozan algunos de los aspectos de este amplio reto, presentando las aportaciones propuestas en la tesis en los correspondientes subapartados.

La utilización de tecnologías semánticas es un elemento clave para mejorar la percepción requerida por usuarios encargados de roles diversos. Los siguientes ejemplos lo muestran (más adelante nos centraremos en el objetivo propio de la tesis).

Una vez que las fuentes de datos semánticas se cargan en el sistema, gran cantidad de consultas pueden realizarse tanto en preproceso como en tiempo de ejecución. Las consultas relacionadas con temas geométricos, tales como distancias euclídeas, cálculo de áreas o de volúmenes y los test de visibilidad por lo general son fáciles de realizar y las respuestas se pueden obtener de una manera sencilla, incluso si los datos almacenados son de carácter puramente geométrico. Otras funciones más cercanas al mundo geográfico, como el cálculo de distancias en zonas urbanas, el trazado de rutas utilizando los mapas de carreteras o la recuperación del número de edificios de madera y sus años de construcción en una zona determinada, son igualmente realizables, pero indudablemente, su carácter es mucho más semántico desde el punto de vista del tipo de información geográfica que se requiere para ser respondidas.

Una preocupación muy típica ante una emergencia declarada por un incendio es determinar cómo y dónde desplegar los recursos disponibles, lo que implica la utilización de algoritmos de cálculo de rutas adaptados para estas situaciones [85]. En estos casos, hay que tener en cuenta las restricciones impuestas por la situación, como zonas prohibidas (que podría estar dentro de la zona incendiada), carreteras cerradas, atascos de tráfico o zonas de baja visibilidad (humo). Estos algoritmos generan la ruta más adecuada para llegar a la zona afectada, tratando de evitar riesgos innecesarios e incluso estimar la hora de llegada [86]. Los resultados se presentan a los usuarios como una ruta anotada en un mapa 2D, un texto formateado con las instrucciones paso a paso (listo para ser impreso), o como una ruta para descargar en el sistema GPS de los vehículos. La salida generada por lo tanto, depende de la función de los usuarios (administrador o conductor del camión contra incendios)

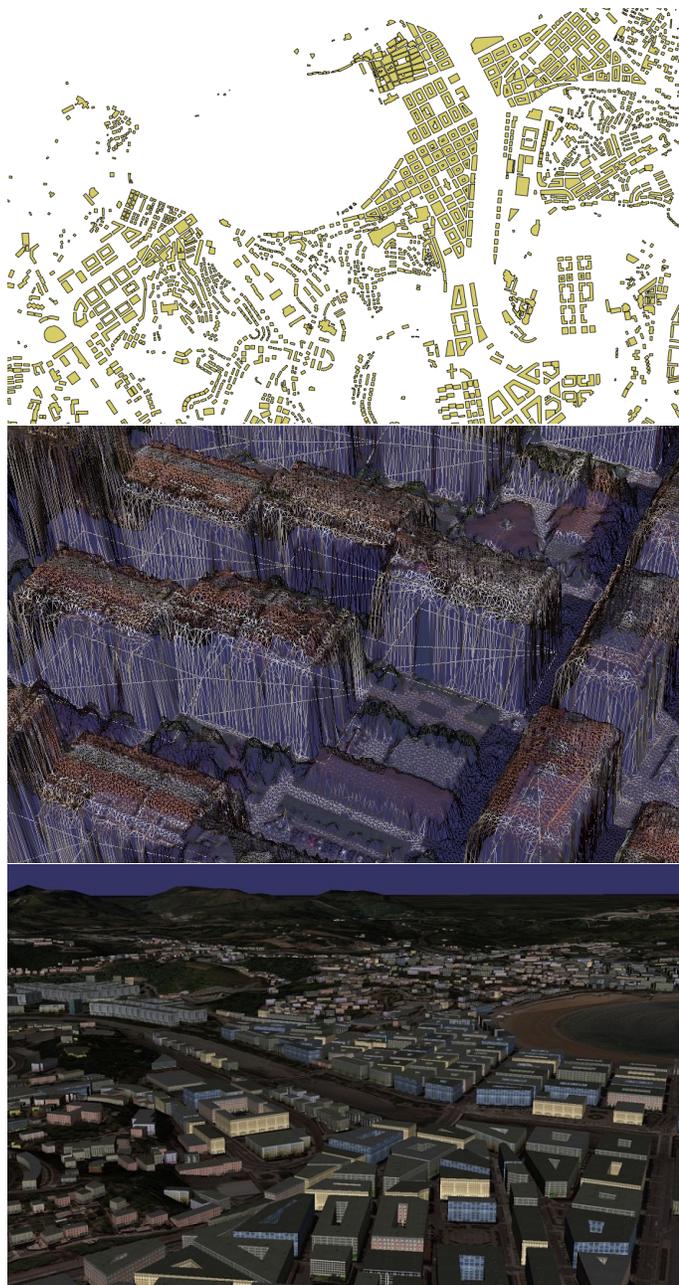


Figura 6.11: Arriba: SHP resultado tras mezclar ambas fuentes de datos. Centro: Modelo DSM de donde se obtiene la altura de los edificios. Abajo: Resultado final de la reconstrucción 3D de San Sebastián.

en la estructura de los equipos anti-incendios.

El despliegue de los recursos humanos y técnicos puede ser mejorado semánticamente, aunque depende en mayor medida de la disponibilidad de la información. Si existe información disponible sobre la localización de las tuberías de agua, las bocas de riego y de su situación técnica (debido a datos estáticos previamente obtenidos o por medio de sensores remotos), la selección de los recursos ante la eventualidad de un incendio puede ser optimizada. Por un lado se pueden elegir los camiones de bomberos más apropiados teniendo en cuenta las bocas de riego cercanas, así como su equipamiento. En gran medida, estas acciones permiten reducir la probabilidad de cometer errores en las tareas previas a la salida que incluyen principalmente la selección del equipo encargado de la primera intervención en campo y que sin lugar a dudas, es vital para intentar atajar los incendios en su fase más temprana.

Sin embargo, estos escenarios descritos no se basan específicamente en el sistema de Realidad Virtual ya que pueden ser independientes de y no relacionados con la Realidad Virtual (por ejemplo, las aplicaciones basadas en texto o relacionadas con la Web).

En el caso del simulador de incendios, la experiencia de los usuarios también puede ser mejorada utilizando el conocimiento semántico presente en los procesos de propagación y extinción de incendios. Esta afirmación se va a mostrar con tres casos prácticos que justifican la importancia de la capa semántica propuesta en el apartado 6.3.2) y quedan enmarcados dentro del módulo rojo de la arquitectura del sistema (ver figura 6.1).

6.4.1. Resaltado semántico de elementos virtuales

El resaltado semántico de elementos específicos es la forma más sencilla de adaptar las simulaciones de Realidad Virtual a los distintos roles de los usuarios. El resaltado semántico debe ser fácilmente comprensible por parte de los usuarios. En este caso, el middleware semántico (ver figura 6.7) se encarga de provocar cambios en elementos virtuales, con el fin de resaltar elementos concretos y que sean visualmente más distinguibles del resto de elementos. Hay que hacer notar que en este tipo de problemas interesa más facilitar la percepción de la información por parte del usuario que el realismo de las imágenes. Ésto contrasta con los objetivos habituales de muchas aplicaciones de visualización, cuyo objetivo es hacer indistinguible lo virtual de lo real.

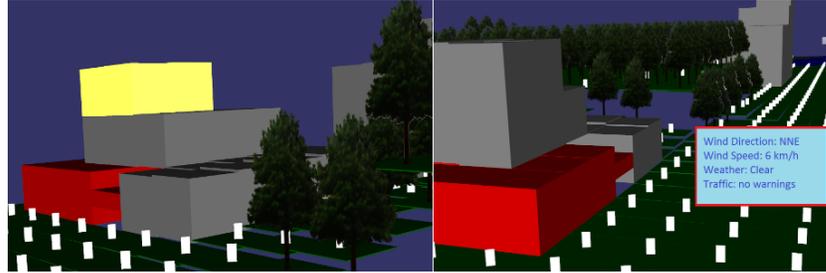


Figura 6.12: Resaltado semántico de elementos virtuales. Izquierda: Edificios en llamas (planta) se han seleccionado en rojo, y la planta objetivo en amarillo. Derecha: Información adicional en pantalla, en este caso, relacionada con las condiciones de tráfico y meteorológicas.

A modo de ejemplo, en los prototipos del simulador interactivo, un bombero de campo recibe la información pertinente para localizar un piso concreto de un edificio en llamas. Para ello se utiliza un característico color amarillo (ver figura 6.12). La capa semántica es la que proporciona la información del piso (y edificio) a resaltar por el sistema de Realidad Virtual. El resaltado semántico se aprovecha de los identificadores asignados a los objetos virtuales, que quedan vinculados a las propiedades semánticas.

El resaltado semántico también se utiliza para proporcionar pistas visuales a los conductores de camiones de bomberos sobre la ruta óptima desde la estación de bomberos hasta la localización del incendio [86]. En este caso, la representación virtual de la ruta incorpora información en tiempo real sobre la evolución del incendio, el estado del tráfico o cualquier otra información importante a través del Head-Up Display (HUD) o información en pantalla.

Las consultas semánticas pueden ser lanzadas por los usuarios, como resultado de una acción de *picking* en la vista gráfica. La acción de usuario (2D) se transforma en una intersección 3D de un hipotético rayo que sale desde la cámara virtual. Este rayo devuelve aquellos objetos que encuentre en su camino. En un sistema no semántico, este procedimiento devuelve coordenadas 3D y la instancia de los objetos que ha interseccionado. Al estar el sistema enriquecido semánticamente, puede identificar si dichos objetos se tratan de un edificio, carretera o cualquier objeto. Esto se consigue mediante una capa de lógica que permite acceder a la semántica de los objetos y así realizar más consultas sobre sus propiedades y relaciones.

6.4.2. Adaptar interfaces gráficos

Las interfaces de usuario se diseñan generalmente para cumplir los requisitos de utilidad de los usuarios finales, como resultado del proceso de especificación funcional de las primeras etapas de desarrollo. Pero, incluso dentro del mismo grupo de usuarios con el mismo rol, diferentes personas requieren adaptaciones específicas y personales de la interfaz. Sin pretender realizar una exposición del amplio campo de los interfaces gráficos, antes de abordar el reto que presentan en los simuladores considerados en esta tesis, se presentan algunas consideraciones pertinentes al problema.

Las típicas interfaces de usuario siguen el estilo de interacción WIMP, con ventanas, iconos, menús y punteros (cursor del ratón). Por el contrario, los métodos de interfaz de usuario más típicos en simulaciones inmersivas son los conocidos como Head-up Display (HUD). Éstos se basan en añadir información virtual en el primer plano de la salida gráfica. En términos generales, dicha interfaz gráfica de usuario o HUD es básicamente no configurable. Por lo tanto, si un usuario es zurdo, la interfaz gráfica (menús, barras de herramientas, cajas de herramientas ...) y los esquemas de interacción no son adaptables para mejorar la experiencia del usuario. En las últimas novedades dentro de los GUI, la utilización de *Docking Panels* permite personalizar la interfaz gráfica. En los juegos comerciales, el diseño de HUD se centra normalmente en la búsqueda de la mejor manera para mostrar información al usuario, pero sin romper la integración artística entre el HUD y los gráficos generados por el motor del juego.

Recientemente, los juegos donde se utiliza un punto de vista en primera o tercera persona están añadiendo más opciones personalizables, como la configuración del avatar o representación virtual del jugador. Los usuarios pueden seleccionar y editar múltiples detalles, como el sexo, los diferentes colores de piel, el cabello, los ojos o la ropa. A veces, la experiencia de los usuarios es aún mejor si la altura del avatar es similar a su propia altura. Todos los datos ofrecidos por los usuarios para personalizar las interfaces gráficas o los elementos virtuales se almacenan en su propio perfil del usuario.

Sin embargo, dicho perfil de usuario no es suficiente para adaptar las interfaces a las acciones que está realizando el usuario. Dicho de otra manera, no se tiene en cuenta qué está haciendo el usuario en el sistema.

Para una experiencia de usuario semánticamente mejorada, el elemento clave es el rol de usuario. Según el rol elegido, se puede elegir entre distintos modos de

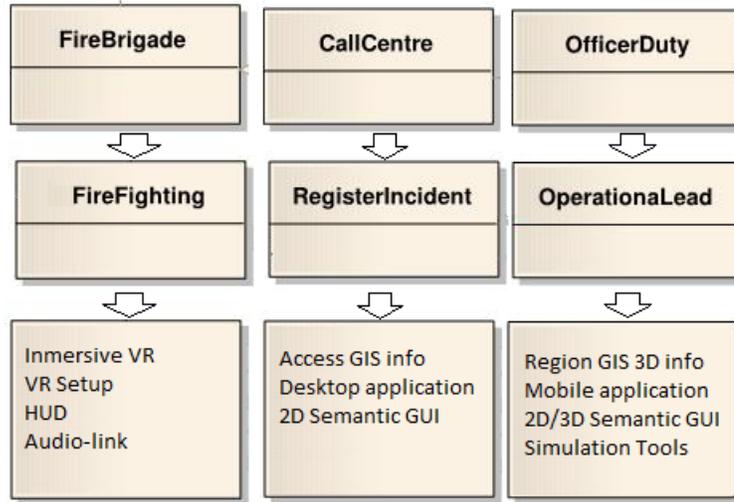


Figura 6.13: Requisitos de GUI y HUD para una serie de roles de usuario y tareas.

visualización y diferentes metodologías de recuperación de datos. La capa semántica tiene acceso al perfil de usuario y por lo tanto, a toda la información relevante acerca de la tarea en curso, incluido su rol. El rol de un usuario puede no ser único, ya que un usuario puede tener múltiples funciones. En varios editores de programación, el usuario tras seleccionar su rol, el esquema de ventanas e información de menú cambia totalmente para mostrar las herramientas más útiles bajo el rol elegido. De una manera similar, en procesos de Respuesta a Emergencias, un usuario puede tener varios roles (ver figura 6.13).

La utilización semántica del rol del usuario para adaptar las herramientas y métodos tradicionales ha sido investigado ampliamente por Toro et al. [87] en aplicaciones de ingeniería virtual, como con los editores de CAD. Las tecnologías semánticas pueden extenderse a los sistemas de simulación de lucha contra incendios, donde tanto la interfaz gráfica y la información en pantalla se ven reforzadas. Como ejemplo, el diseño del interfaz gráfica de usuario y la distribución de las herramientas se pueden mejorar semánticamente adaptándolas para un manager zurdo o para un jefe de bomberos con una pantalla pequeña.

En las sesiones de entrenamiento inmersivas, el HUD presentado a los alumnos tiene en cuenta que la tarea principal es la formación, ajustando los elementos visuales a dicho rol. El HUD para un bombero frente a un fuego proporcionará información acerca de la presión del agua, las condiciones del viento y otros ele-

mentos más especializados como una conexión de audio y vídeo en directo con un agente para recibir las instrucciones apropiadas. De manera similar, los oficiales en el campo tendrán sus propias adaptaciones para su tarea. Por ejemplo, se puede mostrar una lista del personal asignado, así como un mini-mapa de la zona donde se mostrará con una representación muy básica la zona asignada con información 2D.

6.4.3. Nivel de detalle semántico

Hay elementos que pueden ser presentados a los usuarios de varias maneras, según el contexto. Incluso si el hardware y software disponibles pueden manejar modelos 3D altamente detallados y gran cantidad de información, a veces es preferible utilizar modelos simplificados de los datos o impostores para aumentar los niveles de comprensión de la información y la usabilidad de las aplicaciones. Posada et al. [88] presentan un sistema de compresión semántico que permite la visualización interactiva de modelos CAD grandes.

Las tecnologías tradicionales de Realidad Virtual proporcionan una representación virtual única de los escenarios y sus objetos. Incluso si se utilizan objetos multiresolución, su objetivo final es conseguir una mejor eficiencia en la visualización, es decir, una mejor velocidad en la simulación.

En el proceso de extinción de incendios, los agentes de campo y administradores en el centro de control tienen diferentes necesidades de resolución de datos. Por un lado, los agentes de campo entrenando en simuladores inmersivos, requieren representaciones muy detalladas de su entorno, haciendo que los edificios y el fuego sea lo más realista posible. Por otro lado, los gestores no requieren tanta complejidad, y una combinación de capas cartográficas, mapas en 2D y una vista aérea en 3D simplificada puede ser suficiente (ver figura 6.14).

El comportamiento propuesto reemplaza elementos virtuales en función del rol del usuario y sus necesidades, siendo la capa semántica el responsable de informar al simulador de realidad virtual de este tipo de cambios, en lugar de codificar los elementos VR reemplazados en el simulador. Los modelos CityGML admiten un conjunto de niveles de detalles bien especificado, lo que permite la selección de diferentes resoluciones de acuerdo a las necesidades de los usuarios. Mientras que un LOD 4 o 5 será utilizado por simuladores inmersivos (agentes de campo), el nivel de detalle 1, 2 y 3 sería suficiente para las funciones de administrador (ver figura 6.14). La capa semántica es la responsable de ejecutar los algoritmos necesarios



Figura 6.14: Nivel de detalle en los datos geográficos. Izquierda: En el simulador se utilizan mapas de diferente resolución y tipología. Derecha: Los distintos niveles de detalles que define la especificación del estándar CityGML [75, 89].

para obtener la información de los usuarios, decidir qué datos deben ser recogidos de los distintos servidores de mapas y, finalmente, adaptar la información recibida para ser utilizada en la aplicación de RV.

6.5. Resumen

En este capítulo se ha mostrado cómo la gestión de la información geográfica es de gran importancia para la generación de escenarios virtuales asociados a escenarios reales: en nuestro caso, para abordar aplicaciones de incendios forestales y urbanos.

La utilización de escenarios reales dentro de la simulación permite una mayor inmersión a los usuarios y además, ofrece otras ventajas que pueden complementar el alcance de los algoritmos presentados en esta tesis.

En la ayuda a la toma de decisiones y en su entrenamiento se pueden utilizar simulaciones virtuales como las propuestas en esta tesis. Haciendo uso de datos reales, no solamente se estará entrenando las cuestiones tácticas, sino que además, el aprendizaje de la características propias de la zona local será útil ante una emergencia real.

También es importante poder poner en marcha simulaciones lo más rápidamente posible ante emergencias recién descubiertas. Los resultados de la misma pueden ser tenidos en cuenta para planificar las primeras medidas, que son de vital importancia.

La disponibilidad de datos geográficos no está garantizada para cualquier parte

del mundo, y menos aún su calidad o contenido específico. En este capítulo se ha hecho un breve análisis de cuáles son los datos geográficos más importantes y necesarios para su utilización con los algoritmos de propagación de incendios. Además, se ha justificado la importancia de categorizar semánticamente dichos datos, de forma que puedan ser integrados bajo una misma arquitectura.

También se ha mostrado cómo los aspectos semánticos de los datos y los usuarios son importantes para poder categorizar los métodos, procesos, tareas y usuarios involucrados en las tareas de extinción de incendios, así como para elegir la mejor combinación de interfaz de usuario, calidad de datos y opciones de visualización.

Los resultados generados con este trabajo han sido publicados en el *Journal Applied Geomatics* [81], en el Workshop *Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security* organizado por la OTAN [66] y en los congresos *WSCG 2012* [65] y *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models 2012* [64].

Capítulo 7

Análisis y Comportamiento de los Algoritmos

En este capítulo se analizan los algoritmos presentados en los capítulos anteriores. Por cada parámetro analizado, se muestran gráficas que ilustran su comportamiento y evolución temporal. También se analiza si ese comportamiento es el esperable de acuerdo a las experiencias de la propagación y extinción de incendios.

Seguidamente, se estudia el impacto del rendimiento de los algoritmos, así como su eficiencia.

En el capítulo 8 se validarán los algoritmos desde el punto de vista práctico y del usuario, incluyendo comparativas ilustrativas entre el resultado de estos algoritmos y FARSITE, sistema de simulación comúnmente utilizado en el sector.

Las gráficas que presentan evolución del análisis usan como referencia los *steps* o pasos de simulación. Se reserva el término *tiempo* para hablar de tiempos de cálculo, en la sección de rendimiento.

Con frecuencia se utilizan los puntos cardinales como referencia en las figuras de este capítulo. Se sigue el convenio de la figura 7.1. También se indica el convenio usado para referenciar celdas en el texto.

Cuando se dice que un terreno es sintético, significa que el modelo del terreno se genera con una aplicación de modo automático y por lo tanto, no corresponde con ningún modelo real.

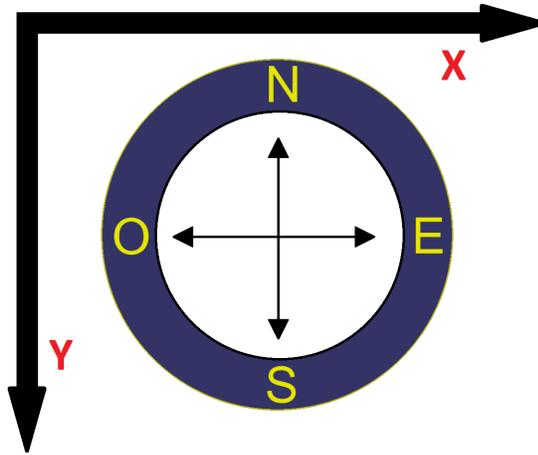


Figura 7.1: Referencias de orientación en los escenarios de celdas.

7.1. Aspectos Cualitativos de los Algoritmos en Entornos Forestales

En este apartado se procede al análisis del comportamiento de los algoritmos forestales presentados el capítulo 4. Los parámetros se analizan independientemente, utilizando modelos de entrada sintéticos y diseñados específicamente para cada prueba. Los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones se muestran en cada subapartado junto con una explicación que interpreta dichos resultados en relación con el contenido teórico explicado en los capítulos anteriores.

La realización de este tipo de análisis cualitativos nos sirve para poder verificar si los resultados de las simulaciones se asemejan a las experiencias reales. Típicamente, mediante este tipo de pruebas podremos ver si el avance en un incendio está dentro de unos márgenes de verosimilitud aceptables.

7.1.1. Pendientes del Terreno

El primer conjunto de pruebas está orientado a estudiar cómo afecta la pendiente del terreno a la evolución del fuego. Para ello, se ha generado una pequeña utilidad que nos ayuda a generar terrenos sintéticos con diferentes grados de pendiente: desde terrenos con pendiente constante (plano inclinado) a formas más aleatorias. Seguidamente se describen someramente los casos considerados.

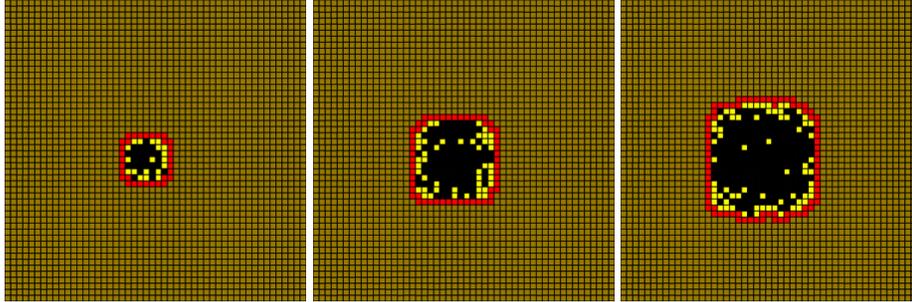


Figura 7.2: Una simulación sin viento ni pendiente genera patrones circulares.

El objetivo de esta serie de pruebas es comprobar cómo se propagan los incendios en diferentes terrenos. Para ello, la forma más directa de mostrar resultados comprensibles es la generación de imágenes 2D de la propagación del incendio en diferentes pasos de una simulación. Para analizar este parámetro con independencia de los demás, se asume que el incendio es iniciado siempre en el mismo lugar y con la mínima intensidad posible, y que el viento es inexistente. Los demás parámetros también permanecen constantes.

Como se puede ver en la figura 7.2, la evolución de un incendio en un terreno horizontal va generando patrones casi circulares. Otras simulaciones producen resultados ligeramente distintos debido a la aleatoriedad integrada en los algoritmos. En todos los casos, la forma adquirida es sustancialmente reconocible como circular. En la figura 7.3 se muestra la evolución del combustible y *FirePower* en dos celdas cercanas. La evolución de ambas variables muestra diferencias debido a las probabilidades que entran en juego en los algoritmos. Sin embargo, en ambos casos el combustible se consume en unos 350 steps de simulación.

En la parte superior de la figura 7.4 se presenta un terreno plano con 45° de pendiente a lo largo del eje *Y* y sin pendiente en el eje *X*. El foco del incendio se sitúa en la parte baja del escenario. En esta situación, la evolución del incendio tiene una tendencia clara a ascender la pendiente. Realizando la prueba con pendientes mayores, dicha tendencia se ve confirmada claramente. La velocidad de avance del fuego se ve incrementada ligeramente en la dirección de la pendiente.

En otro escenario se utiliza una representación de una loma o colina (parte inferior de la figura 7.4), caracterizada por poseer pendientes ascendentes y graduales (similar a una campana de Gauss tridimensional). Tras colocar el foco inicial fuera de la colina (en la parte plana) y realizar las simulaciones, se puede observar que

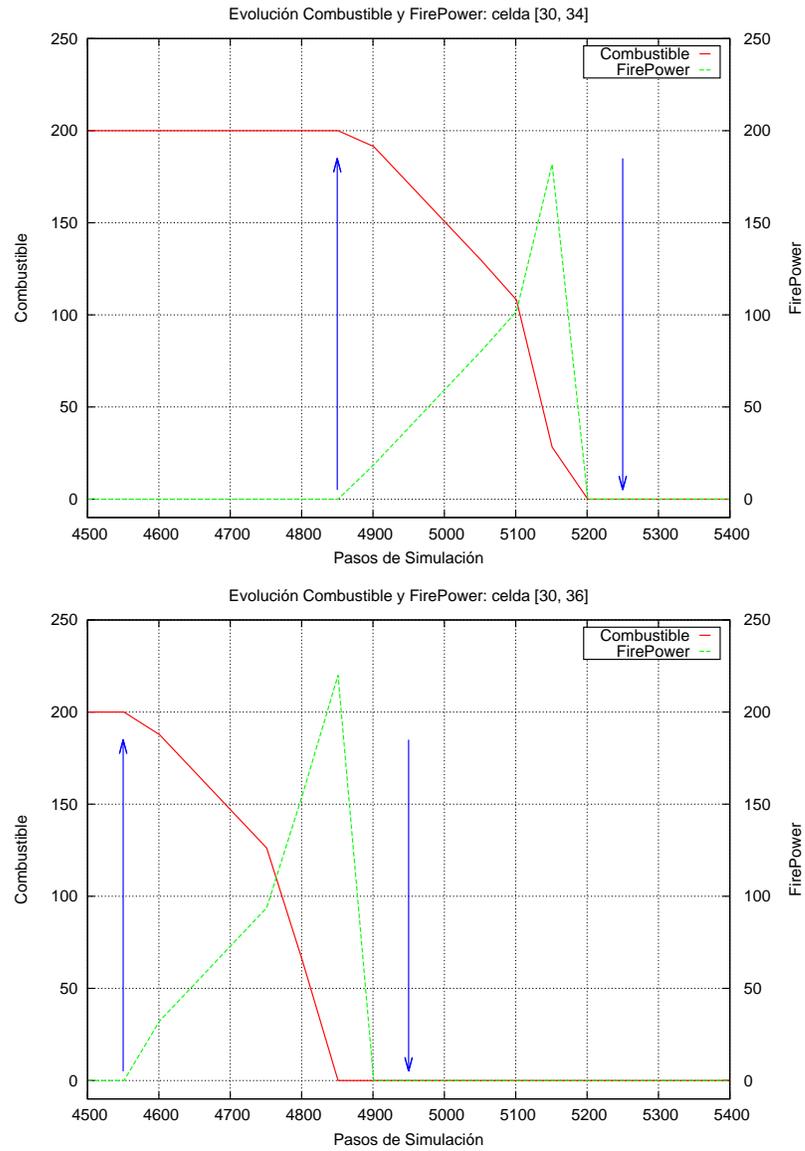


Figura 7.3: Evolución de la intensidad del fuego (*FirePower*) y del combustible restante en dos celdas.

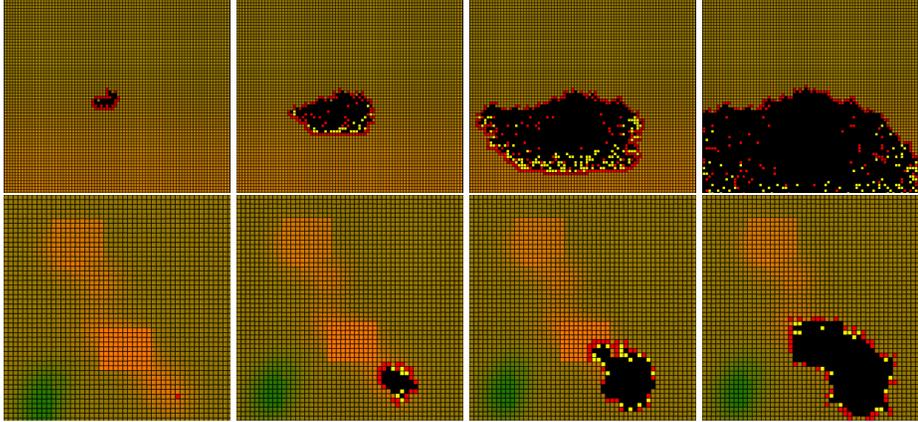


Figura 7.4: Arriba: Simulación sin viento en un terreno con pendiente constante de 45°. Abajo: Simulación sin viento en un terreno con cimas (marrón claro) y valles (verde oscuro).

la propagación del incendio, una vez llegada al pie de la colina, asciende por la misma a una velocidad superior. Sin embargo, reemplazando la colina por un valle (invirtiendo las pendientes de la campana de Gauss), se observó que el incendio rodea el mismo sin descender.

7.1.2. Vegetación (Combustible)

En las pruebas anteriores se ha utilizado un único tipo de vegetación en todo el terreno sintético. Sin embargo, el comportamiento del fuego difiere bastante según la tipología de las celdas que componen el terreno. Como se definió en los capítulos anteriores, el modelo de vegetación que se utiliza en los algoritmos es muy sencillo, definido únicamente por la cantidad inicial del material combustible (*fuel*), la intensidad máxima de fuego que puede alcanzar y su velocidad de consumo.

Los tipos y densidades de vegetación considerados en las simulaciones pueden ser todo lo variados que se desee. Para ello se deben adaptar los parámetros que los modelan a sus características de combustión. En el Anexo B se puede ver una relación más completa de los tipos de vegetación definidos en la base de datos CORINE y el subconjunto que es utilizado en los datos publicados en OpenData (Gobierno Vasco). Conviene recordar que no es objetivo de esta tesis el ajuste de los parámetros que modelan los tipos de vegetación. En este apartado se analiza el comportamiento de los parámetros que constituyen el modelo y se verifican en las

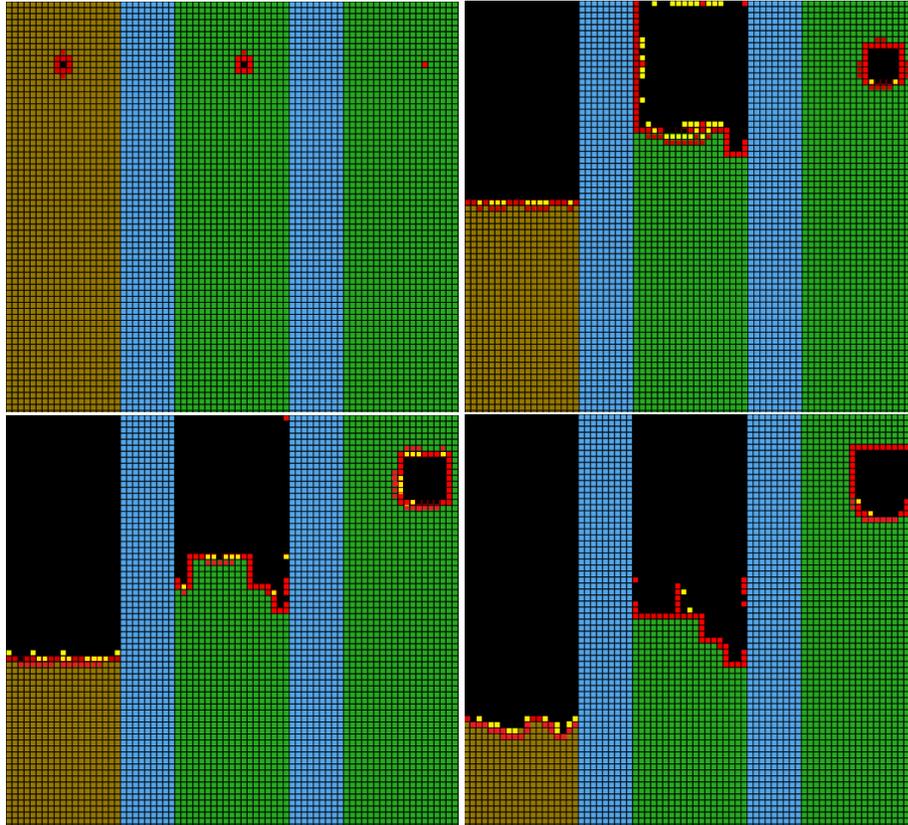


Figura 7.5: Cuatro *steps* de la evolución del fuego en terreno horizontal sin viento. En cada imagen, cada tira vertical corresponde a un tipo distinto de vegetación.

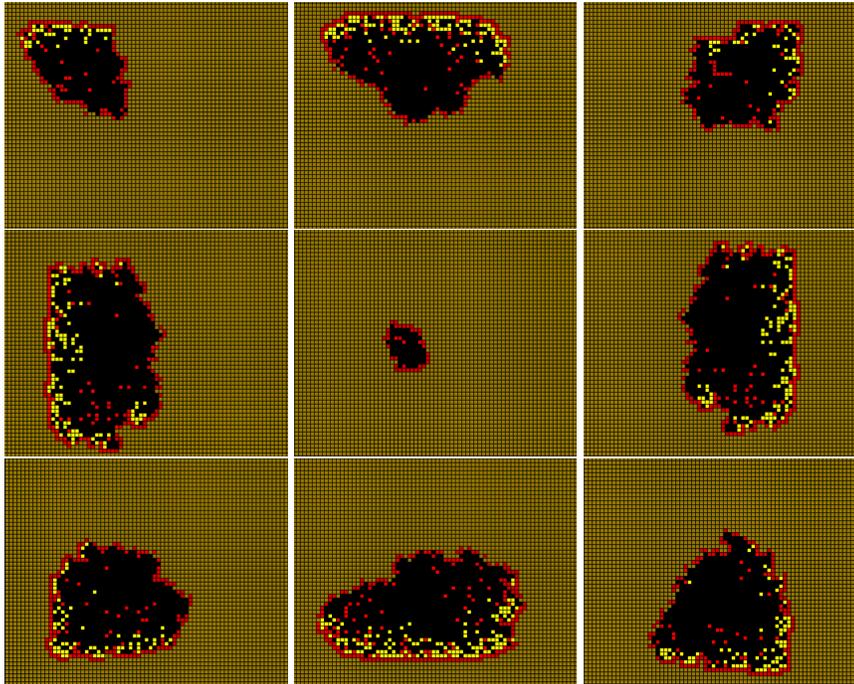


Figura 7.6: Simulación con viento según las 8 orientaciones principales (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) y con velocidad constante en un terreno horizontal. Todas las imágenes corresponden al pasos de simulación 5000. En el centro, la simulación obtenida sin ningún tipo de viento.

condiciones que se detallan.

Para comprobar que el tipo de vegetación tiene un impacto real en la evolución del incendio, se ha preparado un escenario sintético compuesto por cuatro tipos de vegetación (ver figura 7.5). Este escenario está dividido en regiones combustibles (árbol, arbusto y hierba) y una zona no combustible. En este caso, se configuran tres focos activos, uno en cada zona combustible y se deja evolucionar el sistema. Como se puede observar en las figuras, la velocidad de propagación del fuego de cada zona es diferente. A su vez, el consumo y por lo tanto la auto-extinción del incendio también se puede comprobar que sigue el patrón previsto. Finalmente, la existencia de las zonas incombustibles evita que el fuego pueda pasar de una zona a otra, actuando como cortafuegos.

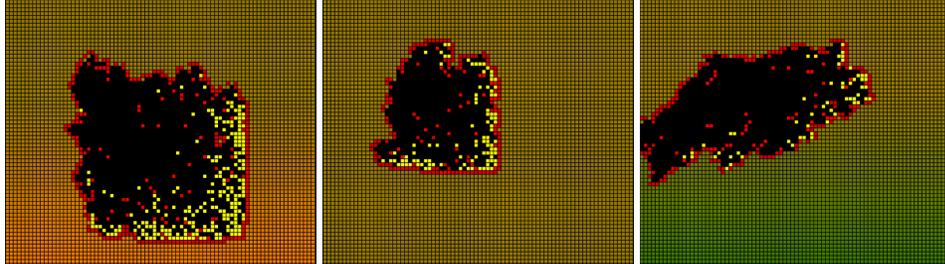


Figura 7.7: Simulación con diferentes pendientes ($+60^\circ$, 0° , -60°) y viento con dirección SE. Todas las imágenes corresponden al paso de simulación 5000.

7.1.3. Dirección y Velocidad del Viento

Este conjunto de pruebas está orientado a estudiar cómo afecta la velocidad y dirección del viento en la evolución del fuego. De una manera similar a las pruebas anteriores, se han utilizado terrenos sintéticos (con diferente tipología en cuanto a pendientes) con diferentes configuraciones de viento.

El primer escenario es un terreno completamente horizontal. Se han generado simulaciones con direcciones 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° y 315° (correspondientes a las orientaciones principales). Se ha utilizado una velocidad de viento muy alta para que las diferencias sean claramente visibles. La figura 7.6 presenta el paso de simulación 5000 de las respectivas simulaciones. Una primera mirada a los resultados sirve para verificar que la dirección del viento afecta significativamente al avance del fuego.

El siguiente escenario muestra un ejemplo de interacción entre el viento y la pendiente. Aquí se presentan los escenarios definidos en el apartado anterior con pendiente constante, ascendente y descendente. Bajo las mismas condiciones de viento se han generado las simulaciones correspondientes. En la figura 7.7 se muestra cómo se ve afectada la propagación por la pendiente tras una simulación de 5000 pasos.

En la figura 7.8 se puede ver la evolución del terreno correspondiente a la misma simulación con 60° de pendiente. Se ha comprobado que la velocidad de avance del fuego se mantiene constante.

También se han realizado simulaciones donde la dirección y velocidad del viento varían en el tiempo. Por ejemplo, en la prueba de la figura 7.9 sólo se varía la dirección del viento, fijando la velocidad del mismo. Se comienza con una dirección Sur y progresivamente, el viento va rolando hacia el Este, luego hacia el Norte

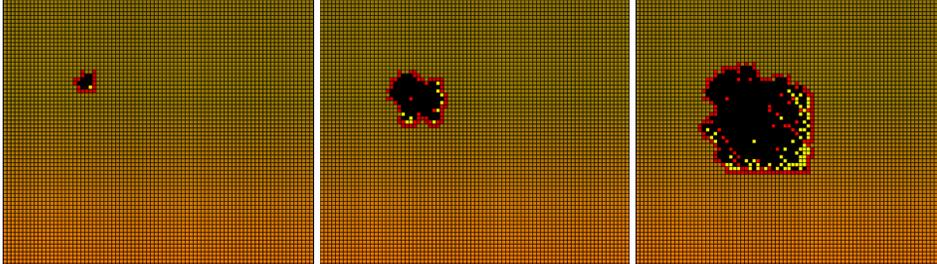


Figura 7.8: Tres pasos de la propagación del fuego con pendiente de $+60^\circ$ y viento con dirección SE (pasos 1000, 2000 y 3000).

y finalmente hacia el Oeste. Se puede observar que el camino recorrido por el fuego sigue en gran medida la dirección predominante del viento.

7.1.4. Spotting Fires en Entornos Forestales

Como se ha comentado en los capítulos anteriores, el riesgo de que un fuego se propague a distancia existe. Los *Spotting Fires* son el método más común que permite al fuego eludir algunas de las barreras anti-incendios como pueden ser ríos o carreteras, y que las englobamos dentro del concepto *barreras*. La probabilidad de que un incendio pueda pasar una barrera está influenciada por dos aspectos: la anchura de la misma y la dirección y velocidad del viento. El viento es quien realmente transporta los materiales incendiados desde los focos activos hasta el otro lado de la barrera, pudiendo provocar nuevos focos activos.

El análisis de la propagación del fuego ante la existencia de una barrera se

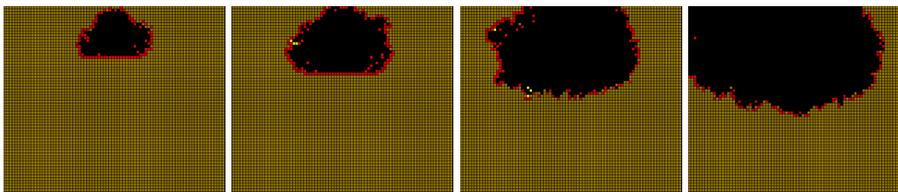


Figura 7.9: Simulación con terreno horizontal con cambio de dirección de viento, de dirección Sur a Oeste. Las dos primeras imágenes corresponden a los pasos 3600 y 5000, momentos en los cuales se producen cambios en la dirección del viento (Este y Norte). Las otras dos imágenes corresponden a los pasos 7400 y 11500, donde se observa que la propagación del fuego se dirige hacia el Oeste.

ha realizado a través de escenarios sintéticos que incluyen un elemento de esta naturaleza (un río o una carretera). Para simplificar las pruebas y sin pérdida de generalidad, se ha definido que la barrera sea horizontal (paralela al eje X), que la posición del foco esté localizado en el Norte de la escena y que exista viento dirección Sur, de forma que el fuego sea empujado hacia la barrera. Los escenarios no poseen pendiente siendo las variables del mismo tanto la anchura de la barrera como la velocidad del viento.

En la figura 7.10 se puede ver la situación de varias simulaciones tras 1500 pasos de simulación y tras 2000 pasos de simulación. Se capta el momento en el que el fuego se propaga a través de la barrera en uno de los casos analizados.

La vegetación existente a ambos lados de la barrera tiene influencia en la posibilidad de aparición de *spotting fires* al otro lado. La probabilidad de que brasas u otro material se proyecte al otro lado de la barrera es mayor si existe vegetación alta. Por el contrario, en el otro lado de la barrera, la existencia de material fácilmente combustible como hierba seca, rastrojos o arbustos aumenta la probabilidad de que dichas brasas inicien un nuevo foco activo del incendio. En la figura 7.10 se puede ver que la única diferencia entre la simulación de las filas 1 y 2 es la existencia de árboles altos justo en el borde de la barrera, lo cual facilita que el material incendiado pueda viajar hasta el otro lado. Sin embargo, aumentando la distancia un poco más (situación de la fila 4), el incendio no se propaga.

7.1.5. Agentes Extintores y Efecto Evaporación

Los algoritmos de extinción de incendios son procesos interactivos que precisan de la intervención de un usuario. En este apartado se muestra cómo actúan los mecanismos de extinción y evaporación. En concreto, hay tres situaciones distintas que se dan en el mundo real: el proceso de extinción se inicia con el incendio completamente evolucionado, en etapas intermedias o en las primeras fases.

La base del experimento radica en arrojar una cierta cantidad de un agente extintor en cada paso de simulación. Al principio de la simulación, se deja evolucionar el fuego libremente. A partir de un instante de tiempo se inicia el proceso de extinción. Durante todo el experimento se monitorizan las variables *FirePower*, *WaterQuantity* y *Fuel* de las celdas cercanas a la zona donde se arroja el agente extintor. De esta manera podemos obtener información precisa de *i*) cómo el agente extintor reduce la intensidad del fuego en las celdas afectadas, *ii*) los cambios de estados de las celdas (*Activated*, *FireStopped*, *Burnt*, *Survived*) y *iii*) la evaporación

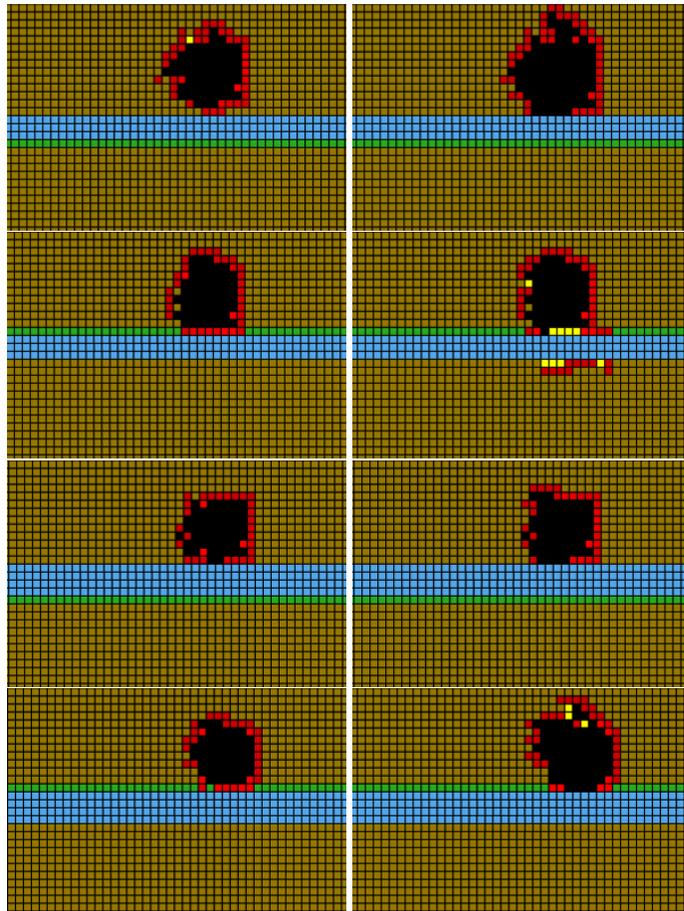


Figura 7.10: Simulación con terreno horizontal, con viento ligero dirección Sur y con un barrera transversal (río). Fila 1: 9 metros de barrera, con vegetación baja. Fila 2: 9 metros de barrera, con árboles. Fila 3: 12 metros de barrera y vegetación baja. Fila 4: 12 metros de barrera, con árboles.

del agua residual por efecto de fuegos activos cercanos.

En la figura 7.11 se analizan tres casos de incendio en un escenario muy simple: completamente plano, con vegetación uniforme y sin viento. Se sitúa el foco del incendio en la celda (0,0), dejando evolucionar el sistema. Hacia la iteración 1000 de la simulación, el incendio llega a la zona donde se procederá a arrojar agua según tres esquemas distintos que se explican a continuación.

Para estudiar el proceso de extinción y el efecto evaporación se han simulado varias ejecuciones del escenario variando la cantidad de agua por paso de simulación y el instante a partir del cual se procede a la extinción del incendio. Este último parámetro permite comprobar qué ocurre si el agua es arrojada antes, durante o después de que el incendio llegue a la zona.

En la figura 7.11 se presentan mini-diagramas de 7x7 celdas de la zona considerada. Se muestran los pasos de simulación 1000, 1500 y 2000. La celda monitorizada en las gráficas corresponde con la celda (3, 3). El color morado indica la zona donde se echa el agua, mientras que las celdas azules identifican a aquellas que están en estado *FireStopped*, es decir, que fueron activadas y el proceso de extinción consiguió apagar el fuego.

En la primera ejecución del test (parte superior de la figura 7.11), se arrojan 10 unidades de agua entre los pasos de simulación 920 y 1170, justo en el mismo momento que el incendio se activa en dicha celda. Se puede observar que rápidamente el foco es controlado, pasando a estado *FireStopped*, y la cantidad de agua residual se va incrementando (línea verde). Sería esperable que dicha cantidad de agua fuera creciendo de 10 en 10, puesto que el foco no está activo y por lo tanto, la intensidad del mismo es cero. Sin embargo, el mecanismo de evaporación del agua actúa por medio de las celdas adyacentes que están activas. Según avanza la simulación, las celdas vecinas contribuyen a evaporar el remanente de agua y el fuego se acaba reactivando (paso de simulación 1150). Una vez se deja de echar agua (paso de simulación 1170) el fuego se desarrolla completamente hasta que el combustible se acaba.

En la segunda prueba del test (parte central de la figura 7.11), el agua se empieza a echar cuando el foco está en pleno desarrollo, entre los pasos de simulación 1020 y 1270. La cantidad de fuel que queda es más o menos la mitad de la inicial. En este caso se puede observar que el agua consigue reducir la intensidad del fuego hasta conseguir apagarlo. Se tarda más en conseguirlo, debido a que la celda tiene más *FirePower*. Sin embargo, al dejar de echar agua en la zona, el agua se evapora rápidamente y el incendio prosigue.

En la tercera prueba (parte inferior de la figura 7.11), el agua se echa entre los pasos de simulación 1150 y 1400, cuando el fuego está totalmente desarrollado y no hay ya casi combustible que quemar. Rápidamente el fuego se extingue, aunque es más debido a que el combustible se acaba que al efecto del agua, que acaba quedando remanente en la celda.

7.2. Aspectos Cualitativos de los Algoritmos en Entornos Urbanos

En este apartado se procede al análisis del comportamiento de los algoritmos urbanos presentados el capítulo 5. De una manera similar al apartado anterior, se analizan los parámetros en los que se basa el diseño de los algoritmos. En este caso, los modelos sintéticos tienen la diferencia sustancial de la introducción de los edificios.

El elemento más básico a tener en cuenta es la estructura de celdas de los edificios. Hay que recordar que se trata de un escenario tridimensional. Una celda 2D ocupada por un edificio (tipo *BuildingUnit*), está compuesta por una serie de plantas o pisos (*FloorUnit*). En este apartado se muestran mediante gráficas los datos recopilados en una *FloorUnit* donde se ha declarado un incendio. Al igual que en las celdas forestales, el principal dato a monitorizar es la intensidad de fuego (*FirePower*), junto con otros atributos como la cantidad de combustible y el agua (agente extintor).

Los aspectos relativos a los distintos tipos de estructuras (definidos en el capítulo 5) no se consideran en un apartado específico, sino que se evalúan en cada caso según convenga.

7.2.1. Pendiente y Condiciones del Viento

Tanto la pendiente del terreno como el viento no son factores importantes en la simulación de incendios en un edificio. Sin embargo, tienen importancia lo relacionado con la propagación a distancia (*Spotting Fires*), ya sea entre edificios o entre edificios y zonas forestales. Así pues, será en dichos apartados (7.2.4 y 7.2.5) donde se evalúa el impacto de la pendiente y el viento en la simulación de la propagación y extinción de incendios urbanos.

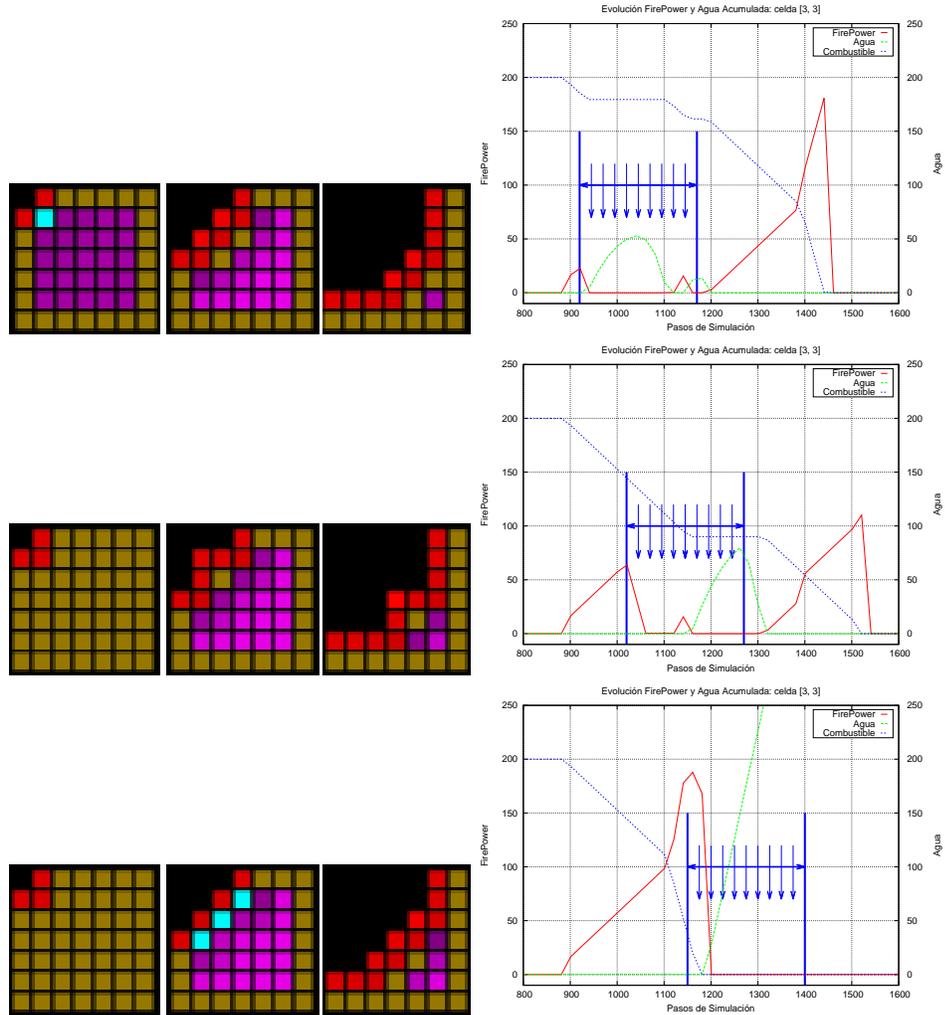


Figura 7.11: Simulación del proceso de extinción bajo diferentes condiciones de extinción. En cada caso se presenta una gráfica de la evolución del proceso y el estado de las celdas en tres instantes (steps 1000, 1500 y 2000).

7.2.2. Propagación y Extinción en *FloorUnit*

En la figura 7.12 se representan distintas gráficas de evolución, asociadas a cada tipo de edificio definido en el capítulo 5 (*SecureUnit*, *WoodenUnit* y *ShantyUnit*), donde se observan claramente los distintos tramos o fases de la evolución del incendio.

En cada uno de los tres casos se presenta la evolución de un fuego libre y la evolución de un fuego con intento de extinción.

Los procesos de extinción actúan de una manera similar. En las figuras también se puede observar cómo decrece la intensidad de fuego según se aporta agua. Durante 500 steps (del step 100 al 600, zona marcada con azul) se ha echado una cierta cantidad de agua en los tres casos considerados. En el edificio *SecureUnit*, debido a la poca intensidad del fuego, ésta se ha extinguido casi inmediatamente. En un edificio *WoodenUnit*, el agua consigue extinguir el fuego, pero tardando bastante más tiempo. En el edificio *ShantyUnit*, debido a la gran intensidad que adquiere, el agua no es suficiente para apagar el fuego. A partir del step 600, que es cuando se para de echar agua, el incendio se reaviva.

7.2.3. Propagación Horizontal y Vertical en un Edificio

Los mecanismos más tradicionales en la propagación del fuego urbano son los que se refieren a la propagación en horizontal (en el mismo nivel o planta de un edificio), y vertical (normalmente, tendiendo a expandirse a pisos superiores).

Para realizar pruebas de propagación horizontal se ha diseñado un terreno donde se ha colocado un único edificio compuesto por 9 celdas (*BuildingUnit*), dispuestas en una formación de 3x3. Dicho edificio tiene una única planta, para poder captar de manera sencilla la evolución del incendio. En la figura 7.13 se puede observar claramente el instante en el que el fuego se propaga de la celda de referencia (0, 0) a una celda contigua (0, 1).

El comportamiento difiere sustancialmente según el tipo de edificio considerado. La propagación en edificios seguros es mucho más lenta que en los edificios de madera, siendo aún más rápida y espontánea en las chabolas (*ShantyUnit*).

Para realizar pruebas de propagación vertical se ha diseñado otro terreno con un único edificio, compuesto de una única celda (*BuildingUnit*), pero con 6 pisos (*FloorUnit*). En la figura 7.14, se puede observar la evolución de un incendio declarado en el piso 3. De una manera similar al caso anterior, se ha generado la gráfica de evolución del fuego de los pisos 3 y 4. Se puede observar claramente el

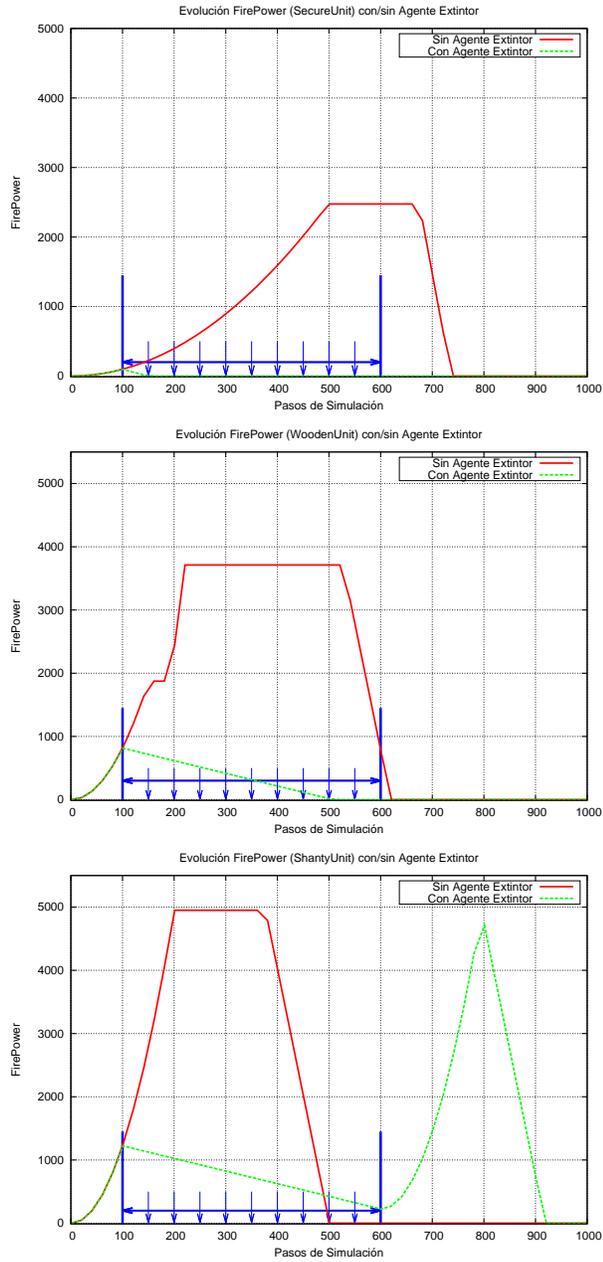


Figura 7.12: Evolución del fuego en una *FloorUnit*, con y sin agente extintor

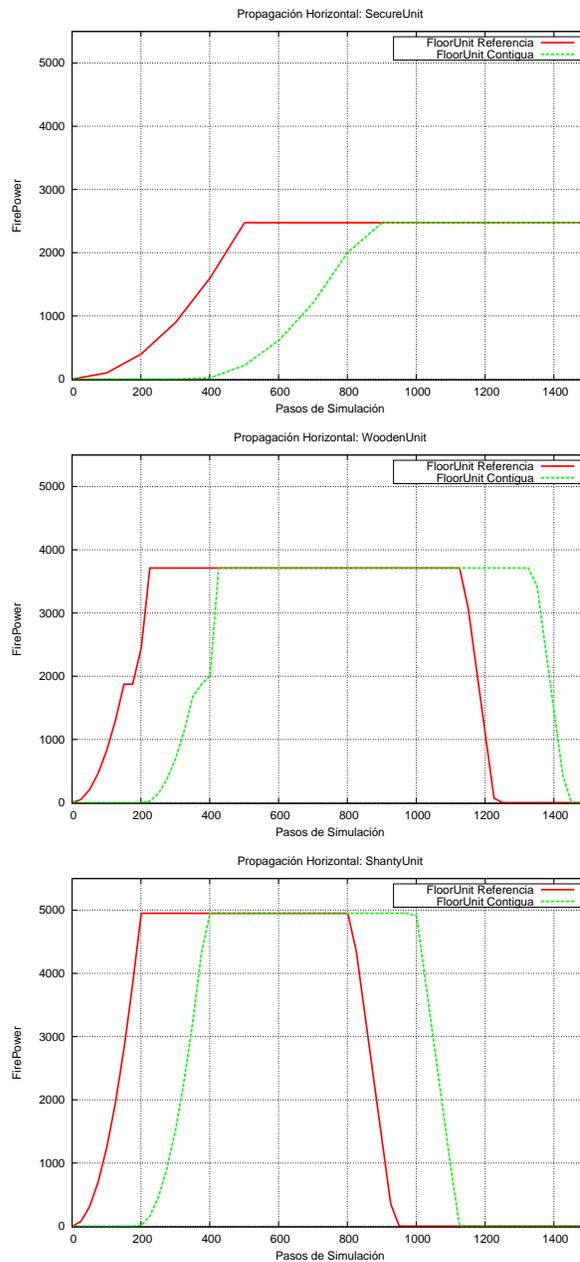


Figura 7.13: Propagación horizontal de un incendio urbano (*SecureUnit*, *WoodenUnit* y *ShantyUnit*).

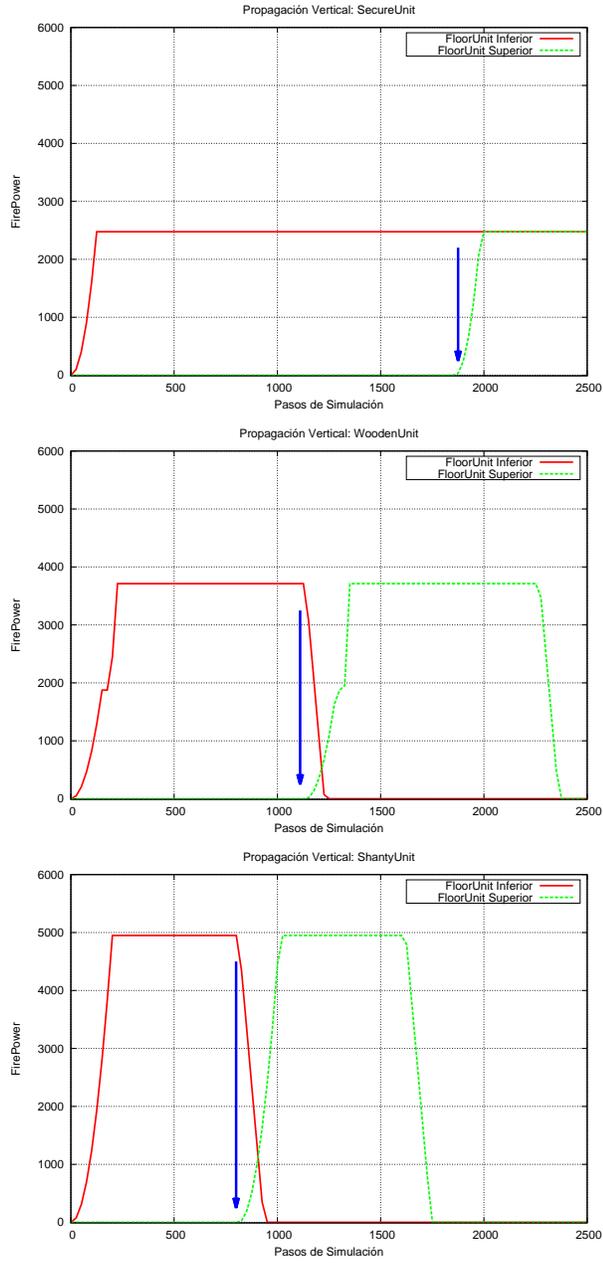


Figura 7.14: Propagación vertical de un incendio urbano (*SecureUnit*, *WoodenUnit* y *ShantyUnit*).

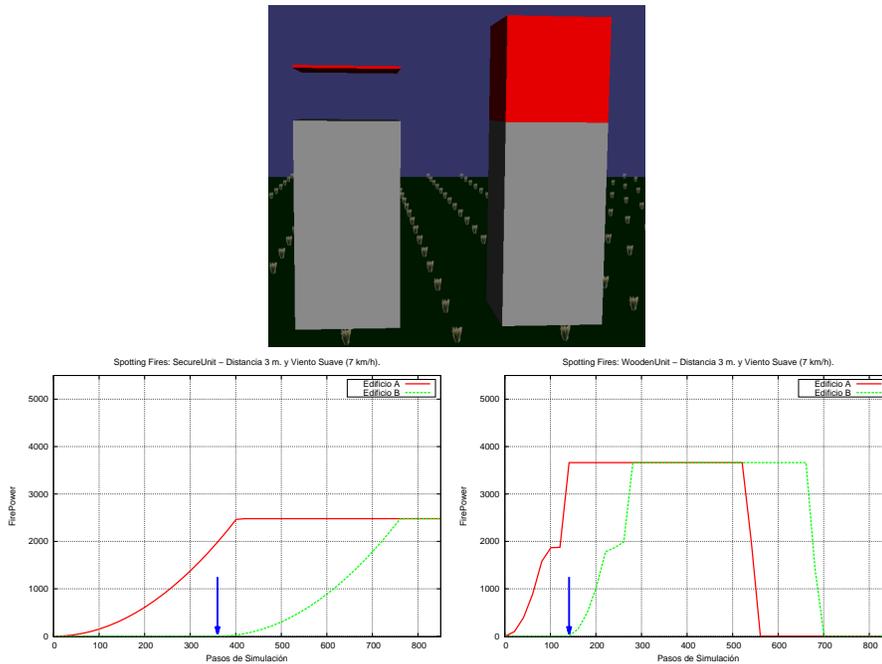


Figura 7.15: Propagación a distancia de un edificio a otro. Las gráficas corresponden con edificios compuestos por tres plantas de 1 celda cada una (*SecureUnit* y *WoodenUnit*) con viento suave en dirección que favorece la propagación.

momento en el que el incendio se ha propagado al piso superior. En este ejemplo en concreto no se observa que el incendio se propague en dirección descendente. Esa es una posibilidad contemplada en los algoritmos, pero con un probabilidad muy baja de aparición.

Se puede observar que la velocidad de propagación vertical es superior en edificios de madera que en las seguras. Se ha incluido el caso de edificios de varias plantas de tipo *ShantyUnit*, aunque este tipo de construcciones están asociadas a chabolas y no suelen tener más de un piso.

7.2.4. Propagación a Distancia: Spotting Fires

La propagación a distancia en entornos urbanos tiene mucho que ver con la proyección de material incendiado entre edificios cercanos. Típicamente, la caída de este material en toldos, cañerías con hojas secas, balcones con ropa colgada o a través de ventanas, puede provocar que un incendio se propague a edificios o casas

Distancia	<i>WoodenUnit</i>			<i>SecureUnit</i>		
3 m.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6 m.	✗	✓	✓	✗	✗	✗
12 m.	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Viento	Suave	Medio	Fuerte	Suave	Medio	Fuerte

Tabla 7.1: Tabla de propagación a distancia entre edificios situados a diferentes distancias y con diferentes velocidades de viento (en dirección favorable).

cercanas. Estos métodos son también los mecanismos de propagación de incendios entre zonas forestales y casas en peligro. Así pues, bajo esta definición, tanto la pendiente como las condiciones de viento afecta significativamente a las opciones de que un incendio activo se propague a otro edificio.

Para comprobar que los algoritmos presentados se comportan de esta manera, se ha construido un conjunto de escenarios compuestos por 2 edificios, con diferente separación entre ambos. El primero se ha colocado en la parte baja del escenario (Sur) y el segundo, desplazado según el eje Y (hacia el Norte). Las separaciones contempladas han sido 3 m. (1 celda), 6 m. (2 celdas) y 12 m. (4 celdas). Cada escenario se ha simulado con diferentes velocidades del viento, dejando invariable la dirección que optimiza las opciones de propagación (Norte).

En la figura 7.15 se puede ver dos ejemplos de propagación a distancia, uno con edificio *SecureUnit* y otro *WoodenUnit*. Cada edificio tiene 3 plantas, cada una compuesta por una sola celda o *FloorUnit*. El incendio se inicia en la tercera planta de un edificio. En ambos ejemplos, la propagación del fuego al otro edificio se ha producido.

En la tabla 7.1 se pueden ver el resto de combinaciones (variando distancia entre los edificios, la velocidad del viento y la tipología de los edificios) mostrando si la propagación es factible o no. Cada experimento se ha realizado 4 veces, por si la variabilidad introducida por la aleatoriedad integrada en los algoritmos afecta a los resultados. Si en alguna de las iteraciones el fuego se ha conseguido propagar, la tabla refleja que es factible la propagación.

El patrón de propagación observado en las pruebas es consistente con los patrones presentados por Zhao [35] (ver figura 7.16).

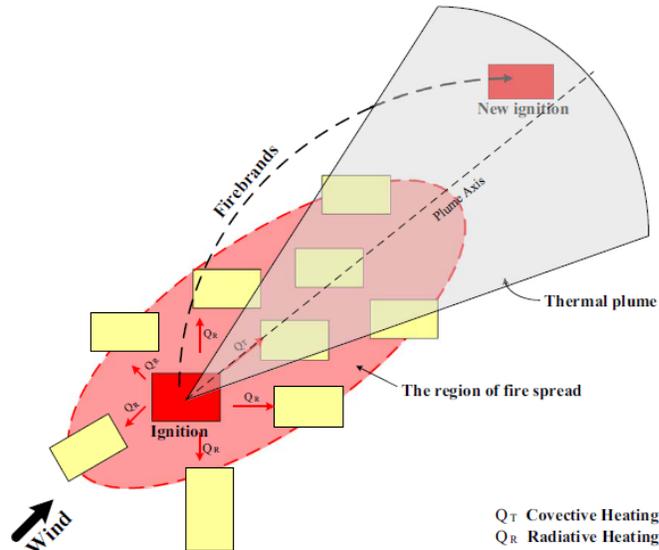


Figura 7.16: Modelo de *Spotting Fires* definido por Zhao donde los rectángulos representan edificios [35].

7.2.5. Transición Entorno Forestal y Urbano

La experiencia sugiere que la propagación de la zona forestal a un edificio o casa se produce (de producirse) sólo en los primeros pisos, más improbable cuanto más alto esté. Un incendio declarado en un edificio se puede propagar tanto a otros edificios cercanos (sección anterior) como a zonas forestales dentro de un radio de acción.

Para comprobar que los algoritmos presentados se comportan de esta manera, se han definido una serie de experimentos sencillos. El escenario de pruebas es un terreno plano, con vegetación uniforme y un edificio de 3 pisos compuesto por un único *BuildingUnit* por planta. El viento tiene dirección Norte y su velocidad será variable en función del experimento a realizar. Se realizan dos tipos de experimentos. En uno se propaga el incendio del campo al edificio y en el otro, del edificio al campo.

En la figura 7.17 se muestra una simulación de un incendio en la primera planta que se propaga al exterior. Esto ocurre tanto si la vegetación es hierba o árboles, aunque las probabilidades difieren un poco. También difiere el mecanismo de la

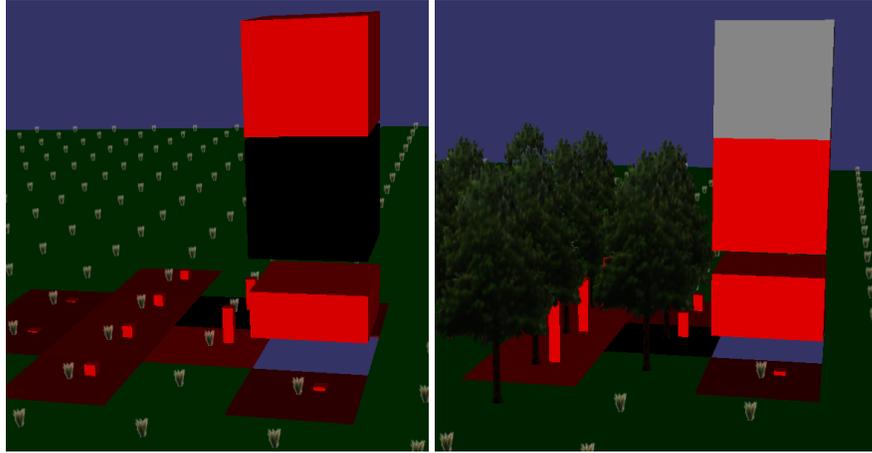


Figura 7.17: Imágenes 3D de la propagación del entorno urbano al forestal (hierba en la izquierda, árboles en la derecha) .

propagación si se elige otra planta de inicio del fuego. En la tabla 7.2 se pueden ver el resto de combinaciones y los resultados obtenidos.

En la figura 7.18 se muestra la ejecución de un incendio forestal, que avanza hacia un edificio. En el step 800, el incendio se propaga a la planta baja del edificio.

Piso	<i>WoodenUnit</i>			<i>SecureUnit</i>		
Bajo	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Primero	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Segundo	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Tercero o +	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Viento	Suave	Medio	Fuerte	Suave	Medio	Fuerte

Tabla 7.2: Propagación de un incendio en un edificio al exterior según el piso de inicio y la velocidad del viento existente.

7.3. Rendimiento de los Algoritmos

La motivación sobre la que se ha concebido el diseño de los algoritmos de propagación y extinción de incendios ha sido la necesidad de algoritmos que permitan interactividad y que por lo tanto, su velocidad de ejecución y, por tanto, el rendimiento de la simulación sean altos. Para ello, se han simplificado muchos de los

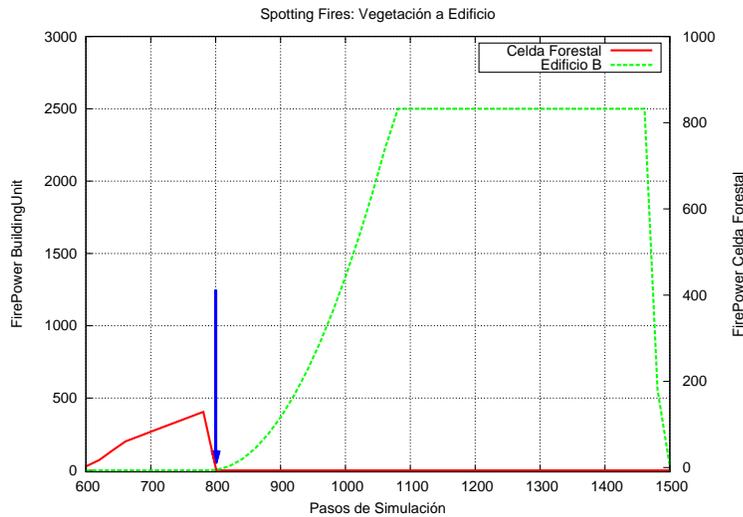


Figura 7.18: Gráfica de evolución de *FirePower* en propagación forestal a urbano.

procesos físicos y su modelado matemático con el fin de acelerar la obtención de los resultados. En el apartado anterior se han mostrado resultados cualitativos de los algoritmos, que permiten verificar que los comportamientos de la propagación de incendios se ven reflejados en las simulaciones obtenidas.

En este apartado se tratará de medir la eficiencia de las simulaciones de una manera cuantitativa. Las pruebas de rendimiento que se van a realizar en este apartado suministran datos numéricos, obtenidos durante la ejecución de distintas simulaciones bajo distintas configuraciones de entrada. Para medir el tiempo de ejecución de cada iteración de la simulación, se ha optado por ejecutar cada paso de manera secuencial, sin ninguna intervención del usuario.

Los resultados obtenidos muestran que la eficiencia de los algoritmos permite su uso en aplicaciones interactivas, objeto de este trabajo de investigación.

Aunque no ha sido necesario para alcanzar los objetivos propuestos, hay que señalar la fácil adaptación de los algoritmos a la propagación paralela y GPU. El último apartado de este capítulo lo expone someramente.

Por otra parte, cara a la escalabilidad y a aplicaciones no interactivas se podría analizar con más profundidad el tamaño de celda y el paso de integración. Sin embargo, estos posibles objetivos se han dejado para futuros trabajos de investigación.

7.3.1. Tamaño de Celda del Terreno

Una de las primeras decisiones a tomar es el tamaño de celda más adecuado para las simulaciones que se contemplan en la tesis. Se ha elegido un tamaño de celda de 3 metros de lado, que es el valor máximo que debería utilizarse siguiendo las referencias bibliográficas [90]. La anchura mínima de un cortafuegos debería ser de unos 6 metros, por lo que la resolución de las celdas del terreno debería ser tal que permita representar cortafuegos de esa anchura. Un tamaño de celda de 3 metros garantizaría esta condición, aplicando el Teorema de Muestreo de Nyquist-Shannon.

En el entorno urbano, una celda de 3 metros permite representar la gran mayoría de calles grandes y medias de cualquier pueblo y ciudad. Aunque los callejones estrechos no pudieran ser representados, hay que tener en cuenta que tanta proximidad entre edificios es prácticamente indistinguible de una situación donde dos edificios sean adyacentes [91].

7.3.2. Paso de Integración

El período de integración es el tiempo que pasa cada vez que se ejecuta una iteración del algoritmo. En nuestro caso, se ha definido que el período de integración deberá ser de 1 segundo. Por lo tanto para simular el intervalo de tiempo de una hora, serán necesarias 3600 iteraciones del algoritmo tal y como está diseñado. Este valor se ha elegido como valor más apropiado para garantizar el nivel de interactividad requerido por los usuarios del sistema. Valores más altos (de orden de 1 minuto, por ejemplo), impedirían que los usuarios percibieran el avance continuo del fuego y lo que es más perjudicial, no obtendrían un feedback de sus propias acciones hasta la siguiente actualización. Sin embargo, en otro tipo de aplicaciones el alargar el paso de integración permitiría reducir el tiempo de cómputo total de la simulación.

7.3.3. Análisis del Rendimiento

Una vez definidos los parámetros del sistema de simulación, se han utilizado varios escenarios para hacer mediciones del rendimiento de los algoritmos. Para ello, se ha introducido un monitor de tiempos que mide el tiempo que tarda un paso de simulación completo. Éste valor por sí mismo, aunque importante, se complementa con el número de celdas activas tras la finalización del paso de simu-

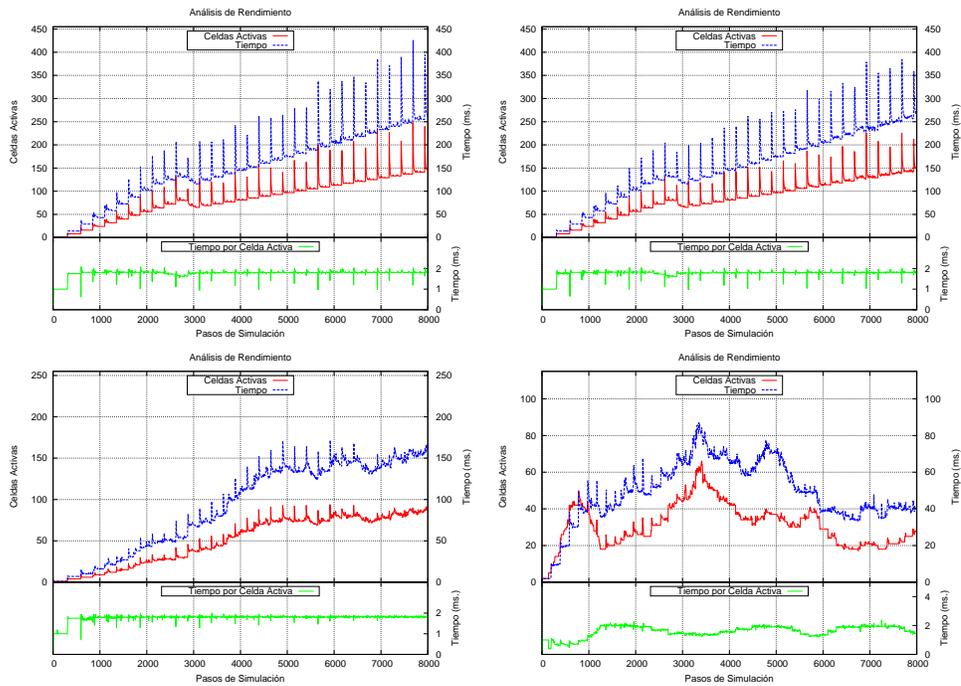


Figura 7.19: Análisis del rendimiento de diferentes incendios forestales a lo largo de 8000 pasos de simulación. Arriba izquierda: Escenario Plano con vegetación uniforme y sin viento. Arriba derecha: Escenario con pendiente con vegetación uniforme y con viento. Abajo Izquierda: Escenario con una montaña (campana Gauss), vegetación uniforme y sin viento. Abajo derecha: Entorno urbano con múltiples edificios, barreras y viento contante.

lación. Una división de ambos valores nos permite obtener una media del tiempo consumido por los algoritmos por celda activa del escenario.

En la figura 7.19 se puede ver la evolución del número de celdas activas y del tiempo por step para varias simulaciones sencillas, sin incluir procesos de extinción. Se puede observar cómo el tiempo de cada paso de simulación se mantiene por debajo de 300 ms. (con picos de 400 ms.), dando valores de 2 ms. por paso de simulación y celda activa. Los picos que se pueden observar corresponden a los instantes en los que el frente de fuego avanza por completo, por lo que se activan un mayor número de celdas a la vez. Lo normal es que en próximas iteraciones, muchas de las celdas mueran y no cuenten ya como celdas activas. Sin embargo, en cuanto a tiempos se refiere, estos picos en el “número de celdas activas” no conlleva una penalización en los tiempos de ejecución.

La última gráfica de la figura 7.19 utiliza un terreno que incluye múltiples edificios. En concreto 19 edificios que ocupan 241 celdas o 2169 m². Se puede observar que el valor medio no es tan estable como en los escenarios forestales debido a que un edificio con varias plantas se contabiliza como una única celda activa aunque contenga múltiples *FloorUnit*'s activas. Sin embargo, el tiempo por celda activa y paso de simulación se mantiene cercano a 2 ms. o incluso inferior.

Al final del capítulo se analizan las consecuencias de estos datos.

7.3.4. Almacenamiento o Cálculo de las Pendientes

Para la aplicación de los algoritmos presentados en los capítulos anteriores, es necesario calcular las pendientes del terreno en cada celda del escenario. Al iniciar una simulación se genera el modelo y se determina la altura en todos aquellos puntos que corresponden con el centro geométrico de las celdas (proyección 2D).

Es interesante saber desde el punto de vista de la eficiencia si compensa precalcular las pendientes entre cada una de las celdas y sus celdas vecinas. En el caso hipotético de utilizar un terreno dividido en 800×800 celdas, implica almacenar una importante cantidad de datos extra ($800 \times 800 \times 8/2$ valores). Pero hay que tener en cuenta que la utilización de la pendiente se realiza exclusivamente por las celdas activas, cuyo número no es esperable que sea muy alto (del orden del 10% de las celdas totales).

El cálculo de la pendiente entre dos celdas se puede simplificar enormemente teniendo en cuenta la regularidad de las celdas, habiendo solamente dos casos posibles: celdas en dirección ortogonal y celdas en diagonal. En ambos casos, un

cálculo de pendiente solo requiere una adición y un producto.

En estas condiciones, es preferible realizar el cálculo de las pendientes en tiempo de ejecución sin necesidad de precalcularlas todas.

7.3.5. Consideraciones al Respecto de la Aleatoriedad

Internamente, los algoritmos calculan probabilidades de que algo ocurra. Para determinar si un evento ocurre o no, se calcula un número pseudo-aleatorio y se determina si entra dentro del rango de probabilidades de dicho evento. Una de las ventajas del uso de sistemas estocásticos es que le dota al sistema de una aleatoriedad inherente a los procesos complejos en los que está encajado la propagación de incendios. La tabla 7.3 recoge algunas de las probabilidades utilizadas para obtener los resultados mostrados en este capítulo.

Ocurrencia del fenómeno	Porcentaje
Propagación en contra del viento	10 %
Propagación en contra de la pendiente	15 %
De pasar a estado SURVIVE	80 %
Propagación horizontal en edificios	15 %
Propagación ascendente en edificios	30 %
Propagación descendente en edificios	5 %

Tabla 7.3: Factores de probabilidad utilizados en esta tesis.

Sin embargo, dicha aleatoriedad puede ser un problema de cara a realizar las pruebas de rendimiento bajo las mismas condiciones. Aunque se puede fijar el valor inicial del generador pseudo-aleatorio y obtener la misma secuencia de números aleatorios de forma determinista, en la realización de los test de este capítulo se ha decidido mantener la aleatoriedad entre las distintas pruebas.

7.3.6. Programación Paralela

Como se ha dicho, la paralelización no es objetivo de esta tesis. Sin embargo, la inclusión de técnicas de programación paralela es sencilla. En estos algoritmos, el cálculo del nuevo estado de cada celda es independiente del resto de celdas. Es decir, las celdas en la iteración n consultan el estado de las celdas vecinas en la iteración anterior, $n-1$. Así pues, no son posibles las condiciones de carrera ni otros problemas de sincronización debido al cálculo en paralelo.

Algoritmo 7.1 Algoritmo que muestra cómo paralelizar la actualización de las celdas mediante el uso de un *ThreadPool*.

```
1: parallelized_step
2:   initialize new state of active cells
3:   for each active cell c do
4:     create Task Tc linked to cell c
5:     add Tc to the global ThreadPool
6:   end for each
7:   wait till all tasks end
8:   // All the cells are updated here
9:   save cell state to the field
10:  remove BURNT cells from active cell list
11:  add new cells to active cell list
12: end parallelized_step
```

Los algoritmos de propagación y extinción de incendios pueden explotar esta característica definiendo un *ThreadPool*, con un número de *Working Threads* igual al número de procesadores o núcleos del computador. Las tareas a ejecutar son las actualizaciones de las celdas activas y se espera a que finalicen todas ellas. Entonces se salva el nuevo estado como definitivo en la matriz de celdas y se actualiza la lista de celdas activas, eliminando aquellas celdas que han pasado a un estado final y añadiendo aquellas que se hayan iniciado durante esta iteración (ver algoritmo 7.1).

La organización matricial de las celdas que presentan el terreno ayuda a la ejecución en paralelo del algoritmo, pudiendo incluso utilizarse en entornos de procesadores vectoriales o procesadores gráficos (GPU) de última generación. La existencia de lenguajes de programación como *CUDA* ayudaría a la creación de programas paralelos que utilizarían el hardware existente hoy en día en las tarjetas gráficas de gama media y alta.

A su vez, también es posible implementar los algoritmos de propagación y extinción de incendios en entornos Web, a través de tecnologías emergentes como *WebGL* y el uso de shaders programables o el futuro *WebCL*, un equivalente a *WebGL* para el API *OpenCL*. *OpenCL* es la apuesta para estandarizar la programación de uso general utilizando hardware meramente gráfico (*GPGPU*, *General Purpose Graphics Processing Units*), categoría a la cual *CUDA* pertenece pero está asociado a hardware de *nVidia*.

7.4. Resumen

Los resultados expuestos en este capítulo, muestran la posibilidad de usar los algoritmos propuestos en sistemas interactivos. En el próximo capítulo se contrastarán los resultados con otros sistemas y con expertos a través de prototipos específicos.

A lo largo de este capítulo se ha desgranado el comportamiento cualitativo de los algoritmos y se han realizado medidas del rendimiento.

En entornos forestales, la propagación de los incendios sigue las reglas de comportamiento básicas definidas en la literatura (ver capítulo 2) referentes a las condiciones de viento, las pendientes del terreno y los tipos de vegetación.

En entornos urbanos, la introducción de los edificios como estructuras tridimensionales genera una mayor diversidad de comportamientos. La propagación vertical y horizontal son los aspectos más relevantes. En el apartado correspondiente se ha visto que dichos comportamientos siguen unas pautas razonables, donde influye notablemente los materiales de construcción de los edificios.

También la propagación a distancia (Spotting Fires) está dentro del comportamiento esperable.

Se ha analizado el comportamiento de los mecanismos de extinción de incendios, a través de pruebas automáticas (no interactivas). En la bibliografía no se han encontrado ni resultados ni experiencias que permitan contrastar este fenómeno.

También son novedosos los resultados que se presentan sobre los procesos de propagación en entornos mixtos donde las edificaciones están inmersas en un entorno forestal.

Aunque no se ha analizado de modo formal en este capítulo, los resultados presentados indican que en pocos minutos se pueden simular procesos de duración mucho más larga. En el capítulo 7 se presentan las pruebas con expertos que se han realizado en esta línea. Una de ellas contempla el apoyo al proceso de *Decision Making*, que está alineado con uno de los objetivos iniciales de la tesis.

Capítulo 8

Validación

En el capítulo anterior se ha contrastado el comportamiento de los algoritmos presentados en los capítulos 4 y 5. En este capítulo se validan los resultados de los algoritmos.

También se analiza con expertos su rango de aplicación en los entornos de entrenamiento virtual objetivo de la tesis.

8.1. Contrastación de los algoritmos forestales

Como se ha planteado en la introducción, en este apartado se contrastan los resultados obtenidos con los de una aplicación muy conocida en el sector, FARSITE. El objetivo es observar si dichos resultados son similares a los obtenidos por los algoritmos presentados en esta tesis, utilizando datos de entrada similares. Como FARSITE está limitado a entornos forestales, sólo se compararán los resultados obtenidos mediante escenarios forestales, sin edificios. En el siguiente apartado se comparan cualitativamente los resultados obtenidos en escenarios con edificios (entornos urbanos).

Volviendo a los escenarios forestales, hay que tener en cuenta que ambos sistemas operan con diferentes características y datos. Para acotar las diferencias, primeramente se comentan las características de FARSITE para posteriormente definir los escenarios que se han utilizado en la comparativa. Finalmente se muestran los resultados y se interpretan dentro del contexto del alcance de esta tesis.

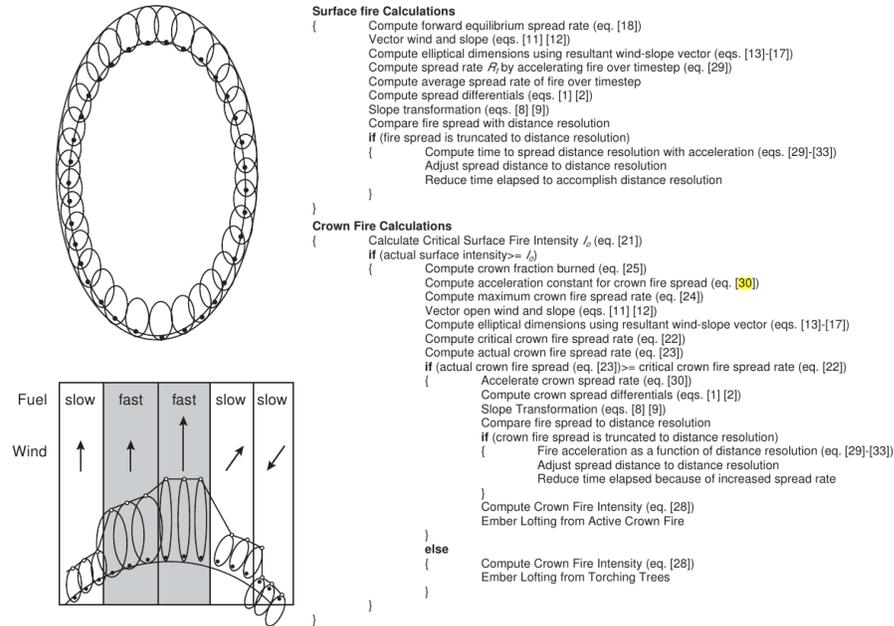


Figura 8.1: FARSITE utiliza el principio de Huygens para la simulación de la propagación del fuego (izquierda), que se ve reflejado en los pseudo-algoritmos (derecha).

8.1.1. FARSITE

FARSITE es una aplicación encuadrada dentro los modelos empíricos de simulación de incendios. Está basado en la formulación del principio de Huygens de la propagación de ondas [10].

FARSITE incorpora modelos de simulación para la propagación de fuego superficial, entre las copas de los árboles y propagación a distancia (*Spotting Fires*). También incorpora modelos para la fase de aceleración y de la humedad del combustible.

La base del principio de Huygens radica en modelar la expansión del fuego en base a la utilización de formas elípticas colocadas en el frente activo del incendio (ver figura 8.1). Los parámetros de estas elipses están determinados por la pendiente y las condiciones de viento. A cada paso del modelo, el fuego avanza y nuevas elipses se van colocando de forma que la separación entre ellas no supera un umbral definido, que básicamente define la resolución del modelo.



Figura 8.2: Escenario incluido en la instalación de la aplicación FARSITE. El terreno es de aproximadamente 11×8 km. con un desnivel de unos 1300 m. (altura mínima de 710 m. y máxima de 2097 m.) y contiene información sobre carreteras y ríos.

8.1.2. Escenario de la Comparativa

La comparativa entre los resultados obtenidos por FARSITE y los presentados el capítulo anterior debe tener en cuenta la distinta naturaleza de ambos sistemas. FARSITE está orientado a amplias y largas simulaciones donde no existe interacción. Los algoritmos objeto de esta tesis se orientan a sesiones de entrenamiento. A pesar de esta disparidad, el comportamiento del fuego en condiciones semejantes debe ser similar en ambos sistemas. Las principales diferencias son:

- La resolución espacial que se contempla habitualmente en FARSITE es de 30 m., mientras que el tamaño del celda utilizado por los algoritmos presentados en esta tesis es de 3 m.
- El período de integración más bajo que se puede seleccionar es 1 minuto, mientras que el utilizado en esta tesis es de 1 segundo.
- El resultado de FARSITE en cada paso de simulación consiste en el perímetro o frente de incendio (en los mismos parámetros de resolución, la mínima resolución es de 30 m.).
- FARSITE incorpora modelos más complejos de combustible, propagación del fuego entre copas de los árboles, modelos de humedad del mismo, definición de la orientación del terreno y otros datos de entrada que no se contemplan en esta tesis.

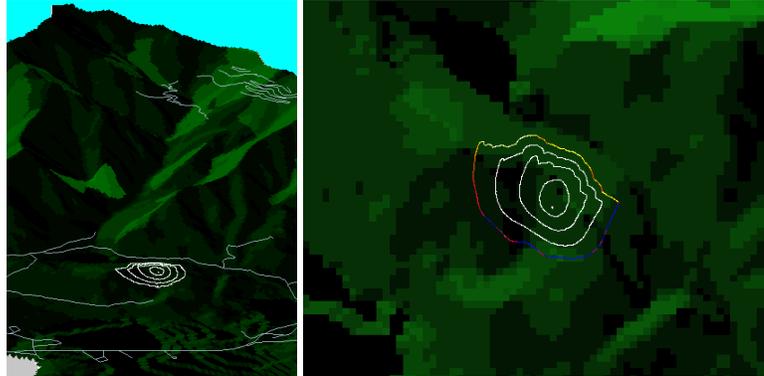


Figura 8.3: Simulación realizada por FARSITE utilizando un viento constante durante toda la simulación.

En la instalación de la aplicación FARSITE viene un ejemplo o tutorial funcional que nos ha servido como modelo de pruebas. En la figura 8.2 se pueden ver dos capturas del escenario. Para poder utilizarlo con nuestros algoritmos ha sido necesario acceder a los datos del modelo, especialmente, el fichero de elevación del terreno y el que define los tipos de vegetación. FARSITE también almacena las pendientes y el *aspect* u orientación, pero no es necesario portar o convertir estos datos.

El modelo del tutorial tiene una extensión de casi 90 km². Para el ejemplo que se presenta a continuación se ha elegido un sector relevante del terreno: una región cuadrada de 900 m. Esto genera un modelo de 300×300 celdas, apropiado para verificar resultados interactivos. Se ha utilizado un viento constante en las simulaciones.

8.1.3. Resultados

En la figura 8.4 se muestran los resultados de la simulación utilizando los algoritmos de la tesis. La evolución del fuego en ambos sistemas posee un parecido razonable, teniendo en cuenta la simplificación que se ha realizado tanto al terreno como a las condiciones de la simulación. La imagen de la izquierda ofrece una perspectiva global del estado del incendio justo cuando llega a lo alto de una colina. En la derecha se puede ver un zoom del frente de fuego. En la figura 8.2 se observa la misma colina y cómo el fuego desciende por ella a menor velocidad generando un patrón similar.

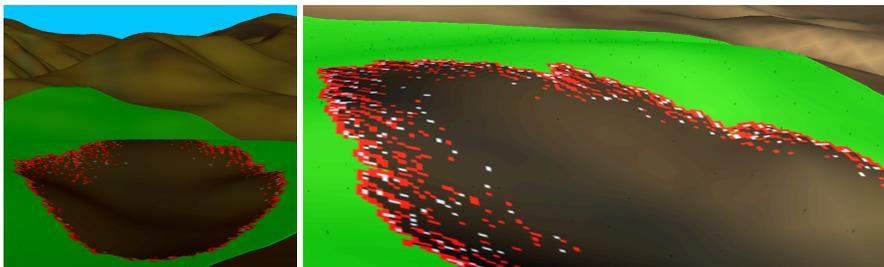


Figura 8.4: Simulación de una porción del escenario obtenido de FARSITE.

Este ejemplo también muestra la eficiencia de los algoritmos de la tesis. El tiempo de cómputo se mantiene estable en 1 ms. por celda activa y por paso de simulación. Estos resultados son coherentes con los resultados mostrados en el capítulo anterior, donde los valores medidos siempre están en relación directa al número de celdas activas. Simulando lo más rápido posible, se observa que se llega al paso 1800 (30 minutos) en 10 segundos. Al paso 3600 (1 hora) se llega en 23 segundos, y al 7200 (2 horas) en aproximadamente 47 segundos.

Conviene recordar que el paso de simulación es de 1 segundo, mientras que en FARSITE el mínimo valor posible es de 1 minuto. Otro punto interesante es el gran incremento del coste de simulación en FARSITE a medida que avanza la simulación. El incremento es casi exponencial a partir de una hora de evolución del incendio.

8.2. Contrastación de los algoritmos urbanos

Actualmente no conocemos un software de referencia en cuanto a simulaciones de incendios urbanos. Para poder realizar una comparativa es necesario recurrir a trabajos científicos donde se estudien eventos reales, ofreciendo suficiente información para poder replicar los escenarios. En el apartado 2.2.5 se presentó una colección de trabajos centrados en el estudio de la propagación de incendios después de un terremoto.

8.2.1. Escenario de la Comparativa

La principal fuente con información útil son los incendios urbanos provocados tras un terremoto y cuyos resultados catastróficos han empujado a la comunidad



Figura 8.5: Propagación de incendio urbano en la ciudad de Kobe (Japón) tras un terremoto [35]. A la izquierda, la situación real al inicio del incendio. A la derecha, los resultados de la simulación virtual.

científica a estudiar los comportamientos de dichos incendios con el fin de poder combatirlos más eficientemente en el futuro.

Zhao [35] estudia el comportamiento de dichos incendios urbanos a través de un caso real: el terremoto ocurrido en la ciudad de Kobe (Japón) en 1995.

El escenario elegido para hacer la comparación ha sido extraído de dicho trabajo de Zhao, donde se utilizan datos reales de un incendio urbano asociado al terremoto (ver figura 8.5). Este incendio en concreto estuvo activo durante 15 horas, destruyendo completamente más de 600 edificios, en su mayoría de madera. Zhao realiza una comparativa entre la situación real y los resultados de su simulación en diferentes instantes de tiempo (7h, 10h, 13h y 20h 50', habiendo empezado hacia las 5h 47').

Para poder realizar una simulación de este caso con los algoritmos de la tesis, se ha generado un terreno partiendo de las imágenes (ver figura 8.6), e iniciando un incendio aproximadamente en la zona original de la simulación. Por falta de datos reales, se ha supuesto que todos los edificios son de 3 plantas (altura razonable para los edificios de madera) y que no hay vegetación en las calles.

Disponer de datos de un incendio forestal que se propaga a una zona urbana (una urbanización) hubiera sido un escenario más deseable. Pero en este tipo de situaciones influye mucho la acción de los equipos antincendios. Para poder realizar una simulación, habría que saber el lugar, la hora y las características de cada una

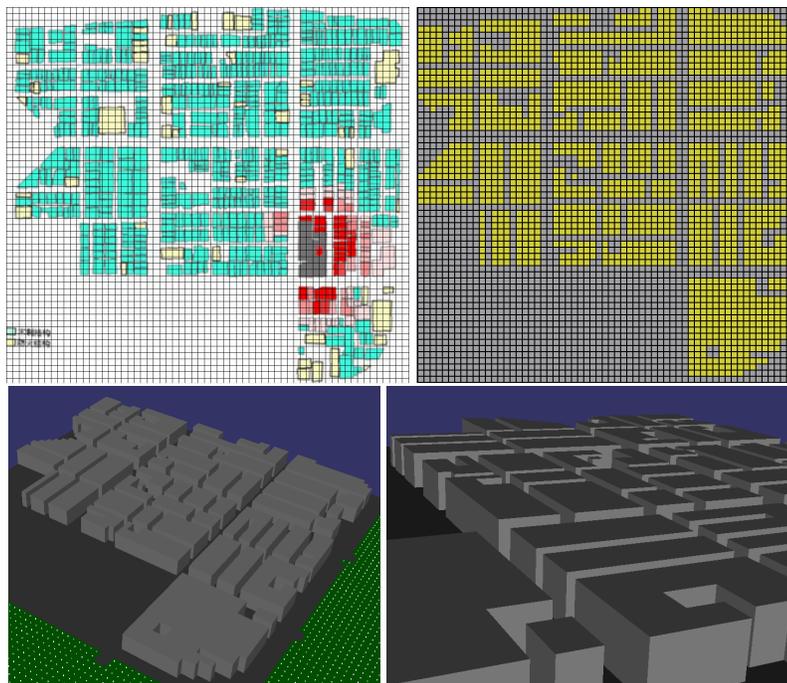


Figura 8.6: Escenario urbano generado para realizar la simulación. Todos los edificios son de 3 plantas.

de las actuaciones.

8.2.2. Resultados

Se han realizado varias simulaciones con el escenario urbano, situando el foco inicial del incendio en una localización parecida a la de los datos originales. En la figura 8.7 se observa la evolución del incendio real, los resultados de la simulación de Zhao y los resultados de la simulación de los algoritmos urbanos de esta tesis. Se puede observar que sigue unos patrones espaciales y temporales similares a los ofrecidos por Zhao en su trabajo.

Se desconoce el tiempo de simulación de Zhao. Esto impide realizar comparativas de eficiencia. Para analizar la eficiencia de los algoritmos presentados en la tesis con este escenario se ha elegido un *worst case*: un viento muy fuerte que propaga rápidamente el incendio. En este caso no interesa tanto realizar una comparativa de eficiencia como contrastar que se mantiene una capacidad de simulación

interactiva.

Se han realizado 8000 pasos de simulación que se corresponden con 3 horas de fuego real. El tiempo de cálculo para estas tres horas ha sido mucho menos. El paso de integración es de un segundo y prácticamente en la totalidad de la simulación, el coste computacional ha estado por debajo de ese límite. Esto muestra la capacidad interactiva de los algoritmos incluso en estas condiciones extremas (media ciudad llega a estar incendiada en un mismo instante).

La figura 8.8 resume la evolución del tiempo de cómputo por paso de simulación y el coste por celda activa. En este caso cada celda activa (en edificio) contiene tres (en vertical), correspondientes a cada planta. Se puede ver que la eficiencia de la simulación es coherente con los resultados del capítulo anterior.

8.3. Valoración Externa

La predicción exacta del comportamiento de incendios tiene serias dificultades. Por una parte es muy difícil modelar cuantitativamente el combustible presente en el terreno o los edificios (por su variación estacional en el caso de los entornos forestales y por ser altamente impredecible en edificios). Por otra parte, el propio análisis de la evolución del fuego es altamente no lineal y la evolución del viento puede crear problemas combinatorios que dificulten todavía más la predicción.

Sin embargo, la experiencia muestra pautas de comportamientos del fuego que han sido contrastadas con los resultados de las secciones precedentes. Esto abre paso a una valoración subjetiva de los resultados obtenidos por parte de expertos.

Por ello en el marco de la tesis, se decidió trabajar con un panel de expertos para contrastar los resultados obtenidos y las posibilidades prácticas que ofrecen.

Se ha contado con la colaboración y asesoramiento del Centro de Seguridad Marítima Integral Jovellanos [92], situado en Gijón. En el Centro Jovellanos se imparte formación orientada a distintos colectivos: brigadas, protección civil, hospitales, y, en general, cualquier colectivo que se pueda ver en la necesidad de coordinar o responder a una emergencia relacionada con el fuego. La oferta de cursos que ofrecen incluye cursos de iniciación (*Emergencias químicas nivel 1*), teóricos (*Mando y control para bomberos*) y prácticos (*Avanzado de lucha contra incendios*). Algunas de las instalaciones pueden verse en la figura 8.9.

En la sesión final (cara a la tesis) celebrada en sus instalaciones en Octubre de 2012, se valoraron las aplicaciones previamente consensuadas con ellos. Se consideraron tres escenarios. Tras describirlos se encuentra la sección con la valoración

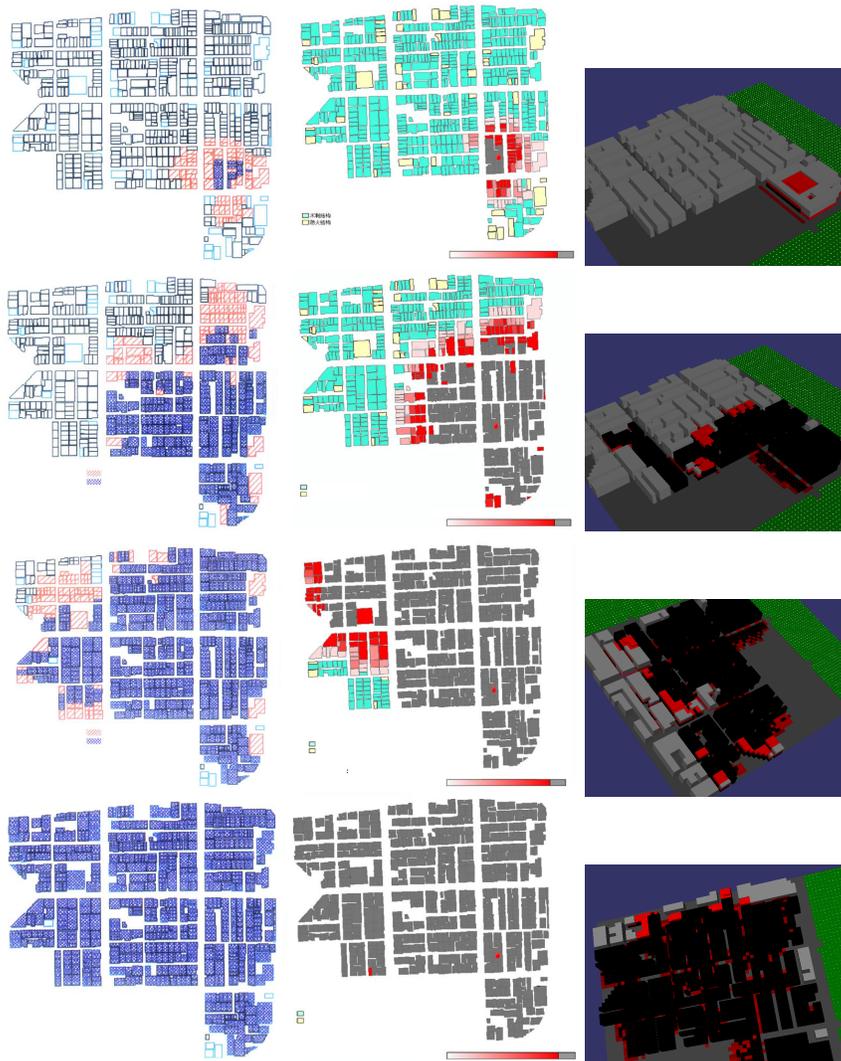


Figura 8.7: Comparativa cualitativa entre los resultados de la simulación. A la izquierda, situación real. En el centro, los resultados de la simulación de Zhao. A la derecha, los resultados utilizando los algoritmos de simulación de esta tesis.

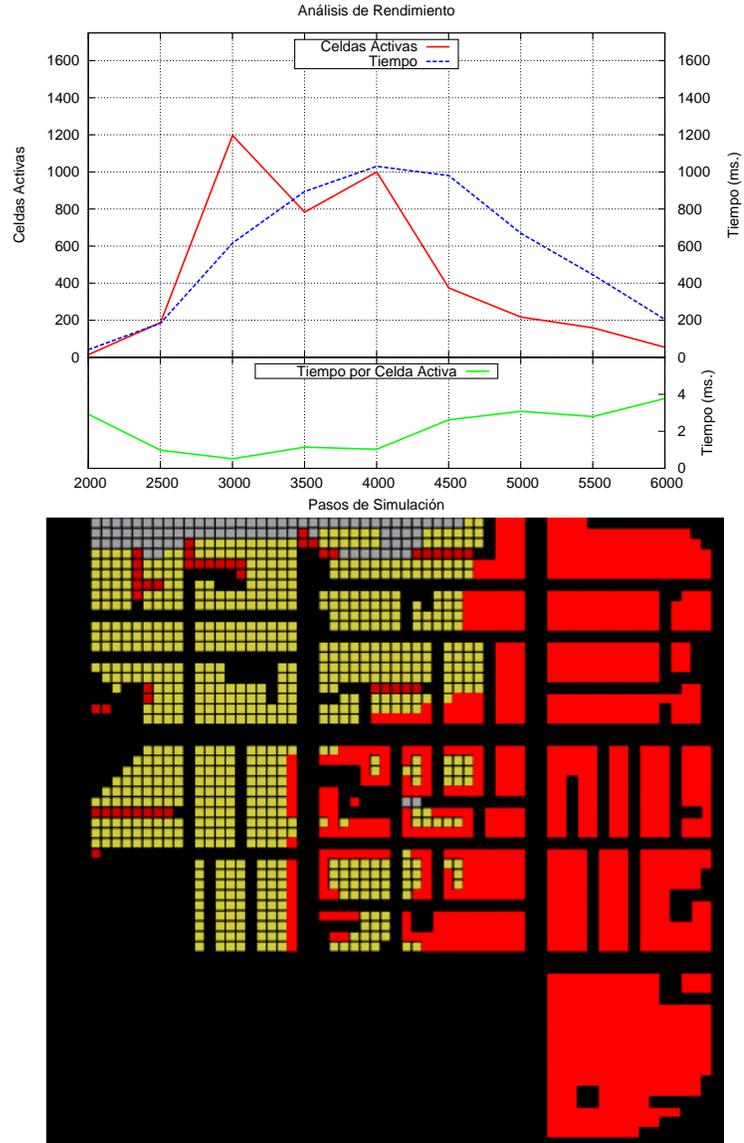


Figura 8.8: Simulación del escenario urbano de Japón con condiciones extremas. La gráfica de rendimiento indica que se tarda 4 ms. por celda activa (máximo valor).



Figura 8.9: Algunas de las instalaciones del Centro Jovellanos.

de los expertos.

8.3.1. Escenarios

Los primeros escenarios tienen las siguientes características comunes. El tercero es de diferente naturaleza.

Se ha diseñado un simulador interactivo con objeto de validar ante usuarios expertos si el comportamiento de los algoritmos es consistente con su experiencia. Para ello, el simulador carga un escenario (forestal, urbano o mixto) y se posiciona al usuario en un punto cercano al terreno. Una vez iniciada la simulación, un incendio aparecerá en una localización predeterminada y comenzará a propagarse utilizando los algoritmos propuestos en esta tesis.

El usuario tendrá visible en pantalla la dirección y velocidad del viento e información adicional sobre el significado de los colores utilizados en el simulador.

El incendio puede combatirse con una manguera virtual que arroja agua sobre la zona seleccionada, intentando apagar o contener el avance del fuego.

Seguidamente se comentan brevemente estos dos casos de uso del simulador.

8.3.1.1. Escenario forestal

El objetivo de los escenarios forestales es mostrar una visualización de un incendio forestal donde el usuario deberá intentar controlar dicho incendio, teniendo en cuenta que actúa sólo (no es una aplicación colaborativa, ver parte superior de la figura 8.10).

En el ejemplo de prueba el fuego va de derecha a izquierda y el usuario debe intentar apagarlo. El viento también va de derecha a izquierda, con una velocidad



Figura 8.10: Escenario forestal y urbano en el simulador interactivo desde el punto de vista de los usuarios.

que se mantiene constante durante la simulación. En cada prueba la velocidad del viento es distinta, determinada aleatoriamente.

Se realizan dos simulaciones por usuario: una en la que el fuego se propaga libremente y otra en la que el experto puede arrojar agua para controlar el fuego.

8.3.1.2. Escenario urbano

El escenario urbano se caracteriza por la existencia de edificios (ver parte inferior de la figura 8.10). El usuario se sitúa cerca del fuego, que se ha activado en el segundo piso de un edificio de 3 plantas. El viento existente podría propagar el fuego a edificios contiguos. El usuario deberá valorar si el comportamiento de este tipo de incendios cuadra según su experiencia particular.

En una segunda simulación, los usuarios deberán intentar contener el fuego, evitando su propagación descontrolada. De una manera similar, se evalúa si el comportamiento respecto del proceso de extinción es verosímil.

8.3.1.3. *Decision Making*

Además de los escenarios inmersivos planteados en los apartados anteriores, también se mostraron varios prototipos de investigación diseñados para dar soporte en la toma de decisiones. Estas aplicaciones permiten editar y configurar un escenario forestal, urbano o mixto desde cero o partiendo de otros modelos ya existentes. Para cada celda del escenario se puede indicar todos sus atributos, incluyendo su tipo y combustible inicial. Para las celdas correspondientes a los edificios, se procede de manera similar, pero incorporando sus propiedades (especialmente, el número de pisos). De igual manera se puede configurar el viento global del escenario, tanto dirección como velocidad (ver parte superior de la figura 8.11).

Una vez diseñado el escenario, se pueden iniciar la simulación (ver parte inferior de la figura 8.11). No es necesario definir los puntos de ignición al principio, sino que el usuario puede añadirlos con la simulación en marcha. De una manera similar, el usuario tiene opción de arrojar agua sobre una celda o grupo de celdas seleccionadas, simulando el proceso de extinción.

El escenario en sí mismo es editable en tiempo de simulación. Se pueden modificar las características de cualquier celda del escenario y la simulación utilizará los nuevos datos en las siguientes iteraciones de los algoritmos que calculan la propagación y extinción de los incendios activos.

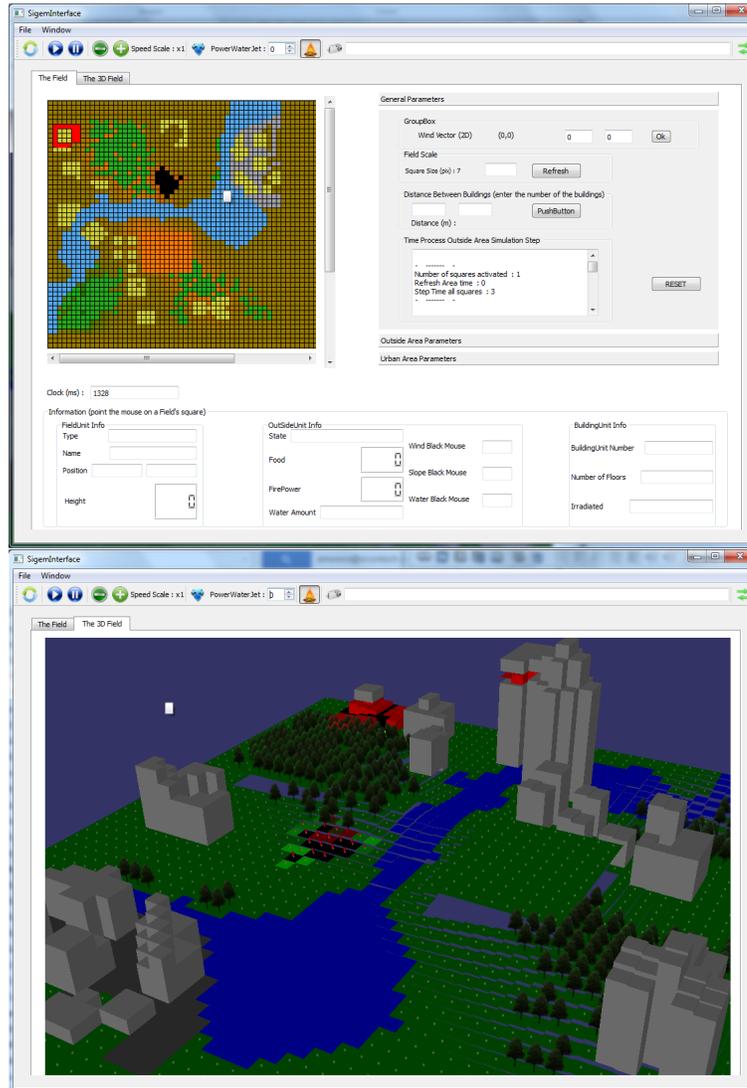


Figura 8.11: Aplicación de investigación como soporte a la toma de decisiones (modo edición 2D y visualización en 3D de la simulación).



Figura 8.12: Sesión final en las instalaciones del Centro Jovellanos, donde se realizaron las pruebas con expertos.

8.3.2. Valoración de los expertos

La sesión junto con los expertos del Centro Jovellanos tuvo lugar en sus instalaciones el 2 de Octubre de 2012. Estuvo dividida en tres fases.

En la primera fase se presentó someramente el trabajo de investigación y las capacidades del simulador, desde el punto de vista de los usuarios (ver parte superior de la figura 8.12).

En la segunda fase los expertos utilizaron dicho simulador (ver parte inferior de la figura 8.12). En la primera simulación, el usuario sólo observaba cómo se desarrollaba el incendio. En una segunda simulación, con los mismos parámetros, el usuario intentaba contenerlo. Se realizaron otras simulaciones, que servían a los expertos para valorar si los resultados que estaba observando eran compatibles con

su experiencia. En especial, el escenario que mostraba cómo el incendio podía propagarse a distancia (*Spotting Fires*) se simuló varias veces con distintos parámetros de viento.

La última fase de la sesión fue un animado debate sobre las capacidades técnicas del simulador, sobre la importancia de los algoritmos y las necesidades reales que ellos, como expertos, tienen en su centro de formación.

Las principales ideas que salieron en el debate fueron las siguientes:

- Valoración muy positiva del simulador presentado y del trabajo de investigación realizado para desarrollar los algoritmos.
- En especial, se valoraron las herramientas de simulación presentadas como claramente relevantes para su trabajo de formación. La máxima puntuación se obtuvo en la “Formación en la toma de decisiones”.
- Un experto expresó sus dudas sobre la complejidad del sistema. Es decir, aún tras el proceso de simplificación realizado en esta tesis, se considera que el simulador se sigue considerando complejo. Esta opinión es causada por la complejidad de los datos requeridos: vegetación, edificios y agentes extintores. También influye la interrelación de los distintos elementos, que llevan a múltiples comportamientos: propagación a distancia, evaporación, viento, pendiente, propagación edificio-forestal.
- Otros expertos percibieron que en la propagación parecía que la pendiente tenía más peso que el viento, aunque el comportamiento entraba dentro de lo esperado. Quizás los valores asociados al tipo de vegetación en los escenarios de demostración no fueran los más realistas de todos. Los escenarios básicos que se mostraron estaban compuesto por vegetación uniforme de tipo “hierba”, cuyo comportamiento es de propagación muy rápida.
- Respecto a los escenarios con edificios, todos los expertos coincidieron que es muy difícil valorar si la propagación es correcta sin saber nada de su interior. Además, casi nunca se ven edificios con incendios de propagación libre, puesto que los equipos anti-incendios se ponen a actuar según llegan al lugar del incendio. Sin embargo, los expertos opinan que las simulaciones que vieron entra dentro del rango de verosimilitud.
- Dos expertos opinaron que es muy difícil ver una propagación entre edificios en entornos urbanos de ciudades modernas. Sólomente se podrían dar en

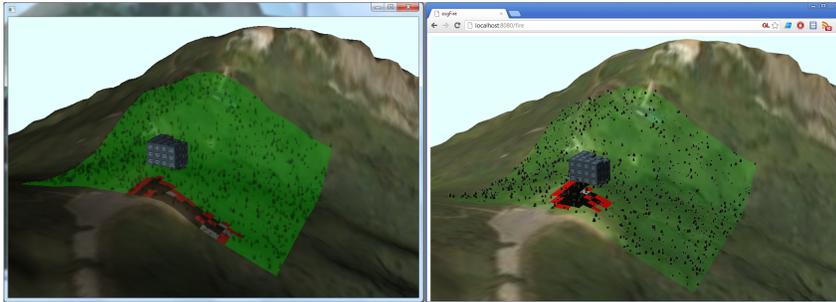


Figura 8.13: Migración de la visualización de propagación de incendios a la Web gracias al framework ReWeb3D.

entornos de chabolas y/o cascos antiguos con edificios viejos y de madera. En estos casos, la propagación no sería realmente por el viento, sino entre las líneas de conexión entre los edificios (ropa tendida en cuerdas entre edificios, el tendido eléctrico ...).

Las conclusiones de los participantes son claramente positivas respecto a la utilidad práctica del trabajo presentado. Han valorado de modo especial:

- el realismo del proceso de propagación,
- la posibilidad de crear escenarios de entrenamiento reales,
- la experiencia adquirida les lleva a proponer la construcción de un sistema multiusuario para entrenamiento y toma de decisiones.

Estas opiniones permiten afirmar que los objetivos de la tesis (ver apartado 1.3) han sido cubiertos de un modo que satisface a los expertos. Además, esas conclusiones refuerzan las líneas de investigación que se consideran continuación de esta tesis. En concreto, la implementación de herramientas de entrenamiento y toma de decisiones es un objetivo fácil de alcanzar con el trabajo aportado por la tesis.

Por otra parte los esfuerzos de integración de información, necesarios para la creación (rápida y económica) de escenarios reales sigue siendo un reto importante, tal y como se ha apuntado en el capítulo 6.

8.4. Migración de Aplicaciones a la Web

En las reuniones de seguimiento con los expertos, tratando de requisitos de interfaz de usuario, expusieron la conveniencia del acceso remoto de las aplicaciones. Ellos consideran importante poder acceder a los resultados de simulación desde los dispositivos móviles que los jefes de brigada disponen. Esta necesidad nos permitió considerar la Web como interfaz de las simulaciones de incendios forestales y urbanos asociadas a los procesos de toma de decisiones.

Se ha desarrollado un framework, que hemos denominado ReWeb3D, para portar aplicaciones escritorio a la Web de manera casi inmediata [93]. Se ha utilizado dicho framework para portar la aplicación de simulación de incendios forestales y urbanos. En la figura 8.13 se puede ver la comparación visual entre los resultados obtenidos en la aplicación en escritorio y en Web.

En el congreso *IVAPP* 2012 se presentó un trabajo relacionado con la visualización en la Web de datos geográficos compuestos por series temporales de corrientes oceanográficas [94].

8.5. Otros escenarios de demostración

En este apartado se presentan una serie de escenarios centrados en la ciudad de San Sebastián y sus alrededores. Para realizar los escenarios, se han tomado los datos geográficos semánticamente enriquecidos (ver apartado 6.3). Además, se ha incorporado la capa de datos correspondiente a las carreteras.

Para completar los escenarios es necesario elegir las áreas donde se van a realizar las simulaciones y precalcular las alturas de las celdas (muestreando el terreno).

Los escenarios que se muestran en la figura 8.14 corresponden con:

- Pequeño incendio real ocurrido en el monte Ulía en Agosto de 2012¹. Se ha elegido la zona de ignición según indicaron las noticias publicadas al respecto y las condiciones del viento de los datos históricos de ese día en concreto del sitio web de Euskalmet (viento global). La vegetación predominante en la zona es de árboles, así que se ha elegido este tipo como tipo de vegetación para las celdas de la simulación.

¹Incendio Monte Ulía, Agosto 2012: <http://www.diariovasco.com/v/20120818/al-dia-local/incendio-calcina-diez-hectareas-20120818.html>

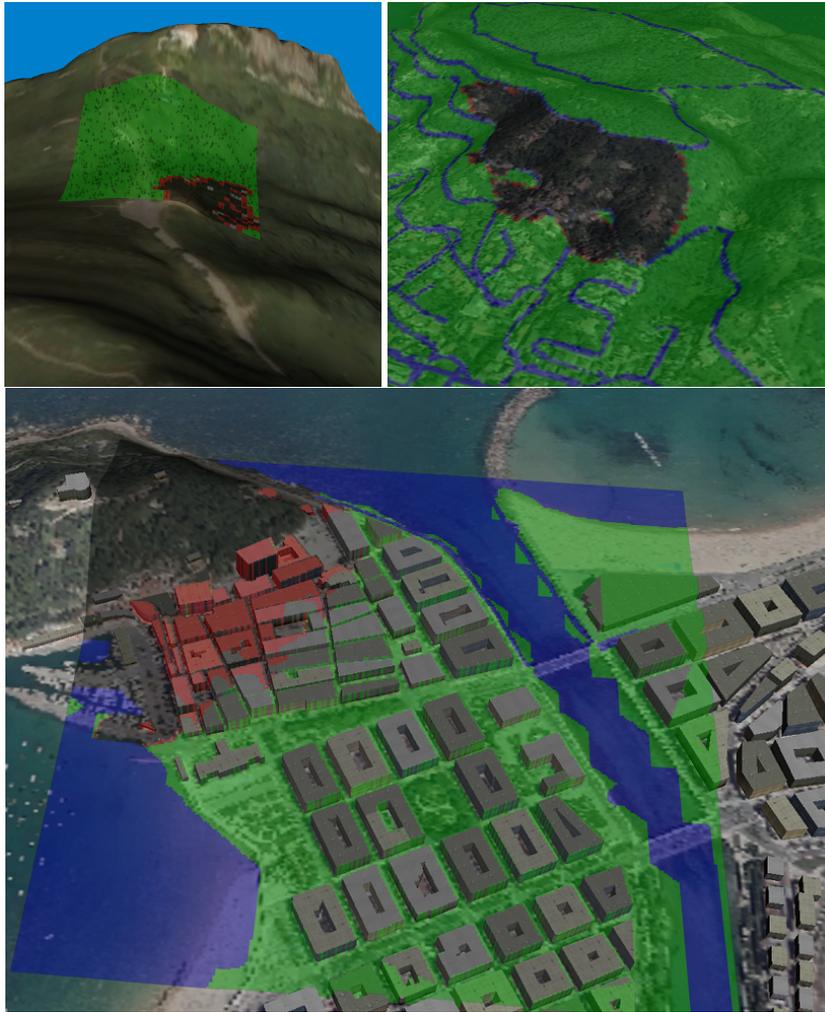


Figura 8.14: Escenarios reales en el monte Ulía y parte vieja de San Sebastián.

- Simulación de un incendio en la ladera del monte Ulía. El escenario incorpora la red de carreteras de la zona, actuando de barreras naturales ante el avance del fuego.
- Simulación de incendio en la Parte Vieja de San Sebastián. El fuego comienza en la ladera del monte Urgull y se propaga a los edificios cercanos por la acción del viento. La clasificación del uso del suelo permite distinguir en zonas de agua (río y mar), zona forestal (monte Urgull) y zona urbana con edificios (en la figura se muestra en color verde).

8.6. Resumen

En este capítulo se ha realizado una validación de los algoritmos presentados en esta tesis. Se ha utilizado el programa de referencia FARSITE para comparar los resultados en escenarios forestales. Para los escenarios urbanos, se ha recurrido a una publicación científica de Zhao, que presenta un caso real de incendio urbano comparado con sus propios algoritmos propuestos. En esta tesis se han añadido los resultados obtenidos con los algoritmos urbanos a la comparativa.

Se ha obtenido una visión experta de los resultados de simulación de la propagación y extinción de incendios a través del Centro Jovellanos de Gijón. Su valoración ha sido muy positiva y enriquecedora.

Finalmente, se han mostrado de manera breve otros escenarios de demostración que sirven para dar una idea de la versatilidad del simulador y los algoritmos para generar escenarios teóricos en entornos reales.

Parte del contenido de este capítulo se ha publicado en los congresos *Forest Fires* 2012 [95] e *IVAPP* 2012 [94]. También se ha presentado una contribución científica al *Journal Computer and Graphics*[93] cuya evaluación aún no está disponible.

Capítulo 9

Conclusiones y Trabajo Futuro

Esta tesis aporta en las siguientes áreas: propagación y extinción de incendios, integración de geoinformación y simulación en entornos virtuales. Seguidamente se presentan las conclusiones seguidas de las contribuciones y el trabajo de futuro.

9.1. Conclusiones

Este apartado describe los objetivos alcanzados que suponen una innovación respecto del estado del arte. En el siguiente apartado se enumeran de un modo sucinto las contribuciones.

9.1.1. Algoritmos interactivos de propagación de incendios

En los capítulos 4 y 5 se han propuesto dos algoritmos de simulación de incendios. Ambos algoritmos están unificados bajo una misma definición que permite sean utilizados en escenarios mixtos. El primer algoritmo simula la propagación de incendios en entornos forestales (bosques), modelando las variables más importantes (pendiente y viento) sobre un terreno tridimensional, con capacidad de simular el comportamiento de los cortafuegos y otras barreras naturales como ríos y carreteras, así como de simular la propagación que hemos denominado *Spotting Fires* (lo que permitiría a un incendio evitar dichas barreras).

El segundo algoritmo simula la propagación de incendios en entornos urbanos. Los elementos incluidos en el modelo son los propios edificios y el entorno urbano o semiurbano donde estén localizados (calles, zonas ajardinadas, etc.). Este algoritmo permite la simulación en varios tipos de estructuras y simula las reglas

básicas de cómo el fuego se comporta en este tipo de entornos. Además de considerar la propagación entre pisos, la inclusión de las variables *viento* y *pendiente del terreno* permite la simulación de la propagación de los fuegos urbanos entre edificios próximos, pero sin contacto directo (*Spotting Fires*).

En un escenario mixto (urbano y forestal), la combinación de los algoritmos permite obtener simulaciones de cómo el fuego originado en un bosque cercano se puede propagar a un edificio. O viceversa, un fuego iniciado en una casa rural se puede propagar al bosque donde está situada.

Las aportaciones se analizan en el capítulo 7 y se validan en el 8.

9.1.2. Algoritmos de extinción de incendios

Una necesidad básica tratada en esta tesis es la de poder interactuar con los incendios, en concreto, proceder a su extinción o contención mediante agentes extintores. Una carencia de los modelos clásicos de simulación de incendios es que no se contempla el proceso de apagado mediante la interacción de bomberos y otros equipamientos anti-incendios. Sólo los modelos de simulación offline (no interactivos) incorporan este tipo de comportamiento en los entornos virtuales considerados por esta tesis.

La interactividad necesaria en los algoritmos se justifica por la necesidad de una reacción instantánea a las acciones realizadas por los bomberos en entornos de simulación interactiva para formación y entrenamiento. Éste es un requerimiento crítico. Dicho de otro modo, un usuario del sistema de simulación requiere de un feedback rápido de sus propias acciones, o la experiencia no será totalmente satisfactoria, según lo corroboran los expertos consultados.

La capacidad de extinción se ha añadido a los algoritmos de propagación de incendios de una manera muy similar a cómo se propagan, pero de manera opuesta. Mientras que el consumo de combustible aumenta la intensidad del fuego, la adición de elementos extintores hace que disminuya y, eventualmente, se extinga. De esta manera se pueden simular las acciones de los propios agentes de a pie mediante el uso de mangueras o de hidroaviones con alta carga de agente extintor o agua.

El proceso de extinción de incendios en edificios es similar: se aporta un agente extintor para reducir el calor y la cantidad de fuego hasta su extinción. Para casas pequeñas, las propias acciones de los bomberos de a pie pueden extinguir completamente el fuego, pero en edificios altos (varias plantas) y en edificios grandes (que

ocupan una gran extensión en planta), este modelo es bastante limitado.

Para solucionar esta limitación, se ha introducido el concepto *WaterJet* o chorro de agua. En edificios altos, se suelen utilizar camiones de bomberos con una escalera alta, donde se coloca una manguera que lanza el agente extintor a una gran presión, permitiendo llegar más allá de la primera celda si se está apuntando correctamente. De una manera similar, en el algoritmo se caracterizan los aportes de agentes extintores mediante su factor de *WaterJet*, que por lo general es 1, es decir, sólo llegan a celdas situadas en la fachada. En el caso de los edificios, los aportes generados por los camiones de bomberos con torreta a presión, tendrán factores *WaterJet* de 2 o 3, permitiendo llegar a celdas más lejanas.

La caracterización de los distintos tipos de agentes extintores se hace en base a un factor de extinción, tomando como base el comportamiento del agua. Aún así, es fácilmente extensible a un mecanismo más rico que incluya algunas propiedades de los agentes extintores, como por ejemplo, los agentes retardantes, que reducen la velocidad de propagación y la cantidad de calor máxima de la zona donde se aplican.

Si tras apagar un foco de un fuego se siguen añadiendo elementos extintores, dichos agentes se mantendrán en el suelo o planta, haciendo más difícil su reinicio. En este sentido, se ha incorporado y simulado el concepto de “evaporación” que consiste en una gradual disminución de los agentes extintores remanentes por acción de focos de fuego activo cercanos. Dicho de otro modo y suponiendo que el agente extintor es el agua, el efecto evaporación haría que el agua sobrante en una zona (tras apagar el foco de fuego correspondiente) se iría evaporando por acción del calor provocado por los focos cercanos. Este efecto permite que focos previamente apagados se puedan reavivar cuando la cantidad de agua remanente llegue a cero.

9.1.3. Geoinformación y modelado semántico

Además de generar escenarios sintéticos, esta tesis ha introducido las ventajas de la utilización de datos geográficos reales. Sin embargo, se ha visto que también aparecen nuevos problemas de interoperabilidad y de heterogeneidad en los datos. Para ello, se ha planteado una aproximación semántica que permite gestionar y manejar tanto los datos como los usuarios, dentro del dominio de la gestión de emergencias.

Como consecuencia, se han generado modelos 3D, incluyendo edificios con al-

turas a partir de distintas fuentes de datos públicas. Este modelo puede ser utilizado en simulaciones virtuales al mantener las propiedades semánticas de los elementos que se utilizaron inicialmente para crear el modelo.

9.1.4. Visualización adaptada al rol del usuario

La implementación de los algoritmos de propagación y extinción de incendios tiene sentido dentro de un contexto de gestión de emergencias, donde la lucha antincendios es una pequeña parte si tenemos en cuenta todo el abanico de posibles emergencias que deben tener respuesta. De hecho, cada país, estado, autonomía e incluso localidad tiene procedimentados sus protocolos de actuación ante las posibles emergencias. Así pues, centrándonos en la lucha antincendios, las actuaciones que un bombero o un *manager* pueden tomar, tienen que estar dentro de los límites que los procedimientos e instrucciones regulan.

En este sentido, se analiza en el capítulo 6 la complejidad existente en la formulación legal y su correspondiente implementación práctica con respecto a los algoritmos de propagación de incendios presentados en este trabajo, sobre todo desde el punto de vista de la gestión de conocimiento y los roles de usuario contemplados en los casos de uso.

Se han considerado las tareas y los usuarios de los procesos involucrados en la gestión de un incendio para mejorar los interfaces de usuario y proponer mejoras que incrementan la usabilidad y la inmersión de los usuarios en la simulación.

9.1.5. Sistema de Realidad Virtual

En el capítulo 8 se han presentado los prototipos de investigación para la simulación de incendios y la positiva valoración por parte de los expertos. El capítulo 6 presenta la integración de los sistemas de visualización. Los prototipos de simulación incorporan las aportaciones comentadas anteriormente.

Con este entorno se ha validado un framework que permite migrar sistemas de visualización basados en escritorio a la Web. Este framework simplifica la migración al no requerir una reimplementación completa de las aplicaciones.

9.2. Contribuciones

Las aportaciones descritas se concretan en las siguientes contribuciones originales y las publicaciones a las que han dado lugar.

1. Los algoritmos para propagación y extinción de incendios en sistemas interactivos aportan:
 - a) entornos forestales y urbanos integrados en un modelo único y compacto,
 - b) simulación integrada de ambos entornos,
 - c) propagación a distancia de los incendios (*Spotting Fires*),
 - d) extinción de incendios de manera interactiva (usuario) en entornos forestales y urbanos (modelo *WaterJet*),
 - e) simulación de la evaporación de los agentes extintores por medio del calor,
 - f) algoritmos eficientes para permitir la simulación interactiva en los escenarios de entrenamiento y de *Decision Making*
2. Integración de geoinformación y roles de usuarios con base semántica
 - a) Integración de información GIS heterogénea.
 - b) Adaptación de la visualización al rol del usuario.
 - c) Arquitectura semántica que permite abordar los dos puntos anteriores.
3. Desarrollo del sistema de Realidad Virtual para entrenamiento de bomberos
 - a) Sistemas de geovisualización.
 - b) Framework de migración a la Web.

Las siguientes publicaciones se enmarcan en el área de la tesis. Cada publicación adjunta referencias a las aportaciones anteriormente enumeradas. El *Curriculum Vitae* del candidato contiene el listado completo de sus publicaciones científicas.

9.2.1. Publicaciones Directamente Relacionadas con la Tesis

Se han publicado los siguientes artículos científicos relacionados directamente con la simulación de incendios forestales y urbanos:

- A. Moreno, Á. Segura, S. Zlatanova, J. Posada, and A. García-Alonso. **Benefit of the integration of semantic 3d models in a fire-fighting VR simulator.** In Journal: *Applied Geomatics*, 4(3), pp. 143-153, Springer, September 2012 [81] (contribución 2.c).

- A. Moreno, Á. Segura, S. Zlatanova, J. Posada, and A. García-alonso. **Introducing gis-based simulation tools to support rapid response in wildland fire fighting.** In *Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires III*, Wit Transactions on Ecology and the Environment, pp. 163-174. WIT Press, 2012 [95] (contribución 1 y 3.a).
- A. Moreno, Á. Segura, S. Zlatanova, J. Posada, and A. García-alonso. **Semantic enhancement of a virtual reality simulation system for fire fighting.** In *Proceedings of the Joint ISPRS Workshop on 3D City Modelling & Applications and the 6th 3D GeoInfo Conference*, 2011 [59] (contribuciones 1 y 2.c).
- A. Moreno, Á. Segura, A. Korchi, J. Posada, and O. Otaegui. **Interactive urban and forest fire simulation with extinguishment support.** In *Advances in 3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pp. 131-148. Springer Berlin Heidelberg, 2011 [58] (contribución 1 y 3.a).
- A. Korchi, A. Moreno, and Á. Segura. **Real time forest fire simulation with extinguishment support.** In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications* in collaboration with EuroGraphics. INSTICC Press 2010, ISBN 978-989-674-026-9, pp. 323-326, May 2010 [57] (contribución 1 y 3.a).
- T. Glander, A. Moreno, M. Aristizabal, J. Congote, J. Posada, and O. Ruiz. **ReWeb3D - Enabling Desktop 3D Applications to Run in the Web.** Submitted to *Computer and Graphics*, 2012, Elsevier (contribución 2.b y 3.b).
- J. Congote, A. Moreno, L. Kabongo, J. L. Pérez, R. San José, O. Ruiz. **Web Based Hybrid Volumetric Visualisation of Urban GIS data.** *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models (EDP Sciences)*, pp. 03001-p.1 – 03001-p.6 , 2012 (contribuciones 2.a y 3.a).
- A. Moreno, J. Congote, J. L. Pérez, R. San José, O. Ruiz. **Web based volume rendering of air quality 3d datasets at the city scale.** *3D Issues in Urban and Environmental Systems (Società Editrice Esculapio)*, pp. 95-102, 2012 (contribuciones 2.a y 3.a).

- M. Aristizabal, J. Congote, Á. Segura, A. Moreno, H. Arregui, O. Ruiz. **Hardware Accelerated Web Visualization of Vector Fields - Case Study in Oceanic Currents**. IVAPP-2012. International Conference on Computer Vision Theory and Applications, INSTICC Press 2012, pp. 759-763 (contribución 2.a y 3.a).
- M. Aristizabal, J. Congote, Á. Segura, A. Moreno, H. Arregui, O. Ruiz. **Visualization of Flow Fields in the Web Platform**. Journal of WSCG, Vol.20, No.3, pp. 189-196, ISSN 1213-6972, Union Agency, 2012 (contribución 2.a y 3.a).
- Á. Segura, A. Moreno, I. García, N. Aginako, M. Labayen, J. Posada, J. A. Aranda, and R. García De Andoin. **Visual Processing of Geographic and Environmental Information in the Basque Country: Two Basque Case Studies**. GeoSpatial Visual Analytics, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Raffaele De Amicis and Radovan Stojanovic and Giuseppe Conti, Springer Netherlands, pp. 199 – 208, 2009 (contribución 2.a y 3.a).

9.2.2. Publicaciones Complementarias

Estas publicaciones no hacen referencia a una contribución concreta pero pertenecen al área de investigación de la tesis.

- J. Congote, L. Kabongo, A. Moreno, Á. Segura, A. Beristain, J. Posada, and O. Ruiz. **Volume Ray Casting in WebGL**. Computer Graphics, Prof. Nobuhiko Mukai (Ed.), 2012, InTech.
- U. Elordi, Á. Segura, J. Goenetxea, A. Moreno, and J. Arambarri. **Virtual Reality Interfaces Applied to Web-Based 3D e-Commerce**. ESDA 2012, Nantes (France), Jul 2-4, 2012.
- A. Moreno, Á. Segura, H. Arregui, Á. Ruiz de Infante, and N. Canto. **Real Time 3D Simulation Tool for NC Sheet Metal Cutting and Punching Processes**. ISC 2012, Brno (Czech Republic), 2012.
- J. Congote, L. Kabongo, A. Moreno, Á. Segura, J Posada, and O. Ruiz. **Interactive visualization of volumetric data with WebGL in real-time**. Proceedings of the 16th International Conference on 3D Web Technology, 2011, pp. 137-146.

- J. Goenetxea, A. Moreno, L. Unzueta, A. Galdós, and Á. Segura. **Interactive and Stereoscopic Hybrid 3D Viewer of Radar Data with Gesture Recognition**. Hybrid Artificial Intelligence Systems, 5th International Conference (HAIS), San Sebastián, Spain, 2010. Proceedings, Part I, pp. 212-220. LNCS series by Springer ISBN 978-3-642-13768-6.
- A. Moreno, Á. Segura, and J. Posada. **Scenario editing tool to support learning and training in virtual reality simulators of construction machinery**. Proceedings of the 1st International eLBA Science Conference (edited by Fraunhofer Verlag), Rostock, Germany, 2009.
- E. Carrasco, G. Epelde, A. Moreno, A. Ortiz, I. García, C. Buiza, E. Urdaneta, A. Etxaniz, M. F. González, and A. Arruti. **Natural Interaction between Avatars and Persons with Alzheimer's Disease**. ICCHP 2008, 11th International Conference on Computers Helping People with Special Needs. LNCS series by Springer, pp. 38-45, University of Linz, Austria, 2008.
- Á. Segura, A. Moreno, G. Brunetti, and T. Henn. **Interaction and Ergonomics Issues in the Development of a Mixed Reality Construction Machinery Simulator for Safety Training**. Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers, International Conference EHAWC 2007, help as part of HCI International 2007. LNCS series by Springer, pp. 290-299, Beijing, China, 2007.
- A. Moreno, C. Toro, I. Arizkuren, Á. Segura, J. Posada, M. Novo, J. Falcón, and N. Alcaín. **A Geometric Representation for the Real-Time Simulation of NC Machining Processes**. Proceedings of the GRAPP International Joint Conference on Computer Vision Computer Graphics Theory and Applications in collaboration with EuroGraphics, pp. 357-363, Setúbal, Portugal, 2006.

9.3. Trabajo Futuro y Líneas de Investigación Abiertas

Según se consigan más avances tecnológicos, se irá consiguiendo más capacidad de computación. Estos avances permitirán disponer de dicha capacidad extra para la mejora de los algoritmos. En este caso, podemos tener tres posibles vías.

1. Reducir el paso de simulación e incluir las modificaciones necesarias a la formulación de los algoritmos. Así, se conseguiría una mejor aproximación de los resultados y con una frecuencia de actualización aún mayor.
2. Reducir el tamaño de celda, incrementando la resolución espacial.
3. Aumentar el tamaño de los escenarios. Los fuegos forestales de grandes dimensiones abarcan grandes territorios. También en entornos urbanos se pueden dar casos donde se necesite simular escenarios de mayor dimensión.

Por otro lado, la mejora o inclusión de nuevos aspectos en los algoritmos puede permitir simulaciones más realistas. Por ejemplo:

1. Añadir variables físicas no contempladas, como tiempo meteorológico, época del año, temperatura y humedad relativa.
2. Incorporar información más detallada de la información disponible. Tipología de edificios, de suelo, de agentes extintores. Añadir algoritmos heurísticos que hagan uso de esta información.
3. Considerar el estado local del viento, según varía por acción de los fenómenos meteorológicos, la geografía y la evolución térmica causada por el propio incendio.

A un nivel más tecnológico y de desarrollo de aplicaciones, los algoritmos estudiados en esta tesis se pueden implementar utilizando tecnologías emergentes. La utilización de los recursos de la GPU a través de tecnologías como OpenCL o CUDA permite tener un mayor rendimiento general de la simulación. Los algoritmos presentados en esta tesis son claramente paralelizables.

Otras vía de investigación va en sintonía con las necesidades del sistema de entrenamiento de los bomberos (relacionado con técnicas de Interacción Persona Computador), donde el balanceo del uso de los recursos disponibles es diferente. Para determinar una aproximación pseudo-óptima de los parámetros de la simulación, se deberán utilizar técnicas de optimización y un método de testeo y medición que permita converger a una parametrización del sistema que obtenga el mejor rendimiento posible.

Sin embargo, la línea más prometedora que esta tesis contempla es la utilización de los sistemas rápidos de simulación en los primeros instantes del proceso de toma de decisiones ante un incendio recién detectado. De hecho ya se está trabajando en esta línea de investigación [95]. Cuando se informa de un nuevo incendio es

tremendamente importante tener capacidad de reacción y obtener información de múltiples fuentes en tiempo real, con el fin de poder tomar las decisiones correctas en cuanto a los efectivos y tácticas a utilizar en campo.

Durante el desarrollo de esta tesis se ha constatado cómo los enfoques semánticos son fundamentales para facilitar estos objetivos. En esta línea muchos investigadores están aportando soluciones que tendrán que ser aprovechadas en la simulación de incendios.

Apéndice A

Glosario de Términos

En este anexo se hace un listado en inglés de los términos importantes utilizados en la lucha contra el fuego. Se comienza con una breve definición de los tipos de incendios existentes. A continuación, se definen diferentes términos extraídos de diferentes diccionarios, fuentes bibliográficas y recursos en Internet. Algunos de los términos pueden aparecer repetidos, pero se ha considerado importante añadirlos por ofrecer definiciones ligeramente distintas ante un mismo concepto.

A.1. Terminología Básica

The following is a set of the most utilized terminology in the fire fighting field.

- **Reference:** Encyclopedia Britannica¹, Dictionary and specialized fire sites.
- **FOREST FIRE** - Uncontrolled fire occurring in vegetation more than 6 feet (1.8 m) in height. These fires often reach the proportions of a major conflagration and are sometimes begun by combustion and heat from surface and ground fires. A big forest fire may crown, that is, spread rapidly through the topmost branches of the trees before involving undergrowth or the forest floor. As a result, violent blowups are common in forest fires, and they may assume the characteristics of a fire storm.
- **WILDLAND FIRE** - Fire in forests, grasslands, prairies, or other natural areas, not involving structure fires (although wildland fires may threaten

¹Encyclopedia Britannica: <http://www.britannica.com/>

structures or vice versa - see interface zone .) For a complete list of terms used in wildland fire, see Glossary of wildland fire terms.

- **OUTSIDE FIRE** - Urban fire not inside a building or vehicle, often found to be burning trash which could extend to nearby structures or vehicles if not dealt with properly. A suburban, interface , or rural outside fire could also be a wildland fire.
- **STRUCTURAL FIRE** - A fire in a residential or commercial building. Urban fire departments are primarily geared toward structural firefighting. The term is often used to distinguish them from wildland fire or other outside fire, and may also refer to the type of training and equipment such as "structure PPE" (personal protective equipment).
- **INTERFACE ZONE** - Wildland/structural interface or urban/wildland interface. The zone where wildfires threaten structures or structural fires threaten wildlands, such as in residential areas adjacent to forests. This requires both wildland firefighting and structural firefighting in the same location, which involve very different tactics and equipment.

A.2. Other Terms

The following is a glossary of the terms utilised in this thesis, linking the general terminology and the scientific view of the fire fighting procedures.

General terminology:

- **Wildland Fire:** A fire in open field, targeting different types of vegetation, including grass and proper tall trees. The classification of the different types of vegetation is done via the Initial Fuel Quantity and the Fuel Consuming Rate values.
- **Urban Fire:** A fire in a urban environment, normally cities. The main element in the urban fires is the building concept and its own fire fighting techniques.
- **Terrain:** Where the fire will be simulated. It can be defined in 3D, providing a height map. It is assumed that the terrain information will be static during all the fire spread simulation.

- **Slope:** The terrain slope, defined by the height map. Slope is one of the most important physical variables in the fire spread.
- **Wind:** The direction and speed of the wind in the Terrain. It can be a global wind for all the terrain or a vectorial field, defining different wind direction and speed at different spatial points. Also, the wind values can vary during in simulation time.
- **Building:** Structural fires will be supported by burning buildings. The number of floors, size and properties of the buildings are the key features in the urban fire spread algorithm.
- **Facade:** The facades of the building facing outwards, so internal facades will not be considered.

Fires Types:

- **Class A :** A fire involving combustibles such as wood, paper, and other natural materials.
- **Class B :** A fire involving hydrocarbons.
- **Class C :** An electrical fire.
- **Class D :** A fire involving metals.
- **Class E (Europe/Australia):** A composite Class A/Class B fire that is not also a Class C fire.
- **Class F (Europe/Australia):** See Class K.
- **Class K :** A fire involving cooking oils. Technically, this is a subclass of Class B.

Fire spread related terminology:

- **Fire Power:** Artificial way of measure “how much” fire is located at a given spatial point.
- **Fuel:** Artificial way of measure “how much” combustible elements are present at a given spatial point. Each fuel type is associated with its own Fire Consuming Rate.

- **Fuel Consuming Rate:** Artificial way of measure “how much” combustible is burnt in a unit time.
- **Fire spread:** The evolution in time of a fire following physical variables and conditions. It is divided in three types: contact effect and radiation effect.
- **Contact Effect:** The fire spread to adjacent zones.
- **Radiation Effect:** The fire spread to distant zones by radiation, allowing to bypass barriers like rivers and firewalls. In an urban fire, a fire can spread from a building to another building across a street due to the radiation effect.

Fire spread models related terminology:

- **Static Analytical model:** It uses a set of differential equations to model a behaviour.
- **Dynamic analytical model:** An analytical model in time, where the results of a step of the model are arguments for next step. In fire spread simulation, FarSite and BehavePlus solves dynamic analytical models in continuous space to calculate the fire spread and suppression.
- **Deterministic model:** Given the same input data, a deterministic model will result in the same output.
- **Stochastic model:** Given the same input data, a stochastic model will evolve differently since some randomness is applied to the calculations.
- **Discrete event simulation:** A given system receives events (characterized by their timestamp and spatial position) and the system internals are modified according to its model.
- **Event agent model:** A set of autonomous agents interact with the model, simultaneously.
- **Discrete event simulation over discrete cellular space:** Our approach.

Fire extinguishment process related terminology:

- **Fire Extinguishment:** The process to fight the fire by any means. The process involves fire fighters throwing extinguisher agents to active fire spots

in order to try to stop the fire spread and eventually, extinguish it. Also, fire extinguishment involves the final phase, when the fire is extinguished but hot enough to be restarted.

- **Water:** Any extinguishing agent. For simplification, all the products used for the suppression of fires are considered as water, with different characteristics.
- **Water Properties:** The extinguishing agents characteristics, defining their behaviour and capabilities to fight the fire. The Water Factor and the Evaporation Factor are the most important one.
- **Evaporation Effect:** Water can be thrown to non-firing zones in order to wet them, trying to stop the fire spread. As a consequence of the radiation effect, the wet zones will eventually get dry, by means of the Evaporation Effect. When the existing accumulation of extinguisher agent disappears, the fire is able to spread to that location. The evaporation effect depends on the Evaporation Power Factor properties of the extinguisher agent.
- **Water Power Factor:** A property of the extinguishing agents a.k.a. water. It defines a relative factor of the power of a given extinguishing agent over the water. For example, water with additives will have a Water Power Factor greater than the water factor.
- **Evaporation Power Factor:** A property of the extinguishing agents a.k.a. water. It defines how many water is evaporated in a unit time as a factor relative to the water. For example, foam will have a Evaporation Power Factor smaller than the water factor.
- **WaterJet:** in urban fires

Other Bunch of definitions

References selected from *reference.com* website ²³⁴⁵:

- **Forest fire:** Uncontrolled fire occurring in vegetation more than 6 feet (1.8 m) in height. These fires often reach the proportions of a major conflagration

²<http://www.reference.com/browse/wildland+fire>

³http://www.reference.com/browse/wiki/Glossary_of_firefighting

⁴http://www.reference.com/browse/wiki/Glossary_of_firefighting_equipment

⁵<http://www.reference.com/browse/wiki/Firefighter>

and are sometimes begun by combustion and heat from surface and ground fires. A big forest fire may crown, that is, spread rapidly through the topmost branches of the trees before involving undergrowth or the forest floor. As a result, violent blowups are common in forest fires, and they may assume the characteristics of a fire storm. See wildland fire.

- **Firestorm:** A firestorm is a conflagration which attains such intensity that it creates and sustains its own wind system.
- **Conflagration:** A large, typically urban, fire involving numerous structures; loosely defined as enveloping an area equivalent to one or more square blocks.
- **Wildland fire:** Fire in forests, grasslands, prairies, or other natural areas, not involving structure fires (although wildland fires may threaten structures or vice versa - see interface zone .) For a complete list of terms used in wildland fire, see Glossary of wildland fire terms.
- **Outside fire:** Urban fire not inside a building or vehicle, often found to be burning trash which could extend to nearby structures or vehicles if not dealt with properly. A suburban, interface , or rural outside fire could also be a wildland fire.
- **Structure fire (or "structural fire"):** A fire in a residential or commercial building. Urban fire departments are primarily geared toward structural firefighting. The term is often used to distinguish them from wildland fire or other outside fire , and may also refer to the type of training and equipment such as "structure PPE" (personal protective equipment).
- **Firefighters:** Firefighters are rescuers extensively trained primarily to put out hazardous fires that threaten civilian populations and property to rescue people from car accidents, collapsed and burning buildings and other such situations. The increasing complexity of modern industrialized life with an increase in the scale of hazards has stimulated both advances in firefighting technology and a broadening of the firefighter-rescuer's remit. They sometimes provide emergency medical services. The fire service , or fire and rescue service also known in some countries as the fire brigade or fire department , are some of the emergency services. Firefighting and firefighters have beco-

me ubiquitous around the world, from wildland areas to urban areas, and on board ships.

- **Ranks:** Firefighter, Leading Firefighter, Sub Officer, Station Officer, Divisional Officer, Chief Fire Officer
- **Company :** two or more firefighters organized as a team, led by a fire officer, and equipped to perform certain operational functions. Compare with platoon and unit. Company officer - A fire officer, typically a lieutenant or captain, who leads a team of two or more firefighters in a company.
- **Fire control (or fire fighting)** consists of depriving a fire of fuel (Reducing Agent), oxygen (Oxidizing Agent), heat and/or the chemical chain reaction that are necessary to sustain itself or re-kindle (also known as the four components of The Fire Tetrahedron). Firefighters are equipped with a wide variety of equipment to accomplish this task. Some of their tools include ladder trucks, pumper trucks, tanker trucks, fire hose, and fire extinguishers. Very frequent training and refresher training is required.
- **Structure fires** may be attacked, generally, either by "interior" or "exterior" resources, or both. Interior crews, using the "two-in, two out" rule, may advance hose lines inside the building, find the fire and cool it with water. Exterior crews may direct water into windows or other openings, or against other nearby fuels exposed to the initial fire. A proper command structure will plan and coordinate the various teams and equipment to safely execute each tactic.
- **Apparatus:** A term usually used by firefighters describing a piece of equipment, usually a company vehicle.
- **Autoextended fire :** structure fire that has gone out a window or other opening on one floor and ignited materials above, on another floor or other space (attic, cockloft).
- **Available flow :** total amount of water that can be put on a fire, depending upon water supply, pump size, hoses, and distance to the fire. IC must assess available flow to determine whether additional apparatus or streams are required. See Fire flow requirement.

- **Backfiring:** A tactic used in wildland firefighting associated with indirect attack, by intentionally setting fire to fuels inside the control line. Most often used to contain a rapidly spreading fire, placing control lines at places where the fire can be fought on the firefighter's terms.
- **Career Firefighter:** (U.S.) A person whose primary employment is as a firefighter for a municipality or other agency or company and who derives the majority of his earned income working in the fire service. See also *Wholetime firefighter*
- **Charge a hose:** To make water pressure available on a hose in final preparation for its use. This is done on the scene after the hose is deployed.
- **Charged hose:** A hose that is filled with water and pressurized; ready to use. This is done after the hose is deployed. *Cockloft* : structural space above ceiling and below rafters, often connecting adjacent occupancies and permitting fire to spread laterally, often unseen.
- **Collapse zone:** The area around a structure that would contain debris if the building were to collapse.
- **Compartment Fire:** An "Isolated" fire, or a fire which is "boxed in" or "closed off" from the rest of the structure. An example of this is a fire in a room where all the windows and doors are closed preventing the fire from spreading to other rooms.
- **Crash Tender:** a pump capable of spraying foam used at airports.
- **Crew Resource Management (CRM):** Training developed by NASA based on the concept that the primary cause of the majority of aviation accidents is human error and problems with interpersonal communication in particular. The training has been adapted for the fire service and teaches firefighters the correct way to question orders on an emergency scene. It also helps supervisors understand that the questioning of an order should not be interpreted as a threat to their authority.
- **Direct attack:** "Putting the wet stuff on the red stuff." A form of fire attack in which hoses are advanced to the fire inside a structure and hose streams directed at the burning materials.

- **Discharge flow:** The amount of water flowing from a fire hydrant when it is opened; compare to static flow and residual flow.
- **Dispatch:** Refers to person or place designated for handling a call for help by alerting the specific resources necessary.
- **Engine:** A fire suppression vehicle that has a water pump and, typically, is designed to carry firehose and a limited supply of water. Engine Company : A group of firefighters assigned to an apparatus with a water pump and equipped with firehose and other tools related to fire extinguishment. Engine house: [archaic] A " firehouse housing an engine company. Engine pressure: The pressure in a fire hose measured at the outlet of the pump.
- **Exposure:** Property near fire that may become involved by transfer of heat or burning material from main fire, typically by convection or radiation. May range from 40 feet to several miles, depending on size and type of fire or explosion.
- **Exterior attack:** A method of extinguishing a fire which does not involve entering the structure. Often used when so much of the building is involved in fire that there is little or no benefit to risking firefighter safety by inserting them into the structure. May be a temporary measure when there are not sufficient personnel on scene to form an entry team and a rescue team (to rescue the entry team). Also known as Surround and drown.
- **FDC (Fire Department Connection):** Location in which pumping apparatus hooks to a buildings standpipe and or sprinkler system. Usually a 3" female connection
- **Fire Break:** Especially in hilly or mountainous areas, roads or paths cut through brush with a tractor, bulldozer or other construction equipment. The purpose of these is to have an area with no brush, and thus, no fuel, so that a fire will hopefully burn out rather than jumping to another area with brush. Also to ensure vehicular access to brush areas
- **Fire code (Fire safety code):** regulations for fire prevention and safety involving flammables, explosives and other dangerous operations and occupancies.

- **Fire flow:** The amount of water being pumped onto a fire, or required to extinguish a hypothetical fire. A critical calculation in light of the axiom that an ordinary fire will not be extinguished unless there is sufficient water to remove the heat of the fire.
- **Fireground:** The operational area at the scene of a fire; area in which incident commander is in control.
- **Fire hazard:** Materials, structures or processes that may result in creating a fire, permitting a fire to grow undetected, or preventing people from escaping a fire.
- **Fire hydraulics:** The study of pumps, hoses, pipes, accessories and tools for moving water or other extinguishing agents from a water supply to a fire.
- **Fire inspector:** A person responsible for issuing permits and enforcing the fire code, including any necessary premises inspection, as before allowing (or during) a large indoor gathering.
- **Fire line:** A boundary of a fire scene established for public safety and to identify the area in which firefighters may be working.
- **Fire load (Btu/sq ft):** An estimate of the amount of heat that will be given off during ordinary combustion of all the fuel in a given space; e.g., a bedroom or a lumberyard.
- **Fire point:** temperature at which materials give off flammable gases that will sustain fire, typically higher than flash point. Temperature at flashover.
- **Fire Police:** Special constables attached to a fire department, tasked with ensuring the safety and security of emergency scenes as well as general assistance to the fire department and other agencies.
- **Fire-resistant:** Materials designed or treated to have an increased fire point.
- **Fire tetrahedron:** The fire tetrahedron is based on the components of igniting or extinguishing a fire. Each component represents a property necessary to sustain fire: fuel, oxygen, heat, and chemical chain reaction. Extinguishment is based upon removing or hindering any one of these properties. Fire Triangle: fuel-oxygen-heat.

- **Fire wall:** Building structure designed to delay horizontal spread of a fire from one area of a building to another; often regulated by fire code and required to have self-closing doors, and fireproof construction.
- **Fire warden, Fire watch:** Fixed or mobile patrols that watch for signs of fire or fire hazards so that any necessary alarm can be quickly raised or preventive steps taken.
- **Flameover:** Also known as rollover. The ignition of heated fire gasses at the ceiling level only. While dangerous to firefighters, this is not as deadly as Flashover
- **Flash point:** Lowest temperature at which a material will emit vapor combustible in air mixture. Higher than Flame point of same material.
- **Flashover:** simultaneous ignition of combustible materials in a closed space, as when materials simultaneously reach their fire point ; may also result in rollover .
- **Foam:** Extinguishing agent formed by mixing foam concentrate with water and aerating the solution for expansion. Foam Concentrate - Raw foam liquid as it rests in it storage container before the introduction of water and air.
- **Forward lay:** Procedure of stringing water supply hose from a water source toward a fire scene; compare with reverse lay Reverse lay: The process of stringing hose from a fire toward a source of water, e.g., a fire hydrant.
- **Frontage:** The size of a building facing a street
- **GPM :** Gallons Per Minute or how many gallons are being pumped out of a piece of equipment every minute GPM method ("gallons per minute"): Calculation of how much water, in GPM, will be necessary to extinguish a given volume of fire, under the circumstances (e.g., fuel class, containment, exposures, etc.)
- **High-pressure system:** A supplemental pump system used to pressurize the water supply, sometimes used during a large fire, or whenever more than one hydrant is being used.

- **High-rise building:** Any building taller than three or four stories, depending upon local usage, requiring firefighters to climb stairs or aerial ladders for access to upper floors.
- **Incident Commander:** The officer in charge of all activities at an incident. See Incident Command System. **Incident Safety Officer:** The officer in charge of scene safety at an incident. See Incident Command System.
- **Indirect attack:** Method of firefighting in which water is pumped onto materials above or near the fire so that the splash rains onto the fire, often used where a structure is unsafe to enter.
- **Initial attack:** First point of attack on a fire where hose lines or fuel separation are used to prevent further extension of the fire.
- **Interface zone** (also wildland/structural interface or urban/wildland interface): The zone where wildfires threaten structures or structural fires threaten wildlands, such as in residential areas adjacent to forests. This requires both wildland firefighting and structural firefighting in the same location, which involve very different tactics and equipment.
- **Interior attack** : Inserting a team of firefighters into the burning structure, in an attempt to extinguish a blaze from inside the structure, minimizing property damage from fire, smoke, and water. Requires a minimum of four fully-equipped firefighters: an entry team of at least two to enter the structure and fight the fire, and two standing by to rescue or relieve the entry team (see two in, two out). If the entry team(s) cannot extinguish the blaze, may become an Exterior Attack .
- **Ladder company:** A group of fire fighters, officers and engineers that staff a ladder truck.
- **Master stream:** A large nozzle, either portable or fixed to a pumper, capable of throwing large amounts of water relatively long distances.
- **Occupant use hose:** Light-weight firehose coupled to standpipe for emergency use by building occupants prior to arrival of firefighters. Often accessible by breaking glass to unlock secure enclosure.

- **Offensive attack:** Method of firefighting in which water or other extinguisher is taken directly to the seat of the fire, as opposed to being pumped in that general direction from a safe distance.
- **Overhauling:** Late stage in fire-suppression process during which the burned area is carefully examined for remaining sources of heat that may rekindle the fire. Often coincides with salvage operations to prevent further loss to structure or its contents, as well as fire-cause determination and preservation of evidence.
- **Penciling:** The penciling technique is created by adjusting the nozzle to a straight stream pattern and using series of short bursts of water directed at burning materials. This helps reduce the production of flammable gases by cooling the burning walls and ceiling below their ignition point.
- **Platoon:** a subdivision of a fire company, led a fire officer of either the rank of captain or lieutenant, such that one of several platoons is assigned to duty for a specified period. Also called a "watch". In many areas the word "platoon" is used to describe the different shifts in the fire department. For example, A, B or C Platoon.
- **Pre-arrival instructions:** Directions given by a dispatcher to a caller until emergency units can arrive. **Pre-fire, pre-incident planning:** Information collected by fire prevention officers to assist in identifying hazards and the equipment, supplies, personnel, skills, and procedures needed to deal with a potential incident. **Pre-planning:** Fire protection strategy involving visits to potentially hazardous occupancies for inspection, follow up analysis and recommendations for actions to be taken in case of specific incidents. Not to be confused with post-planning .
- **Pumper:** A fire truck with a water tank. **Pump operator, technician:** (also a chauffeur): person responsible for operating the pumps on a pumper and typically for driving the pumper to an incident. **Pump Escape:** Appliance carrying a wheeled ladder **Pumper company:** Squad or company that mans a fire engine (pumper) and carries out duties involving getting water to the fire.
- **Radiant extension:** fire that has transferred ignition heat to adjacent materials across open space. One reason some city fire codes prohibit windows

facing each other in adjacent warehouses.

- **Reflash , re-kindle:** A situation in which a fire, thought to be extinguished, resumes burning. **Reflash Watch :** A person assigned to observe and monitor an extinguished fire, to ensure that it does not reflash or re-kindle.
- **Fire sprinkler system:** the entire system of pipes and sprinklers intended for fire suppression within buildings
- **Sector:** A physical or operational division of an incident; an area supervised as a branch in the Incident Command System. A typical system for structure fires names the "front" of the building "sector A", and continues clockwise around the building (B, C, D), with interior sectors denoted by the floor number (1, 2, 3, etc.). A "rehab" sector is one example of an operational division at an incident, where personnel are assigned after strenuous work in another sector.
- **Sides A, B, C, and D:** Terms used by firefighters labeling the multiple sides of a building starting with side A or Alpha being the front of the structure and working its way around the outside of the structure in a clockwise direction. This labels the front side A or Alpha, the left side B or Bravo, the rear side C or Charlie, and the right side D or Delta.
- **Standard operating procedure, guideline (SOP or SOG):** Rules for the operation of a fire department, such as how to respond to various types of emergencies, training requirements, use of protective equipment, radio procedures; often include local interpretations of regulations and standards. In general, "procedures" are specific, whereas "guidelines" are less detailed.
- **Strike Team:** a grouping of similar fire apparatus with a focused goal in a large fire situation, often commanded by a chief officer. The term is commonly used for structure protection teams during wildland fire operations.
- **Tanker :** An aircraft equipped to carry water or fire retardant for use in wildland fire suppression. Archaic: see "Tender", below. **Tender (also "Water Tender"):** A wheeled fire apparatus equipped to carry large volumes of water to a fire. Often used in areas without an adequate or universal water supply system, such as rural areas without hydrants. Tenders may have pumps and associated hardware to facilitate their mission. Some departments refer to these apparatus as "Tankers."

- **Truck company:** a group of firefighters assigned to an apparatus that carries ladders, forcible entry tools, possibly extrication tools and salvage covers, and who are otherwise equipped to perform rescue, ventilation, overhaul and other specific functions at fires; also called "ladder company".
- **Two-in, two-out** (or "two in/two out"): Refers to the standard safety tactic of having one team of two firefighters enter a hazardous zone (IDLH), while at least two others stand by outside in case the first two need rescue — thus requiring a minimum of four firefighters on scene prior to starting interior attack. Also refers to the "buddy system" in which firefighters never enter or leave a burning structure alone.
- **Type I, II, III, IV, V Building:** U.S. classification system for fire resistance of building construction types, including definitions for "resistive". Type I, "non-combustible". Type II, "ordinary". Type III, heavy timber. Type IV, and "frame construction". Type V (i.e., made entirely of wood).
- **Under Control:** Fire or spill etc. is no longer spreading. The situation is contained. This term should not be confused with a report that the fire is out.
- **VOIDS (building):** Enclosed portions of a building where fire can spread undetected.

Apéndice B

Tipología de los Datos de Entrada

B.1. Uso del Suelo

En los escenarios utilizados en esta tesis se ha utilizado parte de la clasificación del uso del suelo que define la base de datos CORINE. En concreto, cuando se utiliza *hierba*, se está utilizando el tipo 3.2.1 (*Natural grassland*). La zona forestal correspondería con el tipo 3.1.3 (*Mixed Forest*) y las zonas urbanas con edificios a los tipos 1.1.1 (*Continuous urban fabric*) y 1.1.2 (*Discontinuous urban fabric*) según la tabla B.1.

Por lo tanto, para simplificar la clasificación, nuestro concepto de *hierba* o *shrub*, corresponde con los tipos que se engloban bajo el tipo 3.2 y nuestro concepto bosque, engloba al tipo 3.1.

El resto de tipos no se trata en esta tesis y se presuponen incombustibles (barreras, ríos, aguas, carreteras...).

Los datos que provee el Gobierno Vasco a través del programa OpenData siguen esta misma clasificación, aunque la representación física (tipos, identificadores y organización) puede diferir de otras zonas de Europa. Sin embargo, la utilización de identificadores claramente distinguibles permite una automatización e integración semántica casi directa (ver figura B.1). Según la documentación, los datos corresponden al año 2006:

“La generación de la base de datos CLC 2006 se ha realizado por la integración de la base de cambios CHA (2000-2006) en la base de datos CLC 2000. El proyecto CORINE Land Cover (CLC), tiene como objetivo fundamental la captura de datos

Level 1	Level 2 & 3
1 Artificial Surfaces	1.1 Urban Fabric
	1.1.1 Continuous urban fabric
	1.1.2 Discontinuous urban fabric
	1.2 Industrial, Commercial and transport units
	1.3 Mine, dump and construction sites
	1.4 Artificial non-agricultural vegetated areas
3 Forest and semi-natural areas	3.1 Forest
	3.1.1 Broad-leaved forest
	3.1.2 Coniferous forest
	3.1.3 Mixed forest
	3.2 Shrub and/or herbaceous vegetation association
	3.2.1 Natural grassland
	3.2.2 Moors and heathland
	3.2.3 Sclerophyllous vegetation
3.2.4 Transitional woodland shrub	

Tabla B.1: Extracto de los tipos de suelo definidos por la base de datos CORINE.

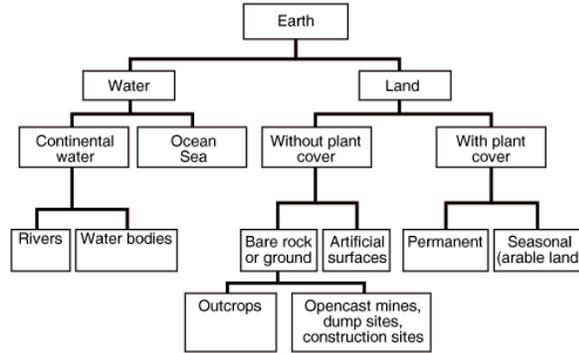
de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la Cobertura y/o Uso del Territorio (Ocupación del suelo).’’

B.2. Tipos de Combustible

Los tipos de vegetación contemplados (*hierba o shrub, arbustos y árboles*) se asocian a los tipos *Short Grass, Chaparral* o *Brush y Timber* que define Rothermel [9]. A su vez, el departamento de agricultura de los Estados Unidos de América ha definido una clasificación más detallada e incluye más precisión en el comportamiento y caracterización de los mismos [96]. En la tabla B.2 se puede ver el mapeo entre ambas definiciones, estando en negrita los tipos se utilizan en esta tesis. En la figura B.2 se pueden ver dichos parámetros.

B.3. Tipos de Agentes Extintores y Factores Respecto al Agua

Los tipos de agentes extintores que se han utilizado en esta tesis se muestran en la tabla B.3. Los factores indicados hacen referencia al comportamiento básico asociado al Agua, que posee un factor unitario. El resto de factores se han estimado en función de las características presentadas por los agentes extintores en entornos similares a los tratados en esta tesis: incendios de tipo A. En la figura B.3 se puede ver una clasificación de los tipos de espuma [56].



50	11.32592819	NULL	2389.85420691	242	ES-52169	Mosaico de cultivos	113259.281857	2389.85420691
51	11.40617052	NULL	2012.36942196	324	ES-149158	Matorral boscoso de transición	114061.705188	2012.36942196
52	11.81769023	NULL	1909.83230733	324	ES-149416	Matorral boscoso de transición	118176.902316	1909.83230733
53	11.82396318	NULL	1476.70999566	311	ES-82547	Bosques de frondosas	118239.63183	1476.70999566
54	12.25185101	NULL	2258.28664608	312	ES-83813	Bosques de coníferas	122518.510104	2258.28664608
55	12.59812152	NULL	1676.75784376	111	ES-2655	Tejido urbano continuo	125981.215205	1676.75784376
56	12.64485749	NULL	1930.68813253	242	ES-52142	Mosaico de cultivos	126448.574917	1930.68813253
57	12.81980024	NULL	2821.3954526	242	ES-50068	Mosaico de cultivos	128198.002428	2821.3954526
58	13.66669985	NULL	2199.52478323	311	ES-82246	Bosques de frondosas	136666.998508	2199.52478323
59	13.70988578	NULL	1658.42692208	324	ES-147020	Matorral boscoso de transición	137098.857771	1658.42692208
60	14.08084554	NULL	2193.86047828	312	ES-91793	Bosques de coníferas	140808.455358	2193.86047828
61	14.29928948	NULL	1571.06634943	331	ES-150430	Playas, dunas y arenales	142992.894827	1571.06634943
62	14.76989331	NULL	2105.0287978	324	ES-147406	Matorral boscoso de transición	147698.933105	2105.0287978
63	14.89907729	NULL	1520.55383869	323	ES-127288	Matorrales esclerófilos	148990.772868	1520.55383869
64	14.96966582	NULL	2719.75389097	311	ES-80722	Bosques de frondosas	149696.658154	2719.75389097
65	16.12355867	NULL	2033.05914952	311	ES-81086	Bosques de frondosas	161235.58671	2033.05914952
66	16.43254699	NULL	2188.67064304	242	ES-51495	Mosaico de cultivos	164325.46986	2188.67064304

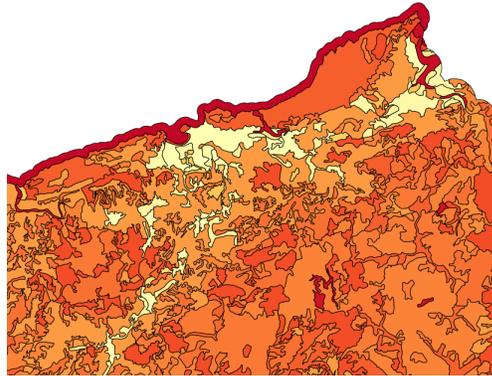


Figura B.1: Arriba: Clasificación jerárquica del uso del suelo según CORINE. Abajo: Identificadores utilizados en los datos del Gobierno Vasco y un ejemplo de visualización del uso del suelo.

Rothermel Fuel Model	Description	Fuel Model Codes
1	Short Grass	GR1, GR2, GR4, GR7
2	Timber Grass and Understory	GR2, GR4, GR7, GS1, GS2
3	Tall Grass	GR3, GR5, GR6, GR7, GR8, GR9
4	Chaparral	SH5, SH7
5	Brush	SH1, SH2, SH5, SH7, TU5, GS2
6	Dormant Brush	SH1, SH2, SH4, SH6
7	Southern Rough	SH3, SH4, SH6, SH8, SH9
8	Compact Timber Litter	TL1, TL3, TL4, TL5, TL7, TU1
9	Hardwood Litter	TL2, TL6, TL8, TL9
10	Timber (Understory)	TU1, TU2, TU3, TU4, TU5, SH2
11	Light Logging Slash	TL5, SB1, SB2
12	Medium Logging Slash	SB1, SB2, SB3
13	Heavy Logging Slash	SB2, SB3, SB4

Tabla B.2: Mapeo de los tipos de combustible de Rothermel a los definidos en [96]. Los tipos utilizados en la tesis están resaltados en negrita.

Agentes Extintores	Factor
Agua	1.0
Anhídrido carbónico	2.0 - 5.0
Polvo	3.0 - 10.0
Espumas	5.0 - 20.0

Tabla B.3: Varios tipos de agentes extintores y el factor asignado respecto al comportamiento del Agua.

Table 7—Fuel model parameters.

Fuel model code	Fuel load (t/ac)					Fuel model type ^a	SAV ratio (1/ft) ^b			Fuel bed depth (ft)	Dead fuel extinction moisture (percent)	Heat content BTU/lb ^c
	1-hr	10-hr	100-hr	Live herb	Live woody		Dead 1-hr	Live herb	Live woody			
GR1	0.10	0.00	0.00	0.30	0.00	dynamic	2200	2000	9999	0.4	15	8000
GR2	0.10	0.00	0.00	1.00	0.00	dynamic	2000	1800	9999	1.0	15	8000
GR3	0.10	0.40	0.00	1.50	0.00	dynamic	1500	1300	9999	2.0	30	8000
GR4	0.25	0.00	0.00	1.90	0.00	dynamic	2000	1800	9999	2.0	15	8000
GR5	0.40	0.00	0.00	2.50	0.00	dynamic	1800	1600	9999	1.5	40	8000
GR6	0.10	0.00	0.00	3.40	0.00	dynamic	2200	2000	9999	1.5	40	9000
GR7	1.00	0.00	0.00	5.40	0.00	dynamic	2000	1800	9999	3.0	15	8000
GR8	0.50	1.00	0.00	7.30	0.00	dynamic	1500	1300	9999	4.0	30	8000
GR9	1.00	1.00	0.00	9.00	0.00	dynamic	1800	1600	9999	5.0	40	8000
GS1	0.20	0.00	0.00	0.50	0.65	dynamic	2000	1800	1800	0.9	15	8000
GS2	0.50	0.50	0.00	0.60	1.00	dynamic	2000	1800	1800	1.5	15	8000
GS3	0.30	0.25	0.00	1.45	1.25	dynamic	1800	1600	1600	1.8	40	8000
GS4	1.90	0.30	0.10	3.40	7.10	dynamic	1800	1600	1600	2.1	40	8000
SH1	0.25	0.25	0.00	0.15	1.30	dynamic	2000	1800	1600	1.0	15	8000
SH2	1.35	2.40	0.75	0.00	3.85	N/A	2000	9999	1600	1.0	15	8000
SH3	0.45	3.00	0.00	0.00	6.20	N/A	1600	9999	1400	2.4	40	8000
SH4	0.85	1.15	0.20	0.00	2.55	N/A	2000	1800	1600	3.0	30	8000
SH5	3.60	2.10	0.00	0.00	2.90	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH6	2.90	1.45	0.00	0.00	1.40	N/A	750	9999	1600	2.0	30	8000
SH7	3.50	5.30	2.20	0.00	3.40	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH8	2.05	3.40	0.85	0.00	4.35	N/A	750	9999	1600	3.0	40	8000
SH9	4.50	2.45	0.00	1.55	7.00	dynamic	750	1800	1500	4.4	40	8000
TU1	0.20	0.90	1.50	0.20	0.90	dynamic	2000	1800	1600	0.6	20	8000
TU2	0.95	1.80	1.25	0.00	0.20	N/A	2000	9999	1600	1.0	30	8000
TU3	1.10	0.15	0.25	0.65	1.10	dynamic	1800	1600	1400	1.3	30	8000
TU4	4.50	0.00	0.00	0.00	2.00	N/A	2300	9999	2000	0.5	12	8000
TU5	4.00	4.00	3.00	0.00	3.00	N/A	1500	9999	750	1.0	25	8000
TL1	1.00	2.20	3.60	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	30	8000
TL2	1.40	2.30	2.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	25	8000
TL3	0.50	2.20	2.80	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	20	8000
TL4	0.50	1.50	4.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL5	1.15	2.50	4.40	0.00	0.00	N/A	2000	9999	1600	0.6	25	8000
TL6	2.40	1.20	1.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	25	8000
TL7	0.30	1.40	8.10	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL8	5.80	1.40	1.10	0.00	0.00	N/A	1800	9999	9999	0.3	35	8000
TL9	6.65	3.30	4.15	0.00	0.00	N/A	1800	9999	1600	0.6	35	8000
SB1	1.50	3.00	11.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB2	4.50	4.25	4.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB3	5.50	2.75	3.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.2	25	8000
SB4	5.25	3.50	5.25	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	2.7	25	8000

^a Fuel model type does not apply to fuel models without live herbaceous load.
^b The value 9999 was assigned in cases where there is no load in a particular fuel class or category.
^c The same heat content value was applied to both live and dead fuel categories.

Figura B.2: Parámetros de los distintos tipos de combustible definidos en [96].

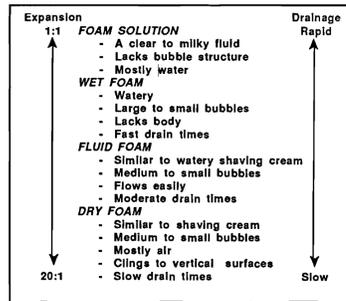


Figura B.3: Varios tipos de agentes extintores.

Apéndice C

Especificaciones XML de los Datos de Entrada

En esta tesis se han utilizado dos formatos XML para representar los escenarios. Cada uno de ellos se explica someramente en este anexo.

C.1. XML de Alto Nivel

La representación de los escenarios se realiza mapeando en la definición los elementos de alto nivel del sistema. Así pues, podemos encontrar que el terreno se define por un fichero externo, listo para ser cargado por el simulador. En nuestro caso, al utilizar OpenSceneGraph como librería de gráficos, referenciamos un modelo de todo País Vasco almacenado en formato OSGB (*binary OSG fileformat*).

Sobre este terreno se define la clasificación del suelo definiendo el perímetro a través de una serie de vértices. De una manera similar, las barreras naturales o artificiales, se definen como una serie de vértices.

Los edificios se definen como si fueran zonas, a través de su perímetro. Pero se añade información adicional que es necesaria para la simulación (número de pisos, tipo de construcción...).

Finalmente, se define el viento del escenario a través de dos campos de la definición: dirección y velocidad.

C.1.1. Elevación del Terreno

Al iniciar la simulación, es necesario que las celdas conozcan la altura. Este proceso se realiza muestreando el terreno en todas y cada una de las posiciones correspondientes al centro de las celdas del escenario.

Este proceso es costoso realizarlo continuamente para un mismo escenario, por lo que estos valores de altura se precálculan. El fichero de alturas resultante se referencia en el fichero XML a través de un tag opcional: *heights*. Si no existe esta referencia, el simulador hará el muestreo antes de arrancar la simulación.

C.1.2. Definición de la Escena

El escenario está compuesto por 3 tipos elementos: zonas de vegetación, barreras y edificios (ver algoritmo C.1).

Las zonas de vegetación (tag *zones*) define la composición del terreno o *land use*. Las barreras (tag *barriers*) se definen individualmente a través de su tipo y los vértices que las componen. Finalmente, los edificios (tag *buildings*) se definen de manera similar a las zonas de vegetación, pero añadiendo la información adicional necesaria para definir correctamente los edificios (por ejemplo, el número de pisos).

C.2. XML de Bajo Nivel

El segundo formato XML utilizado en esta tesis (ver algoritmo C.2) corresponde con una representación del escenario de bajo nivel. El fichero resultante define todas y cada una de las celdas. Por lo tanto, es un tipo de fichero que no se espera que haya que escribirlo a mano, sino que básicamente se trata de un formato de salida del propio simulador. En cualquier instante de la simulación, se puede exportar el estado de las celdas a esta representación XML.

Algoritmo C.1 XML de alto nivel definiendo un ejemplo sencillo compuesto por una zona de vegetación, una barrera y un edificio.

```

1: <?xml version=1.0 encoding="UTF-8" standalone="no" ?>
2:   <TerrainData>
3:     <filename> terrain.file </filename>
4:     <windDir> 1.0, 1.0, 0.0 </windDir>
5:     <windF> 10.0 </windF>
6:     <zones>
7:       <zone_1>
8:         <type> 2 </type>
9:         <fuel> 1.0 </fuel>
10:        <vertex> 593457.00, 4799707.00, 0.00 </vertex>
11:        <vertex> 595257.00, 4799707.00, 0.00 </vertex>
12:        <vertex> 595257.00, 4801507.00, 0.00 </vertex>
13:        <vertex> 593457.00 ,4801507.00, 0.00 </vertex>
14:      </zone_1>
15:    </zones>
16:    <barriers>
17:      <barrier_1>
18:        <type>1</type>
19:        <vertex> 594157.00, 4800507.00, 0.00 </vertex>
20:        <vertex> 594257.00, 4800607.00, 0.00 </vertex>
21:        <vertex> 594257.00, 4800707.00, 0.00 </vertex>
22:        <vertex> 594457.00, 4800707.00, 0.00 </vertex>
23:      </barrier_1>
24:    </barriers>
25:    <buildings>
26:      <building_1>
27:        <type>1</type>
28:        <buildingNumber> 88 </buildingNumber>
29:        <fuel> 2.5 </fuel>
30:        <windowSize> 1.2 </windowSize>
31:        <numberFloors> 6 </numberFloors>
32:        <floorHeight> 3.0 </floorHeight>
33:        <vertex> 594417.00, 4800717.00, 0.00 </vertex>
34:        <vertex> 594417.00, 4800727.00, 0.00 </vertex>
35:        <vertex> 594427.00, 4800727.00, 0.00 </vertex>
36:        <vertex> 594427.00 ,4800717.00, 0.00 </vertex>
37:      </building_1>
38:    </buildings>
39:  </TerrainData>
40: </xml>

```

Algoritmo C.2 XML de bajo nivel que define celda por celda su composición.

```

1: <?xml version=1.0 encoding="UTF-8" ?>
2:   <FIELD type="export" date="2012-08-14T17:37:22">
3:     <BUILDING>
4:       <GENERAL>
5:         <type> BUILDING </type>
6:         <height> 0.025 </height>
7:         <name> A </name>
8:         <Xposition> 24 </Xposition>
9:         <Yposition> 6 </Yposition>
10:      </GENERAL>
11:      <SPECIFIQUEBUILDING>
12:        <numBuilding> 0 </numBuilding>
13:        <nFloor> 3 </nFloor>
14:      </SPECIFIQUEBUILDING>
15:      <FLOORS>
16:        <FLOOR>
17:          <numFloor> 0 </numFloor>
18:          <type> WoodenUnit </type>
19:          <firstStory> false </firstStory>
20:          <>windowSize> 1 </windowSize>
21:        </FLOOR>
22:        ...
23:      </FLOORS>
24:    </BUILDING>
25:    ...
26:    <OUTSIDE>
27:      <GENERAL>
28:        <type> SHRUB </type>
29:        <height> 0.376 </height>
30:        <name> WaterLoo </name>
31:        <Xposition> 25 </Xposition>
32:        <Yposition> 45 </Yposition>
33:      </GENERAL>
34:      <SPECIFIQUEOUTSIDE>
35:        <firstStory> false </firstStory>
36:        <food> 200 </food>
37:        <puissance> 0 </puissance>
38:      </SPECIFIQUEOUTSIDE>
39:    </OUTSIDE>
40:    ...
41:  </FIELD>
42: </xml>

```

Bibliografía

- [1] “AutoSim Driving Simulators,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.autosim.no/>
- [2] “Ship maneuvering simulator centre,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.smsc.no/courses/>
- [3] “Virage simulation - scenario design services,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.viragesimulation.com>
- [4] Álvaro Segura, A. Moreno, G. Brunetti, and T. Henn, “Interaction and ergonomics issues in the development of a mixed reality construction machinery simulator for safety training,” in *HCI International 2007*, ser. LNCS, vol. 4566. Beijing, China: Springer Verlag, July 2007, pp. 290–299.
- [5] “Global action plan. Eco driving simulator .” December 2012. [Online]. Available: <http://www.globalactionplan.org.uk/ecodriving-simulator>
- [6] P. Wensch, A. Borrmann, E. Rank, C. V. Treeck, T. U. München, O. Wensch, and L. R. München, “Collaborative and interactive CFD simulation using high performance computers,” in *In Proceedings of 18th Symposium AG Simulation (ASIM) and EuroSim*, 2005.
- [7] “Fire Paradox . An innovative approach of integrated Wildland Fire Management regulating the Wildfire problem by the wise use of fire: Solving the Fire Paradox,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.eufirelab.org/toolbox2/library/upload/2890.pdf>
- [8] B. Allgöwer, D. Calogine, A. Camia, P. Cuiñas, P. Fernandes, A. Francesetti, C. Hernando, B. Kötz, N. Koutsias, H. Lindberg, D. Molina, F. Morsdorf, L. M. Ribeiro, E. Rigolot, and O. Séro-Guillaume, “Methods for wildland

- fuel description and modelling: A state of the art,” EUFIRELAB: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a wall-less Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region Deliverable D-02-01, Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: http://www.eufirelab.org/prive/directory/units_section_2/D-02-01/D-02-01.pdf
- [9] R. C. Rothermel, “A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuel,” U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Tech. Rep., 1972.
- [10] M. A. Finney, “Farsite: Fire area simulator-model development and evaluation,” *Res. Pap. RMRS-RP-4. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station*, vol. 1, p. 47, 1998. [Online]. Available: http://maps.wildrockies.org/ecosystem_defense/Federal_Agencies/Forest_Service/Region_1/Idaho_Panhandle_NF/Bonnars_Ferry_District/Myrtle%20HFRA/Myrtle%20Creek%20HFRA%20Objection%20references%20disk%204/fireareaall.pdf
- [11] W. E. Mell, J. J. Charney, M. A. Jenkins, P. Cheney, and J. Gould, “Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL - FIRETEC and NIST - WFDS models,” *EastFIRE Conference 2005*, 2005.
- [12] H. Huang, R. Ooka, S. Kato, H. Otake, and Y. Hayashi, “Cfd simulation of thermal plume and firebrands scattering in urban fire,” *Fire Science and Technorogy*, vol. 23 (2), pp. 152–163, 2004. [Online]. Available: http://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/23/2/23_152/_article
- [13] J. C. Sanderlin, J. A. Ball, G. A. Johanson, and L. E. Ewing, “Urban fire simulation version 2,” Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA 22310-3398, Tech. Rep., February 1993. [Online]. Available: <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA261074>
- [14] F. J. Serón, D. Gutiérrez, J. Magallón, L. Ferragut, and M. A. Asensio, “The evolution of a wildland forest fire front,” *Visual Computer*, vol. 21, pp. 1–18, 2005. [Online]. Available: <http://web.usal.es/~ferragut/>
- [15] L. Ferragut, S. Monedero, M. I. Asensio, and J. Ramírez, “Scientific advances in fire modelling and its integration in a forest fire decision system.” in *Modelling, Monitoring and Management of Forest Fire I. WIT*

- Transactions on Ecology and the Environment*, W. Press, Ed., vol. 119, 2008, pp. 31–38. [Online]. Available: <http://web.usal.es/~ferragut/>
- [16] L. Ferragut, M. I. Asensio, and S. Monedero, “Modelling radiation and moisture content in fire spread,” *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 23, pp. 819–833, 2007. [Online]. Available: <http://web.usal.es/~ferragut/>
- [17] Y. Dumond, “Forest fire growth modelling with geographical information fusion,” *Information Fusion, 11th International Conference on*, pp. 1–6, 2008. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4632383
- [18] K. Kose, N. Grammalidis, E. Yylmaz, and E. Cetin, “3D forest fire propagation simulation,” in *3DTV-CON’08*, 2008. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4547885
- [19] M. Chaa, S. Hanb, J. Leea, and B. Choic, “A Virtual Reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data,” *Fire Safety Journal*, vol. 50, pp. 12–24, May 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711212000136>
- [20] J. B. Goldberg, “Operations research models for the deployment of emergency services vehicles,” *EMS Management Journal*, vol. 1 (1), pp. 20–39, 2004. [Online]. Available: <http://academic.csuohio.edu/holcombj/Deployment.pdf>
- [21] J. S. Fried and B. D. Fried, “Simulating wildfire containment with realistic tactics,” *Forest Science*, vol. 42 (3), pp. 267–281, 1996. [Online]. Available: <http://www.ingentaconnect.com/content/saf/fs/1996/00000042/00000003/art00003>
- [22] I. Karafyllidis and A. Thanailakis, “A model for predicting forest fire spreading using cellular automata,” *Ecological Modelling*, vol. 99, no. 1, pp. 87–97, 1997. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBS-3SWJMJ2-19/2/80ab4a70161da27565f1116f4783cafb>
- [23] S. G. Berjak and J. W. Hearne, “An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous savanna system,” *Ecological*

- Modelling*, vol. 148, no. 2, pp. 133 – 151, 2002. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBS-453H67M-2/2/1ea24adb02835fee8086b0e1d0abb3c3>
- [24] G. L. Achtemeier, “Rabbit rules. an application of stephen wolfram new kind of science to fire spread modeling,” *Technical Program of the Joint 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress and 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology*, 2003. [Online]. Available: <http://frames.nacse.org/ttrs/16000/16455.html>
- [25] ———, “A rule-based fire spread model for simulating prescribed burns,” in *Seventh Symposium on Fire and Forest Meteorology*, 2007. [Online]. Available: http://ams.confex.com/ams/7firenortheast/techprogram/paper_127154.htm
- [26] G. L. Achtemeier, S. L. Goodrick, and Y. Liu, “On the multiple-core updraft smoke plume problem: is the genie out of the bottle?” *16th Annual International Emission Inventory Conference. Emission Inventories: Integration, Analysis, and Communications*, 2007.
- [27] D. Evans, R. Rehm, and E. Baker, “Physics-based modeling for wui fire spread: Simplified model algorithm for ignition of structures by burning vegetation,” Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology (NISTIR), Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire04/art045.html>
- [28] S. Lee, R. Davidson, N. Ohnishi, and C. Scawthorn, “Fire following earthquake-reviewing the state-of-the-art of modeling,” *Earthquake spectra*, vol. 24, no. 4, pp. 933 – 967, 2008. [Online]. Available: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=20939331>
- [29] T. Iwami, Y. Ohmiya, Y. Hayashi, K. Kagiya, W. Takahashi, and T. Naruse, “Simulation of city fire,” *Fire Science and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 132–140, 2004. [Online]. Available: http://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/23/2/23_132/_article
- [30] T. Tanaka and K. Himoto, “Physics-based model of urban fire spread and mitigation of post-earthquake fire risk in historic cities,” *Abstracts for Annuals. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (CD-ROM)*, vol. 49, pp. 1–5, 2006. [Online]. Available: <http://sciencelinks.jp/j-east/article/200704/000020070407A0041881.php>

- [31] D. R. Weise and G. S. Biging, “Effects of wind velocity and slope on flame properties,” *Can. J. For. Res.*, vol. 26, pp. 1849–1858, 1996. [Online]. Available: <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/23271>
- [32] A. Ohgai, Y. Gohnai, S. Ikaruga, M. Murakami, and K. Watanabe, “Cellular automata modeling for fire spreading as a tool to aid community-based planning for disaster mitigation,” in *Recent Advances in Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, J. P. Leeuwen and H. J. P. Timmermans, Eds. Springer Netherlands, 2005, pp. 193–209. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2409-6_13
- [33] K. Himoto and T. Tanaka, “A physically-based model for urban fire spread,” *Fire Safety Science*, vol. 7, pp. 129–140, 2003. [Online]. Available: <http://iafss.haifire.com/html/iafss/symposium/7/abstracts/7-129.htm>
- [34] C. Scawthorn, “Fire following earthquake, supplemental study for the shakeout scenario. the shakeout scenario,” U.S. Geological Survey Open File Report 2008-1150, California Geological Survey Preliminary Report 2 version 1.0, U.S. Geological Survey Circular 1324, California Geological Survey Special Report 207 version 1.0. U. S. Geological Survey and California Geological Survey, Pasadena., Tech. Rep., 2008.
- [35] S. Zhao, “Gisffe, an integrated software system for the dynamic simulation of fires following an earthquake based on gis,” *Fire Safety Journal*, vol. 45, pp. 83–97, Jan. 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.11.001>
- [36] ———, “Simulation of mass fire-spread in urban densely built areas based on irregular coarse cellular automata,” *Fire Technology*, vol. 47(3), pp. 721–749, 2011. [Online]. Available: <http://www.ingentaconnect.com/content/klu/fire/2011/00000047/00000003/0000018>
- [37] P. Johnston, G. Milne, and J. Kelso, “A heat transfer simulation model for wildfire spread,” in *Proceedings of the V International Conference on Forest Fire Research*, 2006. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.83.5347&rep=rep1&type=pdf>
- [38] P. Johnston, J. Kelso, and G. Milne, “Efficient simulation of wildfire spread on an irregular grid,” *International Journal of Wildland Fire*, vol. 17(5),

- pp. 614 – 627, 2008. [Online]. Available: <http://www.publish.csiro.au/paper/WF06147.htm>
- [39] “Servicio de Prevención, Extinción de Incendios y Salvamentos (SPEIS) de San Sebastián,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.donostia.org/info/ciudadano/bomberos.nsf/vowebContenidosId/NT00000952?OpenDocument&idioma=cas&id=A336670349958>
- [40] “Cuerpo de bomberos de madrid,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.madrid.es/bomberos>
- [41] “FireBlast,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.fireblast.com/>
- [42] “Kidde fire trainers,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.kiddeft.com>
- [43] “Compartment Fire Behavior Training,” December 2012. [Online]. Available: <http://cfbt-us.com>
- [44] E. Hartin, “Live fire training as simulation: The role of fidelity in effective training,” *Swedish Civil Contingencies Agency. Sandi;æ, Sweden*, 2009. [Online]. Available: <http://cfbt-us.com/resources.html>
- [45] “Engineering Open House at the University of Illinois at Urbana-Champaign,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=oUq0pEbM8fY>
- [46] “Emergency 2012,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.3djuegos.com/8115/emergency-2012/>
- [47] “Usa Fire Departments,” December 2012. [Online]. Available: <http://usfiredept.com/>
- [48] “Parasol emt,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.parasolemt.com.au/fire-and-emergency-training-simulator/>
- [49] “Illinois Fire & Safety Company,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.illinoisfire.com>
- [50] “Real heroes: Firefighters,” December 2012. [Online]. Available: <http://uk.wii.ign.com/articles/101/1015848p1.html>

- [51] “Cultimedia games,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.cultimedia.ch/>
- [52] C. Chang and Y. Ma, “Simulation of forest fire extinguishing based on complex adaptive system theory,” *Intelligent Computation Technology and Automation, International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 2, pp. 228–231, 2009.
- [53] M. Maschek, “Real time simulation of fire extinguishing scenarios,” Master’s thesis, Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, Favoritenstrasse 9-11/186, A-1040 Vienna, Austria, 2010. [Online]. Available: <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2010/maschek-2010-rts/>
- [54] D. Caballero, “Taxicab geometry: some problems and solutions for square grid-based fire spread simulation,” *V International Conference on Forest Fire Research*, p. 15, 2006. [Online]. Available: <http://www.taxicabgeometry.net/research.html>
- [55] A. Beutling, A. C. Batista, and R. V. Soares, “Fire behavior modeling based on simulated field plots,” in *Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires III*, 2012, pp. 27–37. [Online]. Available: <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=23313>
- [56] N. W. C. Group, *Wildland Fire Suppression Tactics Reference Guide*, N. W. C. Group, Ed. National Wildfire Coordinating Group, 1996. [Online]. Available: <http://www.amazon.com/Wildland-Suppression-Tactics-Reference-Guide/dp/B000LVIW8K>
- [57] A. Korchi, A. Moreno, and A. Segura, “Real time forest fire simulation with extinguishment support,” in *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, P. Richard, J. Braz, and A. Hilton, Eds. INSTICC Press, May 2010, pp. 323–326.
- [58] A. Moreno, A. Segura, A. Korchi, J. Posada, and O. Otaegui, “Interactive urban and forest fire simulation with extinguishment support,” in *Advances in 3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 131–148.

- [59] A. Moreno, A. Segura, S. Zlatanova, J. Posada, and A. García-alonso, “Semantic enhancement of a virtual reality simulation system for fire fighting,” in *Proceedings of the Joint ISPRS Workshop on 3D City Modelling & Applications and the 6th 3D GeoInfo Conference*, 2011.
- [60] D. R. Weise and B. M. Wotton, “Wildland-urban interface fire behaviour and fire modelling in live fuels,” *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19(2), pp. 149–152, 2010.
- [61] K. Ikeda and A. Sekizawa, “Collapse mechanism of the windsor building by fire in Madrid and the plan for its demolition process,” in *International Workshop on Emergency Response and Rescue*, 2005. [Online]. Available: <http://www.ncdr.nat.gov.tw/iwerr/doc/pdf/S12%20PDF/s12-1.pdf>
- [62] J. Stern-Gottfried, “Travelling fires for structural design,” Ph.D. dissertation, The University of Edinburgh, Aug-2011 2011. [Online]. Available: <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/5244>
- [63] “3d reconstruction from parallel cross-sectional data, using delaunay triangulation,” December 2012. [Online]. Available: <http://www-sop.inria.fr/prisme/logiciel/nuages.html>
- [64] J. Congote, A. Moreno, L. Kabongo, J. L. Pérez, R. S. José, and O. Ruiz, “Web based hybrid volumetric visualisation of urban gis data,” in *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models – European COST Action TU0801*, ser. 03001, G. M. T. Leduc and R. B. (Eds.), Eds., COST-Action. Nantes, France: EDP Sciences, October 2012, pp. 1–6.
- [65] M. Aristizabal, J. E. Congote, A. Segura, A. Moreno, H. Arriegui, and O. E. Ruiz, “Visualization of flow fields in the web platform,” *Journal of WSCG*, vol. 20, no. 3, pp. 189–196, 2012. [Online]. Available: <http://wscg.zcu.cz/wscg2012/>
- [66] A. Segura, A. Moreno, I. García, N. Aginako, M. Labayen, J. Posada, J. A. Aranda, and R. G. D. Andoin, “Visual processing of geographic and environmental information in the basque country: Two basque case studies,” in *GeoSpatial Visual Analytics*, ser. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, R. D. Amicis, R. Stojanovic, and G. Conti, Eds. Springer Netherlands, 2009, pp. 199–207.

- [67] “Openfiremap. using openstreetmap to show the location of fire stations and fire hydrant in nuremberg,” December 2012. [Online]. Available: <http://openfiremap.org/>
- [68] “District of Columbia water and sewer authority,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.dewater.com/hydrants/status.cfm>
- [69] “Directive 2007/2/ec of the european parliament and of the council of 14 march 2007 establishing an infrastructure for spatial information in the european community (inspire).” European Directive, March 2007.
- [70] Y. Ling, F. Zhou, X. Wang, and B. Yang, “Integration of heterogeneous geospatial data based on middleware technology,” *WASE International Conference on Information Engineering*, vol. 2, pp. 314–317, 2009.
- [71] W. Kuhn, “Geospatial semantics: why, of what, and how?” *Journal on Data Semantics, Special Issue on Semantic-based Geographical Information Systems*, vol. 3534, pp. 1–24, 2005.
- [72] L. v. d. B. J. Stoter and, G. Vosselman, J. Goos, S. Zlatanova, E. Verbree, R. Klooster, L. van Berlo, G. Vestjens, M. Reuvers, and S. Thorn, “A generic approach for 3d sdi in the netherlands,” in *Proceedings of the Joint ISPRS Workshop on 3D City Modelling & Applications and the 6th 3D GeoInfo Conference*, June 2011.
- [73] “National bim standard purpose, us national institute of building sciences facilities information council, bim committee,” 2006. [Online]. Available: http://www.nibs.org/BIM/NBIMS_Purpose.pdf
- [74] T. Kolbe, G. Gröger, and L. Plümer, “Citygml, interoperable access to 3d city models,” in *Proceedings of the International Symposium on Geo-information for Disaster Management*, Z. S. F. F. Oosterom, P., Ed. Springer Verlag, 2005.
- [75] “Exchange and Storage of Virtual 3D City Models,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.citygml.org/>
- [76] Z. Fan and S. Zlatanova, “Exploring ontologies for semantic interoperability of data in emergency response,” *Applied Geomatics*, vol. 3(2), pp. 109–122, 2011.

- [77] S. Sauvagnargues-lesage, C. Picard, S. Vasconcelos, and G. Xanthopoulos, “Fire suppression management and planning;” EUFIRELAB: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a wall-less Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region Deliverable D-09-07, Tech. Rep., 2006. [Online]. Available: http://www.eufirelab.org/prive/directory/units_section_9/D-09-07/D-09-07.pdf
- [78] “EU FIRELAB, a wall-less Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.eufirelab.org/>
- [79] S. Zlatanova, “Sii for emergency response: the 3d challenges,” in *ISPRS Archives, the XXI ISPRS Congress, Part B4-TYC IV*, 2008, pp. 1631–1637.
- [80] M. Marchese, L. Vaccari, P. Shvaiko, and J. Pane, “An application of approximate ontology matching in erespone,” in *Proceedings 5th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM)*, Washington DC, USA., 2008, pp. 294 – 304, may 4-7 2008,.
- [81] A. Moreno, A. Segura, S. Zlatanova, J. Posada, and A. García-Alonso, “Benefit of the integration of semantic 3d models in a fire-fighting vr simulator,” *Applied Geomatics*, vol. 4, no. 3, pp. 143–153, September 2012. [Online]. Available: <http://www.springerlink.com/content/c10311u6xu073g2m/?MUD=MP>
- [82] L. Stoimenov, B. Predic, V. Mihajlovic, and M. Stankovic, “Gis interoperability platform for emergency management in local community environment,” in *Proceedings of 8th AGILE Conference on GIScience*, Estoril, Portugal., 2005.
- [83] A. Stanimirovic, M. Bogdanovic, and L. Stoimenov, “Data access layer generation for interoperable gis environments,” in *Proceedings of the 12th AGILE International Conference on IScience*, Hannover, Germany., 2009.
- [84] S. Zlatanova, “Formal modelling of processes and tasks to support use and search of geo-information in emergency response,” in *Proceedings of the 13th International Conference and Exhibition on Geospatial Information Technology and Applications (Map India 2010)*, 2010.

- [85] S. Schmitz, P. Neis, and A. Zipf, “New applications based on collaborative geodata - the case of routing,” in *XXVIII INCA International Congress on Collaborative Mapping and SpaceTechnology*, 2008.
- [86] Z. Wang and S. Zlatanova, “An a*-based search approach for navigation among moving obstacles,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Geo-information for Disaster Management*, 2012.
- [87] C. Toro, J. Posada, M. Termenón, J. Oyarzun, J. Falcón, B. Gabrys, R. Howlett, and L. Jain, “Knowledge based tools to support the structural design process,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4251, pp. 679 – 686, 2006.
- [88] J. Posada, C. Toro, S. Wundrak, and A. Stork, “Using ontologies and step standards for the semantic simplification of cad models in different engineering domains,” *Applied Ontology*, vol. 1, no. 3, pp. 263–279, February 2007.
- [89] “Collaborative wiki with all relevant links and tools,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.citygmlwiki.org>
- [90] “Firebreak design procedures,” Natural Resources Conservation Service, Tech. Rep., 2010. [Online]. Available: <http://efotg.nrcs.usda.gov/references/public/NE/NE394DP.pdf>
- [91] T. Breton and Y. Duthen, “Les simulations de propagation de feu en milieu urbain,” *unpublished*. [Online]. Available: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00287987/en/>
- [92] “Centro de seguridad marítima integral jovellanos,” December 2012. [Online]. Available: <http://www.centrojovellanos.com>
- [93] T. Glander, A. Moreno, M. Aristizabal, J. Congote, J. Posada, and O. Ruiz, “Reweb3d. enabling desktop 3d applications to run in the web,” *Submitted to Computer and Graphics journal*, 2012.
- [94] M. Aristizabal, J. E. Congote, Álvaro Segura, A. Moreno, H. Arregui, and O. Ruiz, “Hardware-accelerated web visualization of vector fields. case study in oceanic currents,” in *IVAPP-2012. International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, R. S. L. Paul Richard, Martin Kraus and J. Braz, Eds., INSTICC. Rome, Italy: SciTePress, February 2012, pp. 759–763.

- [95] A. Moreno, A. Segura, S. Zlatanova, J. Posada, and A. García-alonso, “Introducing gis-based simulation tools to support rapid response in wildland fire fighting,” in *Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires III*, ser. Wit Transactions on Ecology and the Environment, C. Brebbia and G. Perona, Eds. WIT Press, 2012, pp. 163 – 174. [Online]. Available: <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=23324>
- [96] J. H. Scott and R. E. Burgan, “Standard fire behavior fuel models. a comprehensive set for use with rothermel’s surface fire spread model,” United States Department of Agriculture, General Technical Report RMRS-GTR-153, June 2005. [Online]. Available: http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr153.pdf