

---

# Asimilación de datos, validación e integración en GIS de un modelo de simulación de incendios forestales

---



**VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

**TESIS DOCTORAL**

**Diego Prieto Herráez**

**Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno  
Escuela Politécnica Superior de Ávila  
Universidad de Salamanca**

**Junio 2018**





# Asimilación de datos, validación e integración en GIS de un modelo de simulación de incendios forestales

*Memoria que presenta para optar al título de Doctor en Geotecnologías Aplicadas a la Construcción, Energía e Industria*

**Diego Prieto Herráez**

*Dirigida por los Doctores:*

**María Isabel Asensio Sevilla**

**Luis Ferragut Canals**

**José Manuel Cascón Barbero**

*y tutorizada por la Doctora:*

**Manuela Chaves Tolosa**

**Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno**

**Escuela Politécnica Superior de Ávila**

**Universidad de Salamanca**

**Junio 2018**





Solicitud Presentación

Tesis Doctoral



***Estimado Coordinador del Programa de Doctorado:***

D. **Diego Prieto Herráez** con DNI 70810292-P, alumno del programa de doctorado *Geotecnologías Aplicadas a la Construcción, Energía e Industria*:

Solicita que se tenga en consideración la información aportada en este documento con el objetivo de poder presentar la tesis doctoral con título *Asimilación de datos, validación e integración en GIS de un modelo de simulación de incendios forestales* mediante el formato de compendio de artículos / publicaciones. La información aportada se corresponde con lo establecido en el *Procedimiento para la presentación de la tesis doctoral en la Universidad de Salamanca en el formato de compendio de artículos / publicaciones*, aprobado por la Comisión de Doctorado y Posgrado de la Universidad de Salamanca el día 15 de febrero de 2013.

A continuación se detallan los documentos adjuntos a esta solicitud:

1. Página inicial especificando que la tesis doctoral corresponde a un compendio de trabajos previamente publicados, detallando para cada uno de ellos: el título de cada trabajo, el nombre y afiliación de los autores, la referencia completa de la revista y el DOI.
2. Autorización de los directores para la presentación de la tesis doctoral mediante el formato de compendio de artículos / publicaciones.
3. Autorización de los coautores de los artículos / publicaciones para la utilización de los mismos en esta tesis doctoral, renunciando a presentarlos como parte de otra tesis doctoral en el caso de los coautores no doctores.
4. Memoria que refleja la coherencia y relación directa entre los artículos / publicaciones aportados. Este apartado incluye:
  - a) Introducción al tema objeto de estudio.
  - b) Objetivos de la investigación y metodología seguida.
  - c) Antecedentes.
  - d) Hipótesis de trabajo.
  - e) Resultados alcanzados.
  - f) Conclusiones.
5. Copia completa de las publicaciones originales que conforman la tesis doctoral:
  - a) *A wildland fire physical model well suited to data assimilation.*

- b) *Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model.*
- c) *A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model.*

Se incluye para cada una de estas publicaciones un resumen en castellano en el cual se especifican los objetivos de la investigación, la metodología utilizada, los resultados alcanzados y las conclusiones finales.

- 6. Apéndice en el que se incluyen los principales índices de calidad de las publicaciones aportadas.
- 7. Apéndices en los que se enumeran otros méritos resultantes del trabajo realizado en la elaboración de esta tesis doctoral: inscripciones en el Registro General de la Propiedad Intelectual y contribuciones a congresos.

## *Compendio de trabajos previamente publicados*

La presente tesis doctoral corresponde a un compendio de trabajos previamente publicados, según la normativa aprobada por la Comisión de Doctorado y Posgrado de la Universidad de Salamanca el día 15 de febrero de 2013, en revistas indexadas en el JCR (*Journal Citation Reports*).

A continuación se especifica el título de cada trabajo, el nombre y afiliación de cada uno de los autores, la referencia completa de la revista o editorial, sus índices de calidad y el DOI de cada uno de los trabajos:

### 1. PUBLICACIÓN

**Título:** *A wildland fire physical model well suited to data assimilation*

**Autores:** Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>, Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>

**Afiliación:**

<sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca

<sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca

<sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca

**Revista:** *Pure and Applied Geophysics*. **2015**, 172(1), 121–139

**Indicadores de calidad (2014):**

- Cuartil: Q2 (38/79) en *Geochemistry & Geophysics*.
- Factor de impacto: 1.618
- Factor de impacto a 5 años: 1.910

**DOI:** 10.1007/s00024-014-0893-9

## 2. PUBLICACIÓN

**Título:** *Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model*

**Autores:** Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>

**Afiliación:**

<sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca

<sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca

<sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca

**Revista:** *Advances in Engineering Software*. **2015**, 90(C), 98–106

**Indicadores de calidad (2015):**

- Cuartil: Q1 (14/106) en *Computer Science, Software Engineering*.
- Factor de impacto: 1.673
- Factor de impacto a 5 años: 1.765

**DOI:** 10.1016/j.advengsoft.2015.08.001

## 3. PUBLICACIÓN

**Título:** *A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model*

**Autores:** Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>, Arsenio Morillo Rodríguez<sup>4</sup>

**Afiliación:**

<sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca

<sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca

<sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca

<sup>4</sup> Empresa Pública de Servicios Agrarios Galegos S.A.

**Revista:** *International Journal of Geographical Information Science*. **2017**, 31(11), 2142–2163

**Indicadores de calidad (2016):**

- Cuartil: Q2 (23/88) en *Information Science & Library Science*.
- Factor de impacto: 2.370
- Factor de impacto a 5 años: 2.866

**DOI:** 10.1080/13658816.2017.1334889

## **Asimilación de datos, validación e integración en GIS de un modelo de simulación de incendios forestales**

Tesis Doctoral presentada por Diego Prieto Herráez  
Autorización de los directores de tesis

Dra. **María Isabel Asensio Sevilla** con DNI *07961048-N*, Profesora Titular de Universidad del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Salamanca,

Dr. **Luis Ferragut Canals** con DNI *41400730-V*, Catedrático de Universidad del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Salamanca,

Dr. **José Manuel Cascón Barbero** con DNI *70863100-P*, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Economía e Historia Económica de la Universidad de Salamanca,

### **HACEMOS CONSTAR:**

Que D. **Diego Prieto Herráez**, Ingeniero Superior de Telecomunicaciones por la Universidad de Valladolid, ha realizado bajo nuestra dirección la tesis doctoral titulada *Asimilación de datos, validación e integración en GIS de un modelo de simulación de incendios forestales* mediante la modalidad de compendio de artículos / publicaciones (Comisión de Doctorado y Posgrado de la Universidad de Salamanca, 15 de febrero de 2013) al disponer el autor de los siguientes artículos publicados en revistas científicas y tecnológicas con impacto reconocido e indexadas en el JCR (*Journal Citation Reports*):

1. **A wildland fire physical model well suited to data assimilation.** Luis Ferragut Canals, María Isabel Asensio Sevilla, José Manuel Cascón Barbero, Diego Prieto Herráez. *Pure and Applied Geophysics*. **2015**, 172(1), 121–139.
2. **Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model.** Diego Prieto Herráez, María Isabel Asensio Sevilla, Luis Ferragut Canals, José Manuel Cascón Barbero. *Advances in Engineering Software*. **2015**, 90(C), 98–106.
3. **A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model.** Diego Prieto Herráez, María Isabel Asensio Sevilla, Luis Ferragut Canals, José Manuel Cascón Barbero, Arsenio Morillo Rodríguez. *International Journal of Geographical Information Science*. **2017**, 31(11), 2142–2163.





# Agradecimientos

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han ayudado durante el trabajo realizado a lo largo de esta tesis doctoral, ofreciéndome su apoyo, consejos y ánimo, y sin las que nada de esto habría sido posible:*

*En primer lugar, merece especial mención mi directora de tesis, la Dra. María Isabel Asensio Sevilla, cuyas ideas han sido la semilla de este trabajo, por su paciencia y ayuda para que esta tesis pueda ser una realidad.*

*A mi director, el Dr. Luis Ferragut Canals, con quien ha sido un privilegio poder trabajar durante estos años, por transmitirme parte de sus amplios conocimientos y su experiencia profesional.*

*A mi director, el Dr. José Manuel Cascón Barbero, por su dedicación, asesoramiento y apoyo incondicional.*

*A mi tutora, la Dra. Manuela Chaves Tolosa, por el tiempo y la atención que me ha dedicado.*

*Al Dr. Erwin Carlos Hernández Hernández, por darme la oportunidad de formar parte de su equipo en la Universidad Técnica Federico Santa María.*

*A ellos y al resto de miembros del grupo de investigación SINUMCC por darme la oportunidad de formar parte del equipo de trabajo durante todos estos años.*

*Gracias por vuestra infinita paciencia.*

*A mis padres, que me educaron y han hecho todo lo posible para que hoy pueda llegar hasta aquí, apoyándome en todas las decisiones importantes de mi vida.*

*A mis amigos, por el apoyo y ánimo recibido durante estos meses.*

*No puedo tampoco olvidar a todos los profesores que durante toda mi etapa como estudiante han contribuido de una u otra forma a mi formación para que hoy pueda llegar hasta aquí.*

*Por último, gracias también a toda esa gente que ayuda altruistamente creando y compartiendo manuales, tutoriales o respondiendo las dudas planteadas a través de foros que he utilizado y seguiré utilizando en mis quehaceres diarios. Sabéis un montón.*

*A todos vosotros, MUCHAS GRACIAS.*

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>XVII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XXVII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XXXI</b>

<b>MEMORIA</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1. Objetivos . . . . .	9
2. Metodología . . . . .	10
<b>2. Antecedentes</b>	<b>13</b>
<b>3. Hipótesis de trabajo</b>	<b>21</b>
1. El modelo PhyFire . . . . .	22
1.1. Descripción matemática del modelo . . . . .	23
1.2. Métodos numéricos . . . . .	28
2. El modelo HDWind . . . . .	28
2.1. Descripción matemática del modelo . . . . .	29
2.2. Problema de control óptimo . . . . .	33
2.3. Métodos numéricos . . . . .	33
3. Acoplamiento PhyFire–HDWind . . . . .	33
4. Integración en GIS . . . . .	34
<b>4. Resultados</b>	<b>35</b>
<b>5. Conclusiones y líneas de investigación futuras</b>	<b>41</b>
1. Conclusiones . . . . .	41
2. Líneas futuras . . . . .	43

<b>6. Financiación y colaboraciones</b>	<b>45</b>
1. Financiación . . . . .	45
2. Colaboraciones . . . . .	47
<b>PUBLICACIONES</b>	<b>49</b>
<b>7. A wildland fire physical model well suited to data assimilation</b>	<b>51</b>
1. Información de la publicación . . . . .	51
2. Resumen . . . . .	53
<b>8. Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model</b>	<b>63</b>
1. Información de la publicación . . . . .	63
2. Resumen . . . . .	65
<b>9. A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model</b>	<b>73</b>
1. Información de la publicación . . . . .	73
2. Resumen . . . . .	75
<b>APÉNDICES</b>	<b>83</b>
<b>A. Factor de impacto de las publicaciones</b>	<b>85</b>
1. A wildland fire physical model well suited to data assimilation	86
2. Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model . . . . .	87
3. A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model . . . . .	88
<b>B. Propiedad Intelectual</b>	<b>89</b>
1. PhFFS . . . . .	89
2. HDWF . . . . .	95
3. ArcPhFFS . . . . .	101
4. ArcHDWF . . . . .	107
<b>C. Aportaciones a congresos</b>	<b>113</b>
1. A simplified wildland fire model applied to a real case . . . . .	114
1.1. Información de la publicación . . . . .	114

---

1.2.	Resumen . . . . .	115
2.	Parallel implementation of a simplified semi-physical wildland fire spread model using OpenMP . . . . .	119
2.1.	Información de la publicación . . . . .	119
2.2.	Resumen . . . . .	121
 <b>BIBLIOGRAFÍA</b>		 <b>125</b>
 <b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>		 <b>137</b>



# Índice de figuras

1.	Mapa global de incendios activos 26/04/2018 . . . . .	4
2.	Incendio en el Parque Nacional de Doñana (24/06/2017 – 04/07/2017) . . . . .	5
3.	MODIS: Mapa de incendios activos en el noroeste de la Pe- nínsula Ibérica (15/10/2017) . . . . .	6
4.	Mapa global GFED de superficie afectada por incendios. . . . .	7
5.	Simulación de incendios forestales reales. . . . .	37



# Índice de tablas

1.	Incógnitas del modelo PhyFire . . . . .	24
2.	Parámetros del modelo PhyFire . . . . .	25
3.	Variables de entrada del modelo PhyFire . . . . .	25
4.	Incógnitas, parámetros y variables del modelo HDWind . . .	32
5.	Clasificación de Davenport de rugosidad de la superficie . . .	32



# Resumen

Esta tesis doctoral se ha desarrollado dentro del contexto de la investigación de la simulación numérica de incendios forestales llevada a cabo dentro del grupo de investigación reconocido SINUMCC (*Simulación Numérica y Cálculo Científico*) de la *Universidad de Salamanca*.

En términos generales, el trabajo aquí recogido tiene por objeto continuar el desarrollo del modelo de simulación de incendios forestales PhyFire (*Physical Forest Fire Spread*) elaborado por el grupo de investigación mediante la integración de nuevas herramientas que mejoren su eficiencia, aplicabilidad y utilidad, a través de los siguientes objetivos:

1. Incorporación de técnicas de **asimilación de datos** basadas en el empleo del Filtro de Kalman. La asimilación de datos permite mejorar las predicciones obtenidas por el modelo mediante la incorporación de datos observados durante la evolución real del incendio, proporcionando de este modo predicciones más probables en los instantes siguientes.
2. Validación del modelo PhyFire mediante la simulación de fuegos experimentales llevados a cabo bajo condiciones controladas y el uso de técnicas de **análisis de sensibilidad global**. Estas técnicas permiten determinar los parámetros y variables de entrada del modelo que más influencia tienen en las variables de salida, validando el modelo y facilitando el diseño del procedimiento de ajuste de sus parámetros.
3. **Ajuste de parámetros** del modelo, mediante el uso de algoritmos de optimización iterativos en los que la función de coste compara la salida del modelo con medidas realizadas sobre fuegos experimentales.
4. **Integración en SIG (*Sistemas de Información Geográfica*)** de los modelos PhyFire y HDWind para mejorar su usabilidad y eficiencia al disminuir el tiempo necesario para llevar a cabo la simulación de un incendio real. Se ha creado una herramienta apta para la utilización por los potenciales usuarios, que incorpora toda la información espacial necesaria para llevar a cabo las simulaciones.
5. **Simulación de incendios forestales reales**, con el objetivo de validar el trabajo realizado.

## Palabras Clave

- Simulación de incendios forestales
- Asimilación de datos
- Filtro de Kalman
- Análisis de sensibilidad global
- Ajuste de parámetros
- Sistemas de Información Geográfica

## Códigos ANEP

El trabajo desarrollado se sitúa dentro de las siguientes áreas temáticas, según la clasificación de la ANEP (*Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva*):

- **Ciencias básicas:**
  - **CT:** Ciencias de la Tierra.
  - **MTM:** Matemáticas.
- **Ingenierías y Tecnologías:**
  - **INF:** Ciencias de la Computación y Tecnología Informática.
  - **IME:** Ingeniería Mecánica, Naval y Aeronáutica.
- **IND:** Transferencia de Tecnología.

## Códigos UNESCO

El trabajo desarrollado se sitúa dentro de las siguientes áreas temáticas, según la clasificación de la UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*):

- **Ciencias:**
  - **12.03.26:** Matemáticas. Ciencia de los Ordenadores. Simulación.
  - **12.06.13:** Matemáticas. Análisis Numérico. Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales.
  - **12.09.09:** Matemáticas. Estadística. Análisis Multivariante.
  - **12.09.14:** Matemáticas. Estadística. Técnicas de Predicción Estadística.

- **25.01.21:** Ciencias de la Tierra y del Espacio. Ciencias de la Atmósfera. Simulación Numérica.
- **25.05.04:** Ciencias de la Tierra y del Espacio. Geografía. Utilización del Terreno.
- **Ingeniería y arquitectura:**
  - **31.06.06:** Ciencias Agrarias. Ciencia Forestal. Protección.
  - **33.04.11:** Ciencias Tecnológicas. Tecnología de los Ordenadores. Diseño de Sistemas de Cálculo.
  - **33.08.99:** Ciencias Tecnológicas. Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente. Incendios Forestales.



# Abstract

This PhD thesis has been developed within the research context of the numerical simulation of forest fires carried out within the SINUMCC (*Simulación Numérica y Cálculo Científico*) recognized research group of the University of Salamanca.

In general terms, the work collected here is aimed to the further progress of the simulation model of forest fires PhyFire (*Physical Forest Fire Spread*) developed by the research group through the integration of new technologies that improve the efficiency, applicability and usefulness of the model through the following objectives:

1. Incorporation of **data assimilation** techniques based on the use of the Kalman Filter. The data assimilation allows to improve the predictions obtained by the model through the integration of observed data during the actual evolution of the fire, providing thus more probable predictions in the following instants.
2. Validation of the PhyFire model through the simulation of experimental fires carried out under controlled conditions and the use of **global sensitivity analysis** techniques. These techniques allow to determine the parameters and input variables of the model that have most influence on its output variables, validating the model and facilitating the design of the adjustment procedure of its parameters.
3. Model **parameters adjustment**, through the use of iterative optimization algorithms in which the cost function compares the outputs of the model with experimental measurements on fires carried out in laboratory.
4. **Integration into a GIS (*Geographic Information Systems*)** of the PhyFire and HDWind models to improve their usability and efficiency by reducing the time required to carry out the simulation of a real fire. A tool suitable for use by potential users has been developed, which incorporates all the spatial information necessary to carry out simulations.
5. **Simulation of real forest fires**, in order to validate the work done.

## Keywords

- Forest fire modeling
- Data assimilation
- Kalman Filter
- Global sensitivity analysis
- Parameter adjustment
- Geographic Information Systems

MEMORIA



# Capítulo 1

## Introducción

Un incendio forestal es un fuego que se extiende sin control a través de un terreno forestal o silvestre, afectando a combustibles vegetales, flora, fauna e infraestructuras. Se distingue de otros tipos de incendios por su capacidad de afectar amplias extensiones, la velocidad con la que se puede extender desde su origen, su potencial para cambiar de dirección inesperadamente, y la posibilidad de superar obstáculos como carreteras, ríos o cortafuegos.

Los incendios forestales pueden comenzar bien por causas naturales, con la caída de rayos o con erupciones volcánicas, o bien por causas humanas. El hombre puede iniciar el fuego de forma accidental, intencionada o controlada para limpiar la vegetación natural, con propósitos agrícolas o incluso en algunos casos para ayudar a los ecosistemas en su regeneración.

Cualquiera que sea la causa de inicio de los incendios forestales, los resultados del análisis de la información proporcionada por los sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de los satélites *Terra* y *Aqua* del programa del *Sistema de Observación de la Tierra* (EOS - *Earth Observing System*) de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), gracias a la detección de las radiaciones infrarrojas emitidas por el fuego en la superficie terrestre, o por los sensores VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) del satélite meteorológico *Suomi NPP* de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*); muestran que sobre la Tierra siempre hay algo ardiendo (ver Figura 1).

Aunque los incendios forestales son un mecanismo natural de autorregulación de los ecosistemas en determinadas regiones del planeta y una herra-

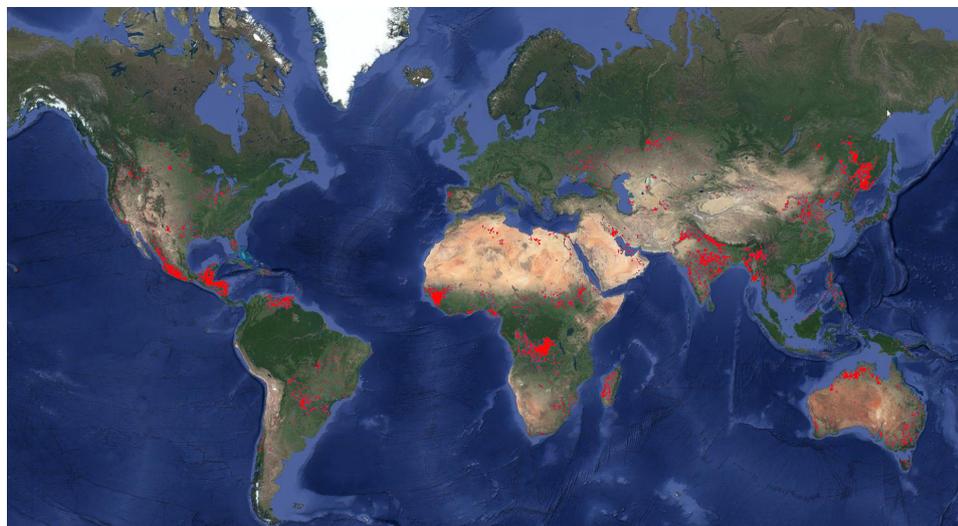


Figura 1: Mapa global de incendios activos, generado a partir de información MODIS + VIIRS. Fuente: Copernicus Emergency Management Service and the Group on Earth Observations [31] (26/04/2018)

mienta recurrente utilizada por la población humana en otras, los cambios del uso del suelo con la incursión humana en las zonas forestales han implicado un aumento de los efectos negativos del fuego [76]. La enorme proliferación de incendios forestales a causa de la actividad humana durante las últimas décadas sobrepasa la capacidad de recuperación natural de los ecosistemas, suponiendo una amenaza actual y futura que además de producir daños medioambientales, como los relacionados con la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad, trae consigo la pérdida de vidas humanas y daños en infraestructuras.

Esta amenaza se ve agravada por el calentamiento global [45], el cual está influyendo sobre la distribución espacio-temporal de los incendios forestales y sobre su intensidad, frecuencia y duración. Por otra parte, los incendios forestales emiten dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otros gases de efecto invernadero que a su vez también contribuyen al problema del calentamiento global.

Este cambio de la distribución espacio-temporal de los incendios forestales está originando incendios en zonas con elevada carga de combustible y en días con condiciones meteorológicas adversas, donde el comportamiento del fuego puede llegar a ser tan extremo que existen pocas posibilidades para que los medios de extinción tradicionales puedan controlarlo. Estos incendios, fuera de la capacidad de extinción, solamente se pueden combatir mediante el uso de herramientas que mejoren su prevención y gestión.

Año tras año, la proporción de GIF (*Grandes Incendios Forestales*), aquellos incendios en los que la superficie afectada supera las 500 ha., respecto al

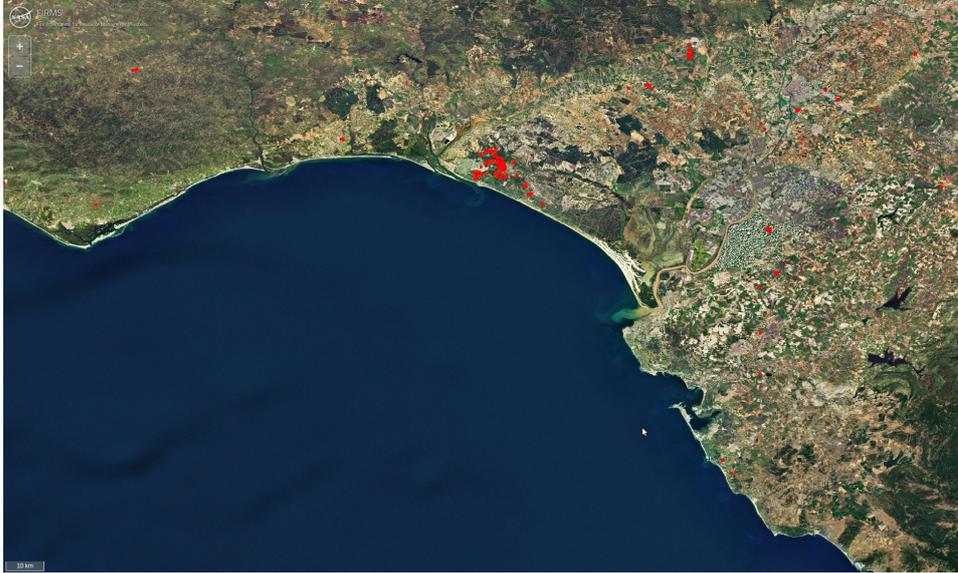


Figura 2: Mapa de incendios activos durante el incendio del Parque Nacional de Doñana en junio de 2017, generado a partir de información MODIS+VIIRS. Fuente: NASA [69]

total de siniestros no deja de crecer. Aunque el número de este tipo de incendios es muy inferior respecto del total, en ellos se quema la mayor parte de la superficie forestal afectada cada año. Y esta tendencia cada vez se acentúa más debido a las condiciones climáticas extremas que trae consigo el cambio climático. Nos enfrentamos a fuegos muy rápidos, difíciles de abordar por los medios de extinción y que afectan a grandes superficies.

Solamente en el último año (2017) se encuentran algunos ejemplos de incendios tan devastadores como los ocurridos en Chile durante el mes de enero o en California durante los meses de octubre y diciembre, cuando el incendio *Thomas* se convirtió en el más grande de la historia de un estado ya acostumbrado a los incendios forestales. En regiones más cercanas, podemos destacar los incendios ocurridos en Pedrógão Grande (Portugal) en junio o en Grecia durante el mes de agosto. En España, fueron de especial relevancia los incendios ocurridos en el Parque Nacional de Doñana durante el mes de junio (ver Figura 2), o en todo el noroeste de la Península Ibérica en el mes de octubre (ver Figura 3).

Estos episodios ya no son una excepción, sino una emergencia social y medioambiental que exige nuevas soluciones para la prevención y la extinción de incendios. Según recoge la última evaluación global de la gestión de incendios de la *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (FAO - *Food and Agriculture Organization*) [46], el análisis de

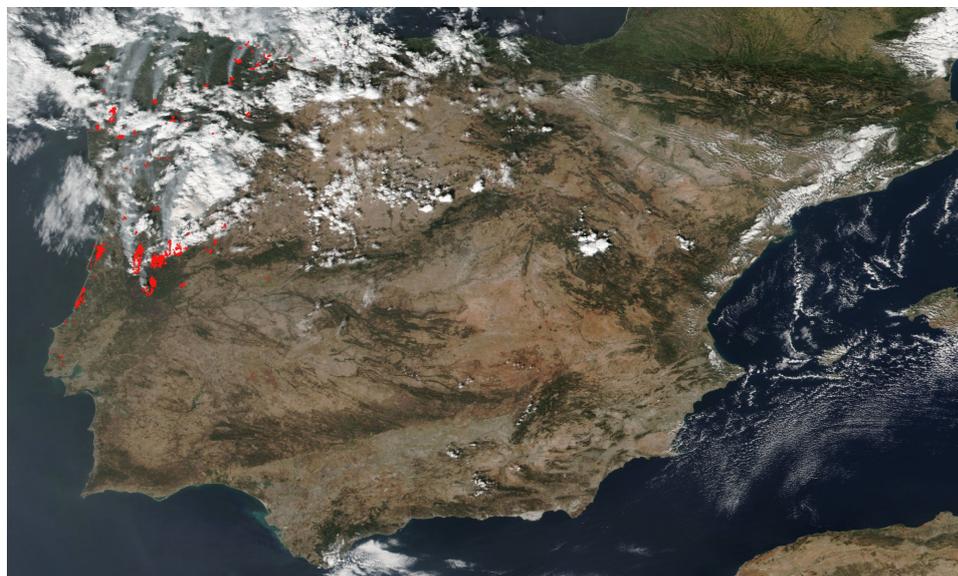


Figura 3: Mapa de incendios activos durante los incendios del noroeste de la Península Ibérica en octubre de 2017, generado a partir de información MODIS. Fuente: NASA [68]

la información obtenida vía satélite revela que en el año 2000 el fuego afectó a un total de 350 Mha. en todo el mundo, la mayoría de las cuales eran bosques. Estudios más recientes [47] reafirman que esta tendencia continúa, quemándose durante los años 1997–2011 una superficie media anual de 348 Mha. La mayor parte del área afectada por los incendios se situaba en el África Subsahariana, seguida a cierta distancia de Brasil, Australia, Rusia y Canadá (ver Figura 4).

El último informe anual del *European Forest Fire Information System* [85] pone de manifiesto que, en Europa, los países situados en la Cuenca Mediterránea son los que registran el mayor número de incendios forestales, destacando España y Portugal como los países más afectados conteniendo respectivamente el 21 % y el 51 % de la superficie quemada en toda la Cuenca Mediterránea durante el año 2016.

En España, de acuerdo a las estadísticas recogidas por el MAPAMA (*Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente*) del *Gobierno de España* en su EGIF (*Estadística General de Incendios Forestales*) [27], en el período comprendido entre los años 2007 y 2017 se han producido en España un total de 46.450 incendios (superficie quemada superior a 1 ha.) afectando en conjunto cada año, de media, una superficie de 99.700,12 ha., lo que supone anualmente el 0,20 % de la superficie nacional. Especial relevancia alcanzaron los incendios forestales durante el año 2017, siendo este el

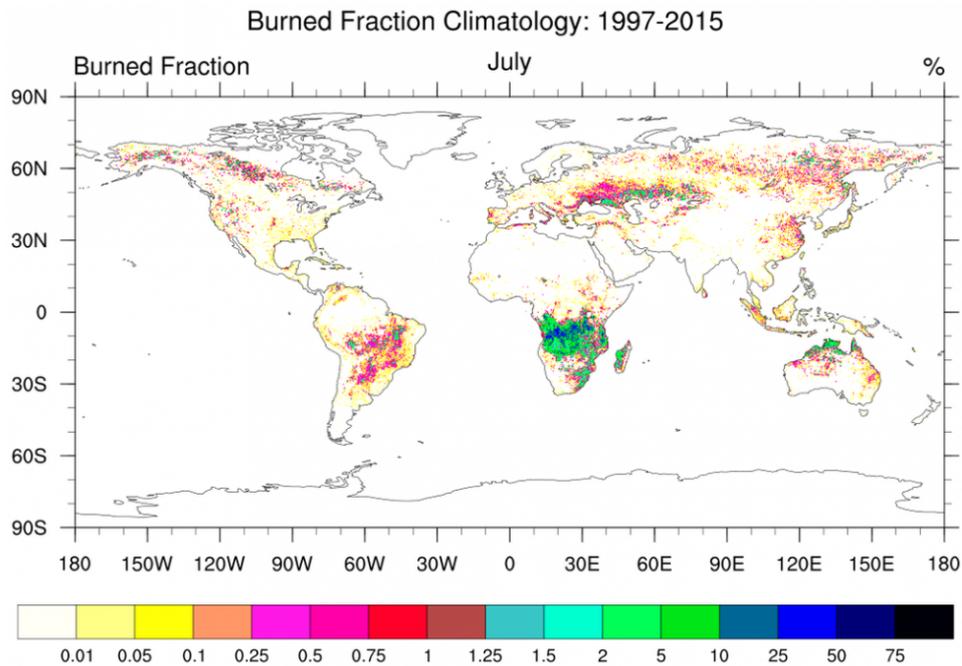


Figura 4: Media anual de fracción de suelo quemada (%) entre los años 1997-2015, calculada a partir de datos GFED (*Global Fire Emissions Database*). Fuente: National Center for Atmospheric Research Staff [70]

peor año del último decenio en cuanto al número de GIF, y en el segundo peor en cuanto al número de hectáreas arrasadas, sólo por detrás del año 2012.

A la vista de estos datos, se puede afirmar que los incendios forestales son uno de los problemas medioambientales, sociales y económicos más significativos que amenazan la conservación de nuestros bosques; existiendo un considerable interés en minimizar su riesgo y en mitigar los daños derivados de los mismos.

En este sentido, las herramientas para la simulación de la propagación de incendios forestales tienen una aplicación directa tanto en las labores de prevención como en las de extinción ayudando a disminuir los riesgos derivados del fuego. En prevención son útiles para la elaboración de mapas de riesgo, la planificación de políticas de reforestación, el diseño de barreras cortafuegos o la planificación de las quemas prescritas para la eliminación de parte del combustible presente en los bosques. En las tareas de extinción, predecir la evolución del fuego ayuda a optimizar las actividades de los equipos de extinción, a planificar la evacuación o a evitar riesgos que pueden poner en peligro vidas humanas.

El objetivo de un modelo de simulación de propagación de incendios forestales es reunir y utilizar los datos de entrada que representen el área del incendio (altimetría del terreno, tipo y carga de combustible, condiciones meteorológicas, ubicación del foco y tácticas de extinción empleadas) para predecir su evolución en un tiempo muy inferior al real, requisito imprescindible para poder ser una herramienta de utilidad ante un escenario real.

En los últimos años, el incremento de la capacidad de cálculo de los equipos informáticos y el aumento de las capacidades de las tecnologías de información espacial ofrecen la infraestructura tecnológica necesaria para la simulación efectiva del comportamiento de un incendio forestal.

En este ámbito, el grupo de investigación SINUMCC (*Simulación Numérica y Cálculo Científico*) de la Universidad de Salamanca ha desarrollado un modelo de propagación de incendios forestales, llamado PhyFire (*Physical Forest Fire Spread*), basado en la física del problema y que se deriva de las leyes de conservación de la masa y la energía. Se trata de un modelo simplificado que tiene como objetivo la simulación de este tipo de complejos procesos en ordenadores convencionales empleando un tiempo de cálculo notablemente inferior al tiempo real, pero teniendo en cuenta los mecanismos de propagación del fuego más importantes.

Debido a la crucial importancia de la meteorología en el comportamiento de un incendio forestal, y en particular, de la influencia del viento en la evolución del incendio [59], el grupo de investigación SINUMCC también ha trabajado en el desarrollo de un modelo de campos de viento de alta definición, llamado HDWind (*High Definition Wind Field*), que complementa el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire. Este modelo también proporciona soluciones a otros problemas medioambientales como por ejemplo la propagación de nubes tóxicas [39] o la predicción de la producción de energía eólica en aerogeneradores [11].

Este documento se estructura en tres partes. En primer lugar, la *Memoria*, que contiene los capítulos referentes a la introducción, los antecedentes, la hipótesis de trabajo, los resultados alcanzados y las conclusiones finales. En esta memoria se pretende reflejar la coherencia y la relación directa entre las publicaciones científicas presentadas en esta tesis doctoral.

La segunda parte, las *Publicaciones*, contiene los artículos publicados que conforman la tesis doctoral, todos ellos pertenecientes a revistas científicas y tecnológicas de impacto reconocido e indexadas en el JCR (*Journal Citation Reports*), incluyendo para cada uno de ellos un resumen en castellano en el que se especifican los objetivos, la metodología utilizada, los resultados alcanzados en la publicación y las conclusiones.

Para finalizar, los *Apéndices*, donde se incluye la información referente a los principales índices de calidad de las publicaciones científicas aportadas

y donde se enumeran otros méritos resultantes del trabajo realizado en la elaboración de esta tesis doctoral: inscripciones en el Registro General de la Propiedad Intelectual y contribuciones a congresos.

## 1. Objetivos

El trabajo desarrollado a lo largo de esta tesis doctoral tiene la finalidad de proporcionar nuevas herramientas dentro del contexto de la simulación numérica dirigida a la prevención y control de incendios forestales.

Para la creación de estas herramientas, utilizando como punto de partida los modelos PhyFire y HDWind mencionados, se establecen los siguientes objetivos:

1. Estudio e incorporación de técnicas de asimilación de datos en el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire con la finalidad de corregir las predicciones obtenidas por el modelo y obtener así resultados más realistas.
2. Experimentación y validación del uso de la asimilación de datos con la anterior finalidad.
3. Estudio de técnicas de análisis de sensibilidad global y su aplicación para determinar cuáles de los factores de entrada del modelo PhyFire tienen más influencia en ciertas variables de salida.
4. Diseño del procedimiento de ajuste de los diferentes parámetros del modelo, de forma eficiente gracias a los resultados del análisis de sensibilidad global.
5. Ajuste de los parámetros del modelo de propagación de incendios forestales PhyFire mediante la utilización de datos procedentes tanto de experimentos realizados en condiciones controladas como de incendios reales.
6. Incorporación del modelo PhyFire en un sistema GIS (*Geographic Information System*), obteniendo una herramienta capaz de realizar simulaciones realistas de incendios forestales de forma rápida, sencilla e intuitiva por usuarios no especializados y ajenos a la complejidad del modelo.
7. Generar una cartografía que reúna toda la información necesaria para alimentar los modelos PhyFire y HDWind.

En definitiva, el trabajo recogido en esta tesis doctoral tiene por objetivo desarrollar una herramienta capaz de predecir el comportamiento del fuego en un incendio forestal, utilizando para ello el modelo matemático PhyFire.

## 2. Metodología

La metodología seguida para alcanzar los anteriores objetivos ha sido la siguiente:

1. Estudio de los modelos PhyFire y HDWind desarrollados por el grupo de investigación SINUMCC.
2. Estudio de referencias bibliográficas acerca de las diferentes técnicas de asimilación de datos.
3. Implementación de técnicas de asimilación de datos eficientes y acoplamiento con el modelo PhyFire. Esta tarea requiere el uso de técnicas de optimización matemática y computacional para que el tiempo de simulación no sea elevado.
4. Experimentación y validación. La integración de técnicas de asimilación de datos en el modelo PhyFire debe ser efectiva y eficiente, es decir, debe mejorar la calidad de la predicción y hacerlo en tiempo inferior al real. Se han utilizado datos históricos de incendios reales para validar el trabajo realizado.

Las anteriores etapas han sido alcanzadas con éxito, plasmándose sus resultados en la publicación *A wildland fire physical model well suited to data assimilation* [38], que se resume y comenta en el Capítulo 7.

5. Estudio de referencias bibliográficas acerca de las técnicas de análisis de sensibilidad global de modelos matemáticos.
6. Estudio de la sensibilidad del modelo PhyFire a las variaciones de los diferentes parámetros y variables de entrada, con el objetivo de determinar que parámetros son más influyentes en el resultado, medido en términos del *RoS* (*Rate of Spread*) y del *FTH* (*Fire Thickness*) del incendio simulado.
7. Diseño del procedimiento de ajuste de los diferentes parámetros del modelo, de forma óptima gracias a la identificación de los parámetros más influyentes. Se han utilizado métodos de optimización iterativos multivariable que permiten aproximar el valor de cada uno de los parámetros.
8. Implementación, experimentación y validación del proceso de identificación de parámetros, utilizando para ello datos procedentes de experimentos realizados en laboratorio y recogidos en la bibliografía.

Los resultados de estas etapas se han plasmado en la publicación *Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model* [74], que se resume y comenta en el Capítulo 8.

9. Estudio, selección y adaptación de los recursos de información geográfica disponibles públicamente según los datos necesarios por los modelos PhyFire y HDWind.
10. Elaboración de una base de datos cartográfica adaptada a las necesidades de los modelos para la provisión de datos de forma automatizada desde un sistema GIS.
11. Incorporación del modelo PhyFire ya calibrado en un sistema GIS, mediante la implementación de un *Add-in de Python* para la aplicación ArcMap, obteniendo una herramienta capaz de realizar simulaciones de incendios forestales de forma rápida, sencilla e intuitiva por usuarios no especializados.

Estas tareas han sido realizadas con éxito, integrándose el modelo PhyFire en la aplicación ArcMap junto con el modelo HDWind. La herramienta generada permite realizar la simulación de un incendio forestal utilizando el campo de viento de alta definición calculado por el modelo HDWind. Este trabajo se ha plasmado en la publicación *A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model* [75], que se resume y comenta en el Capítulo 9.

12. Validación del trabajo realizado. Se han realizado simulaciones de incendios forestales reales utilizando:
  - a) Información generada por los equipos responsables de la extinción de los mismos sobre su evolución real.
  - b) Modelo de propagación de incendios forestales PhyFire.
  - c) Modelo de campos de viento de alta definición HDWind.
  - d) Datos del escenario real obtenidos vía GIS (altimetría, tipos de combustible, etc.).
  - e) Tácticas de extinción aplicadas por los equipos especializados, concretamente las líneas de defensa.

Dicha validación se ha llevado a cabo aplicando la herramienta desarrollada a diferentes escenarios, recogidos en diferentes publicaciones y contribuciones a congresos [37, 38, 75, 5, 15].



## Capítulo 2

# Antecedentes

Un incendio forestal es una compleja combinación de energía liberada en forma de calor, debido a la reacción de combustión<sup>1</sup> en la superficie forestal, y el transporte de dicha energía hacia el combustible forestal no quemado hasta el punto de su consiguiente ignición [91].

Dependiendo del medio utilizado por el fuego para su propagación, el transporte de la energía liberada puede realizarse mediante los mecanismos de *radiación*, *conducción* o *convección*; según la transferencia de energía calorífica se realice a través del espacio sin contacto directo, por contacto directo, o a través de una masa de fluidos como el aire.

En definitiva, la propagación de un incendio forestal involucra multitud de procesos muy heterogéneos que se producen a diferentes escalas, desde la reacción de combustión del combustible forestal a escala molecular hasta los pronósticos meteorológicos en escalas de cientos de kilómetros [59]. Esta suma de procesos hace de la modelización de incendios forestales un problema muy difícil de afrontar, en cuyo desarrollo es habitual que se asuman ciertas aproximaciones, simplificaciones o suposiciones que permiten abordar el problema computacionalmente, pero que llevan a que el modelo se comporte mejor en unos escenarios u otros [67].

En la bibliografía existente se pueden encontrar modelos para la simula-

---

<sup>1</sup>**Reacción de combustión:** proceso químico de oxidación exotérmico de una sustancia o mezcla de sustancias (combustible) con oxígeno (comburente). En esta reacción es característica la formación de una llama, que es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor y que está en contacto con el combustible.

ción de incendios forestales de diferente naturaleza. A continuación se mencionan, siguiendo un creciente grado de complejidad, los principales tipos de acuerdo con su principio de funcionamiento [72, 71, 91, 92], aunque la nomenclatura varía según autores:

- Modelos empíricos: Son aquellos modelos que describen la evolución del fuego basándose en aproximaciones estadísticas calculadas a partir de la observación de incendios reales. Estos modelos tienen en común que la propagación del incendio se produce en la dirección normal al frente sin tener en cuenta ningún parámetro físico medible, calculándose la velocidad de propagación como una función escalar de parámetros locales: masa de combustible, pendiente, humedad, viento, etc. La ejecución de estos modelos es muy rápida incluso en equipos sencillos, lo que hace que sean ampliamente utilizados. En contra, tienen limitaciones en su comportamiento cuando se aplican a áreas diferentes a aquellas para las que se desarrolló inicialmente. Entre los ejemplos de este tipo de modelos se encuentran aquellos basados en las fórmulas de velocidad de avance del fuego de *Rothermel* [77], como son los modelos de *Anderson* [6], *Behave* [8], *FARSITE* [44] o *BehavePlus* [9].
- Modelos de reacción–difusión–convección o cuasifísicos: Son modelos basados en la física del problema y deducidos a partir de las leyes de conservación de la masa, la energía y el momento. En estos modelos se considera un sistema de ecuaciones en derivadas parciales correspondientes a los procesos físicos que intervienen proporcionando a su salida, además de la posición del frente, el valor de variables físicas tales como la temperatura del combustible sólido o del combustible gaseoso. El valor de estas variables puede ser contrastado mediante la realización de medidas experimentales. Estos modelos se adaptan mejor que los modelos de tipo empírico a áreas de diferentes características. Su principal limitación es el tiempo de ejecución requerido para la simulación de un incendio forestal debido a su complejidad. Entre los modelos de este tipo podemos citar: los modelos de *Albini* [3, 4], *Butler* [24] o *PhyFire* [12, 14, 41, 40], modelo sobre el que se llevará a cabo el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral.
- Modelos físicos o teóricos: Este tipo de modelos son los más sofisticados ya que representan tanto el problema físico como el problema químico de la reacción de combustión del combustible forestal y de la propagación del fuego. El inconveniente de este tipo de modelos reside en su elevada complejidad, que hace muy difícil la simulación de un escenario real en un tiempo inferior al de propagación del fuego incluso cuando se utilizan supercomputadores masivamente paralelos. Esta limitación lleva a que estos modelos sean herramientas utilizadas exclusivamente en el ámbito de investigación. Tres ejemplos de este tipo son los

---

modelos *Grishin* [48], *FIRETEC* [57, 56] o *WFDS* (Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator) [62].

En [67] se analizó en detalle una amplia variedad de modelos concluyendo que ninguno era adecuado para todos los escenarios. De igual forma que existen diferentes tipos de incendios, existen diferentes tipos de modelos enfocados a la simulación de cada uno de los tipos. Por ejemplo, atendiendo al medio por el que se propaga el incendio, los modelos para la simulación de incendios forestales pueden enfocarse a: incendios de suelo, incendios de superficie o incendios de copas. De todos ellos, los incendios de superficie son los más estudiados [71] al ser este el tipo de incendio predominante.

Durante los últimos años, el incremento de la potencia de cálculo de los equipos informáticos y la aparición de nuevas tecnologías de información espacial, especialmente de los sistemas GIS y de los sensores que permiten captar los diferentes fenómenos, proporcionan un escenario adecuado para la simulación del comportamiento del fuego. Ante este nuevo contexto, la búsqueda de aplicaciones para estas nuevas tecnologías ha intensificado el interés en la simulación de incendios forestales [91, 92, 93].

Para que la simulación de un incendio forestal sea una herramienta de utilidad en la extinción de incendios, el tiempo requerido para simular un escenario debe ser notablemente inferior al tiempo real simulado. Esta limitación ha hecho que, hasta la fecha, los modelos tradicionalmente utilizados hayan sido los modelos de tipo empírico, entre los que destacan los basados en las fórmulas de *Rothermel* [77]. Esta tendencia está viéndose alterada con el crecimiento exponencial de la potencia de los equipos de cálculo, según la *ley de Moore*<sup>2</sup> [65], lo que está convirtiendo a los modelos físicos en una seria alternativa a los tradicionales modelos empíricos de propagación de incendios forestales.

Siguiendo las ideas propuestas en [95, 32, 94, 61], el grupo de investigación SINUMCC ha desarrollado un modelo de propagación de incendios forestales de tipo cuasifísico, que ha ido evolucionando [12, 14, 41, 40] mediante la incorporación de nuevos procesos, describiéndose la última versión en [38] y detallada en la Sección 1 del Capítulo 3 de esta tesis doctoral.

En cualquier experimento llevado a cabo en un entorno real, medir todas las variables involucradas en el proceso con los niveles de precisión y exactitud requeridos por los modelos es una ardua tarea. En el caso de los incendios forestales, esta dificultad adquiere una especial magnitud, ya que las condiciones reales rara vez son conocidas y algunas variables son prácticamente imposibles de medir en la zona del propio incendio. Por otro lado,

---

<sup>2</sup>**Ley de Moore:** ley empírica formulada por *Gordon Moore* según la cual el número de transistores que caben en un circuito integrado se duplica cada dos años. En palabras simples, la tecnología tiende a multiplicar su rendimiento con el paso del tiempo.

es importante destacar que la información recuperada vía GIS, y utilizada para alimentar los modelos de simulación de incendios, puede ser parcial y/u obsoleta. Las campañas de inventariado de este tipo de datos se llevan a cabo de forma discontinua con una periodicidad de varios años y por tanto no incluyen modificaciones recientes, ya sean nuevas infraestructuras o consecuencia de fenómenos naturales. Este desconocimiento puede lastrar la estimación de la propagación del incendio forestal independientemente de la bondad o calidad del modelo empleado.

La *asimilación de datos* es una técnica utilizada para incorporar información observada sobre el entorno real en la ejecución de un modelo utilizando una estimación secuencial estadística. Esta técnica modifica el estado interno del modelo mediante la incorporación de información adicional, con el objetivo de corregir las predicciones obtenidas y conseguir resultados más realistas [36].

Aplicada a la simulación de incendios forestales, la integración de datos obtenidos de la observación de fuegos reales mediante asimilación de datos permite reducir el error acumulado en las predicciones obtenidas por el cálculo (debido tanto a la incertidumbre presente en los datos de entrada, al ajuste de los parámetros o a las simplificaciones en el propio modelo) y proporciona predicciones más realistas en los instantes siguientes. Se trata de un proceso de dos fases, predicción y corrección, que se repiten de modo alterno con el objetivo de mejorar el pronóstico del modelo.

El Filtro de Kalman, o KF (*Kalman Filter*) [55], proporciona una solución al problema de asimilación de datos apta para modelos lineales, permitiendo obtener estimaciones óptimas de un estado combinando la predicción proporcionada por un modelo con los datos experimentales obtenidos a partir de un proceso de medición ruidoso.

Debido a la alta no-linealidad de los modelos de propagación de incendios forestales, la aplicación de técnicas de asimilación de datos supone un importante desafío en el que métodos como el Filtro de Kalman no son válidos. No obstante, existen diversas variantes de este filtro que amplían su uso a problemas no lineales, entre las que destacan el EKF (*Extended Kalman Filter*) y el EnKF (*Ensembled Kalman Filter*).

El EKF [29] propone la aproximación del problema no-lineal por uno lineal seguido de la versión clásica del Filtro de Kalman. La principal limitación para su aplicación a modelos de propagación de incendios es que el EKF precisa del cálculo de las jacobianas, lo cual puede ser muy costoso. Por otra parte, el EKF también presenta limitaciones en su comportamiento en modelos fuertemente no-lineales [29], como son los modelos de propagación de incendios forestales.

El EnKF [36] combina el Filtro de Kalman con un método de Montecarlo, que consiste en la aplicación del Filtro de Kalman a un conjunto de estados obtenidos a partir de la perturbación del escenario inicial. Aplicado

---

a la simulación de incendios forestales, esta variante no siempre funciona satisfactoriamente [60]. Para solucionar estas limitaciones, en la literatura se proponen diferentes variantes aptas para los diferentes escenarios [53, 18], entre las que puede citarse el DEnKF (*Deterministic Ensemble Kalman Filter*), que destaca por sus buenos resultados en su aplicación a problemas de gran dimensión [80].

La falta de información de muchas de las variables involucradas en un incendio forestal, que mencionábamos antes, también supone una barrera para la validación de los modelos desarrollados. Como alternativa, es habitual la utilización de información procedente de mediciones realizadas sobre fuegos experimentales, ya sean a pequeña escala en lechos de combustible [63] o a gran escala en entornos forestales [10]. La utilización de información procedente de escenarios artificiales en la etapa de validación permite identificar las limitaciones de los modelos. No obstante, el uso de esta información constituye solamente parte del proceso, siendo necesario la utilización de información de incendios reales en los que el comportamiento del fuego está condicionado por su interacción con el combustible, la atmósfera y la topografía [56, 62].

Para mejorar los resultados proporcionados por un modelo, a parte de su validación, es esencial el ajuste óptimo de sus parámetros, reduciendo al mínimo posible su incertidumbre. Conocer la influencia de cada parámetro sobre las variables de salida es esencial para la fiabilidad de un modelo. El uso de técnicas de *análisis de sensibilidad global*, o GSA (*Global Sensitivity Analysis*), [82, 81] permite cuantificar la variabilidad de un modelo en términos de sus factores de entrada, a la vez que identificar aquellos más significativos sobre determinadas variables de salida.

El análisis de sensibilidad global es un método ampliamente utilizado en la validación de modelos medioambientales [25], y en particular en modelos de propagación de incendios forestales [84]. El análisis de sensibilidad global permite precisar la influencia de cada factor de entrada en cada variable de salida, permitiendo guiar los trabajos de investigación centrándose en los factores que mayor incertidumbre crean en el resultado.

La rapidez de cálculo es un factor crucial para que la simulación de un proceso como la simulación de incendios forestales sea una herramienta útil en la toma de decisiones. Para acelerar su ejecución es necesario el uso de técnicas de HPC (*High Performance Computing*), que pueden estar basadas en memoria compartida para aprovechar la capacidad de las arquitecturas multiprocesador y multinúcleo de los equipos informáticos actualmente disponibles en el mercado.

En algunos procesos, como los descritos anteriormente de asimilación de datos o análisis de sensibilidad global, el uso de técnicas de paralelización ba-

sadas en memoria compartida puede resultar insuficiente o requerir equipos altamente especializados y de elevado coste. Estos procedimientos implican la solución de un problema un número elevado de veces, cada uno de los cuales constituye un problema independiente que puede ser resuelto de forma aislada. En estos casos es posible el uso de técnicas de paralelización basadas en memoria distribuida, mediante las que es posible que un conjunto de equipos trabaje coordinadamente para resolver un único problema. Estas técnicas constituyen una herramienta altamente escalable para reducir el tiempo de simulación, en la que únicamente es necesario aumentar el número de equipos para incrementar la capacidad de cálculo, mientras que en el paradigma de memoria compartida la capacidad de cálculo está limitada por la capacidad del equipo.

El objetivo de cualquier modelo de propagación de incendios forestales es tomar como datos de partida información referente a la vegetación, la orografía del terreno, las condiciones meteorológicas, el punto de ignición y las tácticas llevadas a cabo en la lucha contra el incendio para predecir el avance del fuego a lo largo del tiempo y el espacio. Para cumplir este objetivo, la simulación del incendio forestal precisa del acoplamiento del modelo con la información espacial correspondiente al dominio de simulación, usando para ello sistemas de gestión de información espacial que se encarguen de gestionar los diferentes recursos de información geográfica utilizados como datos de entrada en el modelo y que sean capaces de visualizar sus resultados.

La combinación de modelos medioambientales y la información espacial mediante la utilización de herramientas GIS es un problema ampliamente estudiado y aplicado [88], dado que estas herramientas proporcionan el entorno necesario para la gestión de la información espacial.

Dada la naturaleza espacial de la propagación de un incendio, la utilización de GIS está muy asentada en la realización de estudios de incendios forestales [1]. Es una herramienta muy utilizada en la elaboración de mapas de riesgo [30], en el diseño de políticas de reforestación o en la propia simulación de incendios [98, 58, 97].

Para la simulación de incendios, los modelos matemáticos que resuelven el problema de la propagación del fuego en un entorno forestal se combinan con GIS de forma que los modelos obtienen la información necesaria para llevar a cabo la simulación en una determinada zona. El GIS se encarga de preparar la información de entrada para el modelo y de interpretar su salida, permitiendo visualizar sus resultados para una fácil interpretación. El objetivo final es crear aplicaciones accesibles al usuario final que constituyan un completo entorno para predecir el comportamiento del fuego.

Hasta ahora, los simuladores de incendios forestales existentes integrados en GIS se basan principalmente en modelos de tipo empírico basados en la propagación de perímetros, debido a su rapidez de ejecución. Uno de

los ejemplos más extendidos es el modelo *FARSITE* [71] desarrollado por el *U.S. Forest Service*, y basado en el sistema *BEHAVE*. *FARSITE* permite exportar sus resultados en formatos adecuados para su interpretación y análisis utilizando herramientas GIS.

A pesar de las ventajas de los modelos de tipo físico o cuasifísico, no es habitual que estos formen parte de simuladores de incendios operacionales debido a su mayor complejidad y a su, normalmente, alto coste computacional.

Para utilizar estos simuladores es necesario llevar a cabo el cartografiado digital de aquella información requerida como datos de entrada. Entre la información utilizada podemos encontrar datos ampliamente extendidos y de fácil acceso debido a su uso en otras disciplinas, como por ejemplo la orografía del terreno, y datos de interés específico en la modelización de los incendios, la información referente a la vegetación del terreno con la que se pretende identificar la inflamabilidad de los combustibles forestales.

Entre los datos de este último tipo podemos encontrar información referente a la altura, la carga, la densidad, el grosor, la capacidad calorífica o el contenido de humedad de la vegetación. Estas variables, recogidas en los inventarios forestales, representan las características de la vegetación y se utilizan para clasificar los diferentes tipos de combustibles según su comportamiento frente al fuego.

Una clasificación de la vegetación de este tipo es un aspecto básico para ayudar a decidir qué medidas de planificación adoptar durante la lucha contra incendios. Igualmente es un aspecto crítico para la modelización numérica del avance del fuego durante un incendio, ya que la distribución y características de los combustibles presentes son una de las variables que más influencia tienen en el comportamiento y en los efectos de los incendios forestales [89]. Una correcta clasificación de combustibles es fundamental para una simulación ajustada a la realidad.

Los modelos de combustible son uno de los elementos clave para explicar el comportamiento del fuego en los incendios forestales, y con ello, la posibilidad de prever cual será dicho comportamiento en una zona determinada. Rothermel, en [77], definió un modelo de combustible como un conjunto de variables de entrada para un modelo matemático de propagación de incendios, y propuso una clasificación formada por 11 modelos de combustibles distribuidos en 4 grandes grupos: pasto, matorral, hojarasca bajo arbolado y restos de operaciones selvícolas.

Posteriormente, Albini [2] redefinió estos 11 modelos y añadió 2 más, dando lugar a la conocida clasificación de 13 combustibles para el modelo de Rothermel [77]. En [7], Anderson describió detalladamente esta clasificación y estableció un criterio para su ordenación. Rothermel y Burgan [78] y Andrews [8] actualizaron los parámetros de los modelos dando lugar a la

clasificación de combustibles *BEHAVE*, que contiene 13 modelos de combustibles forestales que cubren la mayoría de los escenarios de USA (*United States of America*). Esta clasificación ha sido adoptada por algunos países, entre ellos España. Para permitir su clara identificación, el ICONA (*Instituto para la Conservación de la Naturaleza*) [51, 52] ha desarrollado una clave fotográfica para permitir su clara identificación en nuestros montes.

La clasificación *BEHAVE* presenta ciertas limitaciones, como por ejemplo que únicamente es aplicable en épocas de incendios al no considerar correctamente el contenido de humedad, no es apropiada para quemas prescritas y no contempla los incendios de copas. Para superar estas limitaciones, en [86], Scott y Burgan [86] actualizan la clasificación original de 13 combustibles incrementando el número de modelos hasta 45, distribuidos en 7 grandes grupos: pasto; pasto-matorral; matorral; hojarasca, pastizal y/o matorral bajo arbolado; hojarasca y restos bajo arbolado; abundantes restos bajo arbolado y zonas no combustibles.

## Capítulo 3

# Hipótesis de trabajo

El trabajo recogido en esta tesis doctoral se inserta dentro de una de las líneas de trabajo del grupo de investigación SINUMCC (*Simulación Numérica y Cálculo Científico*) del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Salamanca, por lo que se valdrá de los resultados de diferentes trabajos y proyectos realizados con anterioridad por miembros de este grupo.

Entre estos resultados, destacan dos modelos matemáticos para la simulación de fenómenos medioambientales:

1. El modelo cuasifísico de propagación de incendios forestales PhyFire (*Physical Forest Fire Spread*).
2. El modelo de campos de viento de alta definición HDWind (*High Definition Wind Field*).

El código que implementa estos modelos está registrado en el Registro General de la Propiedad Intelectual, con asientos registrales **00/2015/4720** y **00/2015/4721** para los modelos PhyFire y HDWind respectivamente.

Otro punto de partida es el estudio realizado por el autor de esta tesis doctoral como parte de su trabajo de fin de máster del Máster Universitario en *Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura* sobre la combinación de diferentes recursos de información geográfica con los anteriores modelos medioambientales mediante su integración en un sistema GIS, permitiendo llevar a cabo la simulación de un incendio forestal, de una forma amigable para el usuario final, dentro del territorio de Castilla y León [73].

## 1. El modelo PhyFire

El modelo de simulación de incendios forestales PhyFire es un modelo matemático de reacción-difusión-convección basado en la física del problema y que se deduce a partir de las leyes de conservación de la masa y la energía sobre la superficie donde tiene lugar el incendio, y la ecuación de radiación en la capa de aire sobre esta superficie. Se trata de un modelo de tipo cuasifísico simplificado que tiene como objetivo la simulación de la propagación del frente de fuego en un incendio forestal empleando tiempos de cálculo notablemente inferiores al tiempo real de avance del incendio, teniendo en cuenta los mecanismos de propagación del fuego más importantes, la radiación [95] y la convección [49, 96].

El modelo PhyFire es la versión más reciente de una familia de modelos de propagación de incendios forestales desarrollados por el grupo de investigación SINUMCC. Tiene su origen en un modelo físico bidimensional de dos fases [64], que ha ido evolucionando mediante la incorporación de diferentes procesos en sus diferentes versiones. En [12] se modeliza la radiación como mecanismo de transmisión de calor a través de un término de radiación local. En [41] se incorpora al modelo la influencia de la humedad del combustible y del calor absorbido durante el proceso de pirólisis, en el que se produce la descomposición química de la materia orgánica, mediante el uso de un operador multívoco que representa la entalpía. Paralelamente, en [40] se introduce la radiación no-local procedente de las llamas sobre la superficie vegetal, permitiendo al modelo captar la influencia de la inclinación de la llama debido al viento y a la pendiente del terreno en la propagación del incendio a través de la radiación.

El modelo PhyFire hace uso de técnicas numéricas avanzadas para reducir el tiempo de cálculo siempre por debajo del tiempo real simulado. Con este objetivo, se define el concepto de nodos activos para realizar el cómputo del modelo únicamente en la zona cercana al frente de fuego. Además, su implementación hace uso de técnicas de cálculo paralelo HPC basadas en memoria compartida para aprovechar toda la potencia de cálculo de las actuales arquitecturas multinúcleo.

Un modelo de este tipo podría incluir un mayor número de efectos, pero ello influiría negativamente en el tiempo de cálculo, llegando a requerir más tiempo para llevar a cabo la ejecución de una simulación que el tiempo real simulado, resultando una herramienta de poca utilidad para la toma de decisiones. Por ello, solamente se tienen en cuenta los principales procesos de propagación del fuego, en concreto, el modelo PhyFire tiene en cuenta:

1. La humedad contenida en el combustible.
2. La energía transportada por convección en el gas pirolizado.
3. La energía transportada por convección natural en la dirección vertical.

4. La inclinación de la llama debido al viento y a la pendiente del terreno.
5. La radiación de las llamas sobre la superficie en la que se propaga el fuego.

Hay que destacar que, aunque el modelo PhyFire es un modelo bidimensional, algunos de los procesos antes enumerados son tridimensionales.

En cuanto al funcionamiento del modelo, se inicia con la posición e instante de ignición del incendio; y para cada paso de tiempo de la simulación el modelo proporciona el estado (quemado, quemándose o no quemado) de cada uno de los nodos de la zona de estudio. Esto permite establecer el perímetro y la posición del frente activo del incendio a lo largo de la simulación.

El modelo tiene en cuenta la topografía de la superficie y el tipo y la carga de combustible, información proporcionada vía GIS [75]; y la información meteorológica (temperatura, humedad y viento) que puede ser obtenida de un servicio meteorológico externo o de un modelo de predicción meteorológica global como por ejemplo WRF (*Weather Research and Forecasting*) [87] o HARMONIE [19]. El viento puede considerarse un dato constante para todo el dominio de simulación o se puede ajustar de forma óptima a la superficie de estudio mediante su acoplamiento con un modelo de viento local, en concreto el modelo HDWind.

Mediante la modificación del tipo y la carga de combustible obtenido del GIS, PhyFire puede incorporar las tácticas llevadas a cabo durante la extinción del incendio para adaptar la simulación al escenario real, por ejemplo mediante la incorporación de líneas de defensa.

### 1.1. Descripción matemática del modelo

Consideremos el rectángulo  $d = [0, l_x] \times [0, l_y] \in \mathbb{R}^2$  resultado de proyectar la superficie  $S$  en la que tiene lugar la simulación. Esta superficie está definida por:

$$\begin{aligned} S : d &\mapsto \mathbb{R}^3 \\ (x, y) &\mapsto (x, y, h(x, y)) \end{aligned} \tag{1}$$

donde la función  $h(x, y)$  es una función conocida que representa la orografía del terreno  $S$ .

Las ecuaciones en derivadas parciales que gobiernan este modelo de propagación de incendios están basadas en las ecuaciones de conservación de la masa y la energía en la superficie  $S$  y en la ecuación de radiación. Una vez adimensionalizadas y simplificadas [12], las ecuaciones de este modelo son:

$$\partial_\tau e + \beta \mathbf{v} \cdot \nabla e + \alpha u = r \quad \text{en } S \quad \tau \in (0, \tau_{max}), \tag{2}$$

$$e \in G(u) \quad \text{en } S \quad \tau \in (0, \tau_{max}), \tag{3}$$

$$\partial_\tau c = -g(u)c \quad \text{en } S \quad \tau \in (0, \tau_{max}). \tag{4}$$

Tabla 1: Incógnitas del modelo PhyFire

Incógnita	Símbolo	Unidades	Variable adimensional
Temperatura del combustible sólido	$T$	$K$	$u = \frac{T-T_\infty}{T_\infty}$
Entalpía	$E$	$J m^{-2}$	$e = \frac{E}{MCT_\infty}$
Carga de combustible	$M$	$kg m^{-2}$	$c = \frac{M}{M_0}$
Intensidad de radiación	$I$	$J s^{-1} m^{-2} sr^{-1}$	$i = \frac{I[t]}{MCT_\infty}$
Radiación térmica	$R$	$J s^{-1} m^{-2}$	$r = \frac{[t]}{MCT_\infty} R$

donde las incógnitas entalpía adimensional  $e = \frac{E}{MCT_\infty}$ , temperatura adimensional del combustible sólido  $u = \frac{T-T_\infty}{T_\infty}$  y fracción másica del combustible sólido  $c = \frac{M}{M_0}$ ; son variables definidas en  $S \times (0, \tau_{max})$ , siendo  $\tau_{max}$  el tiempo de estudio adimensionalizado  $\tau_{max} = \frac{t_{max}}{[t]}$ . Estas incógnitas provienen de las variables físicas de entalpía  $E$  ( $J m^{-2}$ ), temperatura del combustible sólido  $T$  ( $K$ ) y carga de combustible sólido  $M$  ( $kg m^{-2}$ ), respectivamente, recogidas en la Tabla 1.

Para su configuración, el modelo PhyFire depende de un número reducido de parámetros: el coeficiente medio de absorción de la radiación  $a$  ( $m^{-1}$ ), el coeficiente de convección natural adimensional  $\alpha = \frac{H[t]}{MC}$  (siendo  $H$  ( $J s^{-1} m^{-2} K^{-1}$ ) el coeficiente de convección natural) y el factor de corrección del término convectivo  $\beta$ , recogidos en la Tabla 2.

El factor de corrección  $\beta$  proviene de que el modelo PhyFire es un modelo de una fase (contempla únicamente la fase sólida) fruto de la simplificación de un modelo de dos fases (fase sólida y fase gaseosa). A través de este factor de corrección, el modelo incorpora la energía de la fase gaseosa [74].

Al tratarse de un modelo de tipo cuasifísico no modeliza los aspectos químicos del proceso, debiendo incorporar una familia de variables que permitan estimar la magnitud de la energía liberada durante la reacción de combustión, y que será transferida a los combustibles colindantes para la propagación del incendio. Estas variables de entrada ( $F$ ,  $C$ ,  $M_0$ ,  $M_v$ ,  $T_f$ ,  $T_p$  y  $t_{1/2}$ ), recogidas en la Tabla 3, dependen del tipo de combustible y representan las propiedades de la vegetación del terreno.

La temperatura de referencia, denotada por  $T_\infty$  ( $K$ ), está relacionada con la temperatura ambiente a una distancia suficientemente lejana al fuego como para que este no influya, de forma que  $T \geq T_\infty$  garantiza que  $u \geq 0$ .

Una importante simplificación del modelo PhyFire es que únicamente

Tabla 2: Parámetros del modelo PhyFire

Parámetro	Símbolo	Unidades
Coefficiente medio de absorción de la radiación	$a$	$m^{-1}$
Coefficiente de convección natural adimensional	$\alpha = \frac{H[t]}{MC}$	—
Factor de corrección del término convectivo	$\beta$	—

Tabla 3: Variables de entrada del modelo PhyFire

Variable de entrada	Símbolo	Unidades
Escala espacial	$[l]$	$m$
Escala temporal	$[t]$	$s$
<i>Independientes del tipo de combustible</i>		
Viento	$\mathbf{v}$	$m s^{-1}$
Temperatura de referencia	$T_{\infty}$	$K$
Altura de la superficie	$h$	$m$
Calor latente de evaporación del agua	$\Lambda_v$	$\Lambda_v = 2,25 \times 10^6$ $J kg^{-1}$
Constante de <i>Stefan-Boltzmann</i>	$\sigma$	$\sigma = 5,6704 \times 10^{-8}$ $J s^{-1} m^{-2} K^{-4}$
<i>Dependientes del tipo de combustible</i>		
Longitud de la llama	$F$	$m$
Capacidad calorífica del combustible sólido	$C$	$J K^{-1} kg^{-1}$
Carga inicial de combustible	$M_0$	$kg m^{-2}$
Contenido de humedad del combustible	$M_v$	$\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ combustible seco}}$
Temperatura de la llama	$T_f$	$K$
Temperatura de pirólisis	$T_p$	$K$
Tiempo de vida medio del combustible	$t_{1/2}$	$s$

tiene en cuenta la fase sólida del proceso de combustión, lo que significa que la fracción másica del combustible sólido  $c$  es una variable adimensional limitada entre 0 y 1, y que la temperatura adimensional del combustible sólido  $u$  está limitada por  $u_p$ , la temperatura adimensional de pirólisis. La fase gaseosa está parametrizada a través de la temperatura de la llama  $T_f$  y de la altura de la llama  $F$  en el término de radiación.

En la resolución del problema se asume que la superficie  $S$  es suficientemente grande para asegurar que el fuego no llega a la frontera del dominio de simulación durante el tiempo en estudio  $(0, \tau_{max})$ , con lo que el problema se completa con las condiciones de contorno de *Dirichlet* homogéneas y las siguientes condiciones iniciales:

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y) \quad \text{en } S, \quad (5)$$

$$c(x, y, 0) = c_0(x, y) \quad \text{en } S. \quad (6)$$

que contienen la información referente al punto de ignición ( $u_0$ ) y a la carga inicial del combustible ( $c_0$ ). Mediante la modificación de estas condiciones iniciales es posible incluir en la resolución del modelo las tácticas llevadas a cabo en la lucha contra el fuego, como por ejemplo las líneas de defensa que se representan con  $c_0 = 0$ .

En la Ecuación (2), el término convectivo  $\beta \mathbf{v} \cdot \nabla e$  representa la energía transportada por convección en el gas pirolizado. La velocidad del viento  $\mathbf{v}$  en la superficie puede ser una variable de entrada o puede calcularse mediante un modelo de simulación de campos de viento, como el modelo HDWind (ver Sección 3 para más detalles sobre su acoplamiento). Esta velocidad de viento en la superficie  $\mathbf{v}$  se escala por el factor de corrección  $\beta \propto \frac{(MCT)_{llama}}{(MCT)_{combustible\ solido}}$ .

El término  $\alpha u$  representa la energía transportada por convección natural en la dirección vertical.

El segundo miembro de la Ecuación (2),  $r$ , describe la radiación térmica que incide sobre la superficie  $S$  procedente de las llamas.

$$r = \frac{[t]}{MCT_\infty} R \quad (7)$$

La energía o radiación térmica incidente,  $R$ , sobre un punto cualquiera  $\mathbf{x} = (x, y, h(x, y))$  de la superficie  $S$ , debido a la radiación procedente de la llama por unidad de tiempo y por unidad de área, se obtiene sumando la intensidad de radiación procedente de todas las direcciones  $\Omega$  según la siguiente integral:

$$R(\mathbf{x}) = \int_{\omega=0}^{2\pi} I(\mathbf{x}, \Omega) \Omega \cdot \mathbf{N} \, d\omega, \quad (8)$$

en la que únicamente se ha considerado el hemisferio situado sobre la capa de combustible pues la radiación proviene de las llamas sobre la superficie. El ángulo sólido se representa con  $w$  y el vector normal a la superficie  $S$  mediante  $\mathbf{N}$ . La intensidad de radiación se representa por  $I$  y es la suma de la energía radiada en las diferentes longitudes de onda. La intensidad de radiación  $I$  en una determinada dirección  $\Omega$  puede calcularse a partir de la ecuación diferencial de radiación:

$$\frac{dI}{ds} + a(s)I(s) = a(s)I_b(s) \quad (9)$$

donde  $a$  es el coeficiente de absorción de la radiación dentro de la llama e  $I_b$  es la intensidad de radiación total emitida por un cuerpo negro y dada por la *ley de Stefan-Boltzmann*. La potencia de emisión de un cuerpo negro en las diferentes longitudes de onda da lugar a:

$$I_b = \frac{\sigma}{\pi} T^4, \quad (10)$$

donde  $\sigma$  es la constante de *Stefan-Boltzmann*, cuyo valor es  $\sigma = 5,670373 \times 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  y la temperatura  $T$  alcanza la temperatura de la llama  $T_f$ , dependiente de cada tipo de combustible.

En la Ecuación (3) aparece el operador  $G(u)$ , que es un operador multívoco que representa la entalpía, dado por:

$$G(u) = \begin{cases} u & \text{si } u < u_v, \\ [u_v, u_v + \lambda_v] & \text{si } u = u_v, \\ u + \lambda_v & \text{si } u_v < u < u_p, \\ [u_p + \lambda_v, \infty] & \text{si } u = u_p, \end{cases} \quad (11)$$

que relaciona la temperatura y la entalpía, y que permite evaluar los efectos del contenido de humedad en el combustible sólido y de la energía consumida durante el proceso de pirólisis. En la zona quemada, este operador no representa exactamente el fenómeno físico debido a que la humedad ya no está presente en el medio poroso. Este problema se solventa mediante el ajuste del calor latente de evaporación  $\lambda_v = 0$  en la zona quemada.

El segundo miembro de la Ecuación (4),  $-g(u)c$ , representa la pérdida de combustible sólido durante la combustión. De esta forma, la pérdida de combustible sólido es nula por debajo de la temperatura de pirólisis y permanece constante cuando esta se alcanza:

$$g(u) = \begin{cases} 0 & \text{si } u < u_p, \\ \gamma & \text{si } u = u_p, \end{cases} \quad (12)$$

Esta constante  $\gamma$ , es inversamente proporcional al tiempo de vida medio de cada tipo de combustible:

$$\gamma = \frac{\log 2[t]}{t_{1/2}} \quad (13)$$

## 1.2. Métodos numéricos

Para que el modelo PhyFire sea de utilidad en la toma de decisiones, el tiempo requerido para la simulación de un incendio forestal debe ser inferior al tiempo real.

Con el objetivo de obtener una aproximación de forma eficiente se ha trabajado en dos líneas: el desarrollo de técnicas numéricas avanzadas y el uso de nodos activos:

1. Las ecuaciones asociadas al modelo PhyFire se discretizan combinando un método de elementos finitos de tipo *P1* sobre una malla regular en el espacio, y diferentes esquemas de diferencias finitas en el tiempo. En concreto, para el término convectivo se utiliza el método de características. El operador multívoco asociado a la entalpía se discretiza mediante su aproximada de Yosida y la ecuación de radiación se integra exactamente asumiendo una llama rectangular para una llama vertical, o rectangular a trozos para una llama inclinada [38].
2. Por otro lado, únicamente se resuelven las ecuaciones del modelo PhyFire en un entorno próximo a la zona activa del incendio, definiendo para ello un conjunto de nodos activos en cada instante de tiempo. De esta forma se evita resolver las ecuaciones en aquellos puntos en los que se espera que la solución no varíe, reduciendo el tiempo de cómputo [38].

## 2. El modelo HDWind

El objetivo de este modelo es proporcionar un campo de viento tridimensional (3D) en la capa de aire situada sobre la superficie de estudio, resolviendo para ello únicamente ecuaciones lineales bidimensionales (2D).

Su origen se encuentra en [13], donde se plantea el acoplamiento de un modelo de propagación de incendios forestales con un modelo de campos de viento, de modo que el modelo de campos de viento pueda incorporar la distribución de temperatura en la superficie para considerar los efectos térmicos del fuego sobre el viento local. Los detalles de cómo surge este modelo a partir de la aproximación asintótica de las ecuaciones de *Navier-Stokes* se tratan en [14]. En [42] el campo de viento obtenido por el modelo se ajusta a varias medidas de viento  $\mathbf{v}_m$  obtenidas en diferentes puntos del dominio tridimensional. Este ajuste requiere la resolución de un problema de control óptimo en el cual el flujo de viento sobre la frontera del dominio

de estudio es el elemento de control. En [26] se utiliza un método de bases reducidas para permitir la resolución más eficiente del problema de control óptimo antes mencionado.

El modelo surge como una aproximación asintótica de las ecuaciones de *Navier-Stokes*, donde la hipótesis fundamental es que las dimensiones horizontales del dominio son mucho mayores que la dimensión vertical. Desde el punto de vista práctico, esta relación entre las dimensiones del dominio siempre se satisface. Además, el modelo incluye otras tres simplificaciones importantes:

1. Se desprecian los términos no lineales de las ecuaciones de *Navier-Stokes*.
2. Se asume que la temperatura del aire decrece linealmente con la altura.
3. Se desprecia la compresibilidad del aire.

Entre los efectos que tiene en cuenta el modelo HDWind, destacan:

1. Las fuerzas de empuje.
2. La pendiente del terreno.
3. La rugosidad del terreno.
4. La conservación de la masa.

Con todo ello, el modelo HDWind permite reflejar:

1. Los efectos locales de la orografía del terreno.
2. Los efectos locales debidos a gradientes de temperatura en la superficie.

Todo esto permite modelizar brisas, corrientes de ladera y la influencia del efecto térmico de los incendios forestales sobre en el viento meteorológico.

Concluyendo, el modelo de campos de viento de alta definición HDWind proporciona un campo de velocidades de viento en un dominio tridimensional localizado por encima de la superficie de estudio a partir de medidas meteorológicas puntuales. El modelo tiene en cuenta la orografía del terreno y el gradiente de la temperatura en la superficie y su resolución solamente involucra ecuaciones bidimensionales.

### 2.1. Descripción matemática del modelo

Consideremos nuevamente el rectángulo  $d \in \mathbb{R}^2$ , sobre el que se define la superficie  $S$ :

$$\begin{aligned} S : d &\mapsto \mathbb{R}^3 \\ (x, y) &\mapsto (x, y, h(x, y)) \end{aligned} \tag{14}$$

y que resulta de proyectar la superficie del terreno  $S$ , donde  $h(x, y)$  representa la orografía del terreno  $S$ .

Consideremos también el siguiente dominio tridimensional, que representa la capa de aire sobre la superficie  $S$ , a estudiar:

$$D = \{(x, y, z) : x, y \in d, \quad h(x, y) < z < \delta\}, \quad (15)$$

donde  $\delta$  es la altura por encima de la cual la temperatura en la superficie y la topografía del terreno no tienen efecto alguno sobre el viento. Las superficies  $S$  y  $A$  representan respectivamente las fronteras inferior ( $z = h(x, y)$ ) y superior ( $z = \delta$ ) de este dominio tridimensional  $D$ .

Teniendo en cuenta que el grosor  $\delta$  del dominio  $D$  es significativamente pequeño comparado con su anchura, es posible deducir (ver [13]) que el viento en el dominio  $D$  se rige por:

$$-\partial_{zz}^2 \mathbf{V} + \nabla_{xy} P = 0 \quad \text{en } D, \quad (16)$$

$$\partial_z P = \lambda T \quad \text{en } D, \quad (17)$$

$$\nabla_{xy} \cdot \mathbf{V} + \partial_z W = 0 \quad \text{en } D, \quad (18)$$

donde  $\mathbf{V} = (V_1, V_2)$  son las componentes horizontales del viento,  $W$  la componente vertical,  $P$  el potencial de viento,  $T$  la temperatura y  $\lambda$  está relacionado con el número de Grashof<sup>1</sup> y las fuerzas de empuje.

Trabajando de modo similar (ver [13]), se puede concluir que las condiciones de contorno del modelo son:

$$\partial_z \mathbf{V} = \zeta \mathbf{V}, \quad (\mathbf{V}, \mathbf{W}) \cdot \mathbf{N} = 0, \quad \text{en } S, \quad (19)$$

$$\partial_z \mathbf{V} = 0, \quad W = 0, \quad \text{en } A, \quad (20)$$

$$\bar{\mathbf{V}} \cdot \boldsymbol{\eta} = (\delta - h) \mathbf{v}_m \cdot \boldsymbol{\eta} \quad \text{en } \partial d \quad (21)$$

donde  $\mathbf{N}$  y  $\boldsymbol{\eta}$  son los vectores normales unitarios a  $\partial D$  y  $\partial d$  respectivamente y  $\mathbf{v}_m$  es la componente horizontal del viento meteorológico, no dependiente de la dimensión vertical.  $\bar{\mathbf{V}}$  es el flujo de viento horizontal en el punto  $(x, y) \in S$  en el instante  $\tau$ , y está definido por:

$$\bar{\mathbf{V}}(\tau, x, y) = \int_{h(x, y)}^{\delta} \mathbf{V}(\tau, x, y, z) dz. \quad (22)$$

Asumiendo que la temperatura del aire decrece linealmente con la altura hasta la frontera superior  $A$ , mediante la integración analítica de la Ecuación (17) se reduce el problema (16)-(17)-(18) a la resolución del siguiente problema asintótico bidimensional:

$$-\nabla_{xy} \cdot (a \nabla_{xy} p) = \nabla_{xy} \cdot (b \nabla_{xy} t) \quad \text{en } d, \quad (23)$$

$$a \nabla_{xy} p \cdot \boldsymbol{\eta} = -b \nabla_{xy} t \cdot \boldsymbol{\eta} + v \quad \text{sobre } \partial d, \quad (24)$$

<sup>1</sup>El número de Grashof ( $Gr$ ) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos y que es proporcional al cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido.

donde el potencial de viento  $p$  depende exclusivamente de las dos primeras componentes espaciales  $(x, y)$  y del instante de tiempo  $\tau$ ;  $t = \frac{\lambda t_s(x, y)}{\delta - h(x, y)}$  es la temperatura bidimensional reescalada, relacionada con la temperatura  $t_s(x, y)$  en la superficie  $S$ ; y

$$v = v(\tau, x, y) = (\delta - h(x, y)) \mathbf{v}_m(\tau, x, y) \cdot \boldsymbol{\eta} \quad (25)$$

es el flujo horizontal sobre  $\partial d$ .

De la Ecuación (16) junto con las condiciones iniciales (19) y (20), se obtiene la siguiente ecuación para el viento horizontal:

$$\mathbf{V}(x, y, z) = m(x, y, z) \nabla_{xy} p(\tau, x, y) + n(x, y, z) \nabla_{xy} t(\tau, x, y) \quad (26)$$

siendo  $v(x, y) = V(x, y, 0)$  el valor utilizado en el término convectivo del modelo PhyFire (ver Ecuación (2)).

Las funciones  $a$ ,  $b$ ,  $m$  y  $n$  dependen de  $\delta$ ,  $h(x, y)$  y de  $\xi$ , el inverso del coeficiente de fricción  $\zeta$  ( $\xi = \frac{1}{\zeta}$ ). En la práctica [42],  $\xi$ , se define en términos de la rugosidad del terreno  $z_0$  ( $m$ ) (ver Tabla 5).

$$a = a(x, y) = \frac{1}{3}(\delta - h(x, y))^2(3\xi + \delta - h(x, y)), \quad (27)$$

$$b = b(x, y) = \frac{1}{30}(\delta - h(x, y))^2 \left( 2\delta^2(2\delta + 5\xi) - 2\delta(\delta - 5\xi)h(x, y) - (3\delta + 5\xi)h^2(x, y) + h^3(x, y) \right), \quad (28)$$

$$m(x, y, z) = \frac{1}{2}z^2 - \delta z - \frac{1}{2}h^2(x, y) + (\delta + \xi)h(x, y) - \xi\delta, \quad (29)$$

$$n(x, y, z) = -\frac{1}{24}z^4 + \frac{1}{6}\delta z^3 - \frac{1}{3}\delta^3 z + \frac{1}{24}h^4(x, y) - \frac{1}{6}h^3(x, y)(\delta + \xi) + \frac{1}{2}\xi\delta h^2(x, y) + \frac{1}{3}\delta^3 h(x, y) - \frac{1}{3}\xi\delta^3, \quad (30)$$

Resumiendo, la solución del modelo HDWind requiere la resolución del problema de contorno bidimensional definido por las ecuaciones (23) y (24) y a continuación calcular explícitamente el viento  $\mathbf{V}(x, y, z)$  utilizando la expresión (26).

Todas las incógnitas, parámetros y variables de entrada implicados en el modelo HDWind están recogidas en la Tabla 4. El modelo depende exclusivamente de un único parámetro, el coeficiente de fricción  $\zeta$ , que está relacionado con la rugosidad del terreno  $z_0$  según la clasificación de Davenport [33] (ver Tabla 5).

Tabla 4: Incógnitas, parámetros y variables de entrada del modelo HDWind

-	Símbolo	Unidades
<i>Incógnitas</i>		
Velocidad de viento	$\mathbf{V}$	$m s^{-1}$
Potencial de viento	$P$	$s^{-1}$
<i>Parámetros</i>		
Coefficiente de fricción	$\zeta$	—
<i>Variables no dependientes del uso de suelo</i>		
Componente horizontal de viento meteorológico	$\mathbf{v}_m$	$m s^{-1}$
Temperatura en la capa de aire	$T$	$K$
Altura de la superficie	$h$	$m$
<i>Variables dependientes del uso de suelo</i>		
Rugosidad de la superficie	$z_0$	$m$

Tabla 5: Clasificación de Davenport de rugosidad de la superficie [33]

$z_0$ (m)	Nombre	Descripción
0,0002	Mar	Mar abierto o lagos, llanuras cubiertas de nieve, desierto, grandes superficies asfaltadas u hormigonadas.
0,005	Suave	Suelos desnudos: playas, superficies cubiertas de hielo, marismas.
0,03	Abierto	Suelos con poca vegetación y obstáculos aislados: pastos, brezales, páramos, superficies rugosas cubiertas de hielo, pistas de aterrizaje.
0,10	Semi-abierto	Suelos con baja cubierta vegetal (cultivos o natural) y obstáculos ocasionales: setos bajos, edificios bajos aislados o árboles.
0,25	Áspero	Suelos con alta cubierta vegetal y obstáculos dispersos: claros de bosques, edificios.
0,5	Muy áspero	Suelos con densa vegetación y con bastantes obstáculos de tamaño considerable: matorrales, huertos, bosques, urbanizaciones.
$\geq 2$	Caótico	Centros de ciudad con edificios bajos y altos intercalados; superficies forestales con altura irregular y muchos claros.

## 2.2. Problema de control óptimo

El modelo HDWind requiere conocer el flujo horizontal de viento  $v$  a través de  $\partial d$ , normalmente desconocido. Sin embargo, es posible realizar medidas de viento meteorológico, incluyendo tanto la intensidad como la dirección, en un número finito de puntos sobre la superficie  $S$ , pongamos los puntos donde se encuentran situadas las estaciones meteorológicas.

En [42] se propone un método para resolver el problema bidimensional planteado en las Ecuaciones (23) y (24) como un problema de control óptimo: dadas  $n$  medidas experimentales de la velocidad de viento  $\mathbf{v}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , tomadas en  $n$  puntos  $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1 \dots n$ , se busca un valor de  $v$ , solución de las ecuaciones (23) y (24), de modo que los valores  $\mathbf{V}(x_i, y_i, z_i)$  calculados según la Ecuación (26) sean tan próximos como sea posible a las medidas experimentales  $\mathbf{v}_i$ .

## 2.3. Métodos numéricos

El problema de control óptimo se discretiza utilizando el método de elementos finitos de tipo  $P1$ . Esta discretización implica la resolución de un sistema de ecuaciones no simétrico y mal condicionado en el que el número de ecuaciones puede llegar a ser muy elevado.

Por ello, en [20] se propone un método iterativo GMRES (*Generalized Minimal RESidual*) preconditionado [79] para la solución numérica del sistema de ecuaciones, que se divide en una estructura de bloques  $2 \times 2$ . El método propuesto se combina con métodos directos de resolución basados en la *factorización LU* por bloques de la diagonal.

A fin de acelerar los cálculos computacionales, en [26] se utiliza un método de bases reducidas. La aplicación de este método se divide en dos etapas:

1. Etapa *offline*, se construye un espacio de dimensión reducida del espacio de discretización. Esta etapa tiene alto coste computacional, pero se realiza una única vez.
2. Etapa *online*, que utiliza el espacio creado durante la etapa *offline* para aproximar rápidamente la solución del modelo. Esta etapa, posterior a la etapa *offline*, permite realizar los cálculos en tiempo real.

## 3. Acoplamiento PhyFire–HDWind

Es bien conocido que el viento es un aspecto crucial en la evolución de los incendios [21], aportando oxígeno y desecando el combustible. Por otro lado, las altas temperaturas provocadas en un incendio pueden modificar localmente el viento meteorológico causando corrientes convectivas de efectos devastadores. Por ello, parece fundamental disponer de modelos que permitan el acoplamiento de ambos fenómenos.

Como ya se ha avanzado, el modelo PhyFire tiene en cuenta la influencia del viento en dos ámbitos. Por un lado, a través del término convectivo y, por otro lado, a través de la inclinación de la llama, que afecta a la radiación.

En cuanto al modelo HDWind, comentar de nuevo, que fue diseñado para incluir efectos térmicos en la superficie de estudio que pueden modificar localmente el campo de viento.

Estos dos modelos se han desarrollado e implementado con el objetivo de ser acoplados y su realimentación permite reflejar los fenómenos mencionados.

## 4. Integración en GIS

El trabajo *Asimilación de datos en un modelo de incendios forestales e integración en GIS* [73], que constituye el trabajo de fin de máster del autor de esta tesis doctoral, presenta el estudio de diferentes recursos de información geográfica disponibles públicamente y cómo pueden aprovecharse para alimentar el modelo medioambiental PhyFire.

Dentro de este estudio se seleccionan y comentan algunos de los recursos encontrados que pueden proporcionar información útil para la simulación de un incendio forestal utilizando el modelo PhyFire. Una vez seleccionados, se trabaja en su adaptación dentro de la región de Castilla y León (España), para facilitar la adquisición de datos durante la simulación.

El objetivo principal de ese trabajo fue la automatización de la adquisición y procesamiento de la información espacial (orografía, vegetación, ...) necesaria para la ejecución del modelo PhyFire, la ejecución de la simulación y el posprocesamiento de la información resultante para su visualización sobre un mapa de fácil comprensión.

Este objetivo dio lugar a la elaboración de un *Add-in de Python* que permitía la simulación de incendios forestales dentro del territorio de Castilla y León. Se trataba en definitiva de la primera versión de la integración en GIS del modelo PhyFire, cuya versión final es uno de los objetivos de esta tesis doctoral.

## Capítulo 4

# Resultados

El trabajo recogido en esta tesis doctoral ha dado lugar a la creación de un simulador que integra el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire y el modelo de campos de viento de alta definición HDWind. Esto hace que sea uno de los primeros simuladores de incendios forestales basados en un modelo cuasifísico, capaz de competir en tiempo de ejecución con los modelos empíricos tradicionales, y que además está integrado en un GIS.

Para su desarrollo, se ha trabajado en el uso de nuevas herramientas que mejoren la eficiencia, aplicabilidad y utilidad del modelo cuasifísico original descrito en el capítulo *Hipótesis de trabajo*. Se ha trabajado en su **validación** mediante la simulación tanto de fuegos experimentales como de incendios reales. Los fuegos experimentales se propagan en condiciones estables y conocidas, y la documentación exhaustiva de su avance [63] permite la comparación precisa con la salida de la simulación del modelo PhyFire. Por otra parte, la simulación de incendios reales permite evaluar la interacción del incendio con otros factores (topografía, combustibles, atmósfera, etc.) ausentes en los ensayos de laboratorio.

La simulación de fuegos experimentales ha sido utilizada para realizar un **análisis de sensibilidad global** del modelo, con el que se ha cuantificado la variabilidad presente en la salida del modelo debido a cada uno de sus factores de entrada. El análisis de sensibilidad global ha permitido la identificación de los factores de entrada, ya sean variables para la caracterización de un escenario de simulación o parámetros para la configuración del modelo, que

más influyen en ciertos factores de salida, concretamente la velocidad de avance del fuego (*RoS - Rate of Spread*) y la profundidad del frente de llama (*FTH - Fire Thickness*). Los resultados obtenidos de este análisis muestran que el modelo PhyFire refleja correctamente la importancia del mecanismo de propagación por radiación en condiciones donde el viento no es importante, así como la importancia de la convección en presencia de viento.

La determinación de la influencia de cada factor de entrada ha permitido el diseño de una estrategia adecuada para el **ajuste sus parámetros**. Utilizando **métodos de optimización iterativos**, en los que la función de coste compara la salida del modelo con las medidas realizadas sobre fuegos experimentales llevados a cabo en laboratorio [63], se ha aproximado el valor de los parámetros, esto es  $a$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ . En los diferentes escenarios experimentales reproducidos mediante el modelo PhyFire, se han obtenido valores del mismo orden para cada uno de los parámetros. Este resultado valida la adecuación del modelo para reproducir fuegos experimentales similares a los estudiados, al permitir utilizar una única configuración común de sus parámetros para todos los escenarios.

Además, la simulación de incendios reales utilizando información proporcionada por los equipos de extinción sobre el avance de los mismos e información del entorno extraída vía GIS, muestra unos resultados acordes a la evolución real del incendio. Esta concordancia ha sido evaluada utilizando índices de similitud ideados con este propósito [43], obteniendo valores para estos índices altamente positivos.

Entre los incendios en cuya simulación se han aplicado las herramientas desarrolladas, destacan:

- Serradilla del Llano (Salamanca, España), ocurrido en septiembre del año 2012. Los resultados de la simulación de este incendio se recogen en la publicación *A simplified wildland fire model applied to a real case* [37], recogida en el Apéndice C.
- Osoño (Ourense, España), ocurrido en agosto del año 2009. Los resultados de la simulación de este incendio pueden verse en [75], que se resume y comenta en el Capítulo 9.
- Cardona (Barcelona, España), ocurrido en julio del año 2005. Los resultados de la simulación de este incendio están recogidos en el trabajo *GIS-integrated environmental models* [15], presentado en el XXV Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones (XXV CEDYA) / XV Congreso de Matemática Aplicada (XV CMA).
- Parque Nacional de Doñana (Huelva, España), ocurrido en junio del año 2017.
- Arroyo de San Serván (Badajoz, España), ocurrido en julio del año 2017.

Para su difusión, los resultados de la simulación de algunos de estos incendios están disponibles en Internet. Estos escenarios pueden ser visitados mediante el escaneo de los *códigos QR* de la Figura 5 o mediante los enlaces proporcionados en su pie de foto.



Figura 5: Simulación de incendios forestales reales.

La simulación de un incendio forestal real debe enfrentar una serie de barreras derivadas del desconocimiento o falta de precisión de toda la información necesaria para llevar a cabo su simulación. Entre estas barreras caben destacar la incertidumbre sobre la ubicación del foco del incendio en sus primeros instantes de propagación, los efectos meteorológicos locales, la estacionalidad de los combustibles forestales o la actualidad de la cartografía utilizada para obtener la información necesaria para llevar a cabo la simulación.

Para superar estas barreras, dentro del trabajo recogido en esta tesis doctoral se encuentra la incorporación de datos experimentales mediante técnicas de **asimilación de datos** basadas en el empleo del Filtro de Kalman. El procedimiento utilizado permite integrar en la simulación del incendio forestal las observaciones realizadas durante la evolución real de un incendio, que pueden estar distorsionadas por errores propios al proceso de medición, para proporcionar predicciones más realistas en los instantes siguientes al combinar los resultados de la simulación con los datos observados.

Este procedimiento ha sido aplicado a la simulación de un incendio real, utilizando como datos observados la evolución del perímetro y la posición de los frentes de fuego. Los resultados obtenidos empleando asimilación de datos muestran que el procedimiento propuesto ha permitido eliminar la incertidumbre existente inicialmente respecto a la ubicación de la posición del foco inicial o a la variabilidad de las condiciones climatológicas.

Para mejorar la usabilidad por parte de usuarios ajenos a la complejidad de los modelos matemáticos medioambientales HDWind y PhyFire, se ha

trabajado en su **integración en GIS** y el desarrollo de una cartografía que permita llevar a cabo simulaciones de forma sistemática en todo el territorio nacional.

Con la integración en GIS de estos modelos, se ha creado una herramienta que mejora su eficiencia al disminuir el tiempo necesario para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal o de un campo de viento gracias a la automatización de todo el proceso. La integración de los modelos matemáticos HDWind y PhyFire en el GIS se ha llevado a cabo a través de la elaboración de un *Add-in de Python* que extiende la funcionalidad de la aplicación ArcMap de Esri, utilizando el lenguaje de programación Python y la librería ArcPy para su implementación.

La herramienta desarrollada contempla todas las etapas de simulación, incluyendo el preprocesado de las condiciones iniciales, la extracción de la información cartográfica, la ejecución de los modelos HDWind y PhyFire y el posprocesado de los resultados obtenidos para su visualización.

Para simplificar el proceso de adquisición de la información espacial durante la etapa inicial de la simulación, se ha elaborado una base de datos cartográfica que incorpora toda la información espacial necesaria para llevar a cabo simulaciones utilizando los modelos HDWind y PhyFire: orografía, modelos de combustibles y distribución de combustibles.

Paralelamente, para reducir el tiempo de cómputo necesario en todos los procedimientos propuestos, se ha trabajado en el uso de técnicas de computación HPC que permiten aprovechar toda la capacidad de los equipos informáticos.

En concreto, se ha trabajado en el uso de técnicas de paralelización basadas en memoria compartida, con las que ha mejorado el aprovechamiento de las arquitecturas *multicore* de los actuales procesadores. Particularmente, para aplicar este tipo de paralelización se ha hecho uso del API OpenMP (*Open Multi-Processing*) para acelerar el cálculo de la radiación en el modelo PhyFire, calculándose de forma simultánea la radiación en cada una de las direcciones.

Para simular procesos que requieren un número elevado de simulaciones, como la simulación de cada uno de los estados dentro del procedimiento de asimilación de datos, o del elevado número de ejecuciones del modelo para llevar a cabo el análisis de sensibilidad global, también se han utilizado técnicas de paralelización basadas en memoria distribuida. En concreto se ha utilizado la implementación de MPI MPICH3.

Estos resultados se encuentran recogidos en tres publicaciones, que han superado para su publicación los correspondientes procesos de evaluación crítica y revisión por parte de expertos internacionales de trayectoria reconocida. En la segunda parte de esta tesis doctoral, *Publicaciones*, se incluyen los artículos asociados, junto con un resumen en castellano en el cual se especifican los objetivos, la metodología seguida y los resultados alcanzados.



## Capítulo 5

# Conclusiones y líneas de investigación futuras

Este capítulo recoge las principales conclusiones alcanzadas tras la investigación llevada a cabo durante la elaboración de esta tesis doctoral. Del mismo modo, se proponen una serie de líneas de trabajo, derivadas de los resultados obtenidos, como desarrollos futuros.

### 1. Conclusiones

El trabajo desarrollado en esta tesis doctoral está enfocado a la creación de nuevas herramientas que contribuyan a la conservación de nuestros bosques frente a los incendios forestales a través de su simulación. Para ello, este trabajo se ha basado en el modelo de simulación de incendios forestales PhyFire y en el modelo de campos de viento de alta definición HDWind, ambos desarrollados por el grupo de investigación SINUMCC del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Salamanca.

Partiendo de los modelos antes mencionados, las contribuciones más importantes del autor en esta tesis doctoral pueden resumirse en:

1. Utilizar técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo del Filtro de Kalman, y en concreto del DEnKF, para incorporar datos reales en la simulación de un incendio forestal mediante el modelo PhyFire. La utilización de las observaciones permite obtener predicciones más

realistas en los instantes siguientes.

2. Llevar a cabo un análisis de sensibilidad global del modelo PhyFire para su validación y para la identificación de aquellos factores de entrada más influyentes en determinadas variables de salida, en particular la velocidad de avance del fuego *RoS* y la profundidad del frente de llama *FTH*. La cuantificación de la importancia de cada factor de entrada ha permitido diseñar de forma óptima el procedimiento de ajuste de los parámetros del modelo.
3. Llevar a cabo la estimación de los parámetros del modelo PhyFire a partir de las medidas experimentales tomadas bajo condiciones controladas en un laboratorio, recogidas en la bibliografía, y el uso de métodos de optimización iterativos multivariable.
4. Construir una base de datos cartográfica de ámbito nacional que contenga toda la información necesaria para alimentar los modelos PhyFire y HDWind, permitiendo su aplicación a cualquier punto del territorio nacional. Esta base cartográfica incorpora tres mapas, un modelo digital de elevación, un mapa de distribución de combustibles con información de los puntos en los que no hay combustible forestal, y un mapa de modelos de combustibles. Estos mapas se han generado mediante la selección y el procesamiento de diversos recursos de información geográfica disponibles públicamente.
5. La integración de los modelos PhyFire y HDWind en un GIS, dando lugar a una herramienta que abstraer la complejidad del modelo y permite su uso de forma sencilla e intuitiva a los potenciales usuarios. Esta herramienta se ha creado como un *Add-in de Python* para la aplicación ArcMap de Esri, mediante la utilización del lenguaje de programación Python y el uso de la librería de geoprocésamiento ArcPy.
6. Reducir el tiempo necesario para la ejecución de los procesos modelados mediante el uso de técnicas de HPC. En concreto, se ha trabajado en el uso de técnicas de paralelización basadas en memoria compartida para disminuir el tiempo de ejecución del modelo PhyFire; y el uso de técnicas de paralelización basadas en memoria distribuida para hacer frente al elevado número de simulaciones requeridas para aplicar las herramientas de asimilación de datos o el análisis de sensibilidad global del modelo.
7. La simulación de incendios reales mediante los modelos PhyFire y HDWind.

## 2. Líneas futuras

Durante la investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral han surgido nuevas líneas de trabajo ajenas a los objetivos inicialmente planteados. Tras el trabajo realizado, estas ideas quedan pendientes para su continuidad y se plantean como objetivos para futuros trabajos. A continuación se comentan algunas de las tareas cuya realización puede ser más interesante:

1. El acoplamiento de los modelos PhyFire y HDWind con modelos de simulación meteorológica tipo WRF para automatizar la adquisición de información meteorológica tanto pasada como futura. Actualmente el autor de esta tesis doctoral está trabajando en esta tarea en colaboración con el Dr. Erwin Carlos Hernández Hernández y Óscar Felipe Carrasco Díaz, de la *Universidad Técnica Federico Santa María* de Santiago de Chile y miembros fundadores de *MatCom SpA*. (Chile).
2. El acoplamiento de los modelos PhyFire y HDWind con otros modelos de simulación de fenómenos medioambientales. Durante las entrevistas llevadas a cabo con expertos analistas de incendios forestales, estos han expuesto la importancia de la radiación solar en la evolución de un incendio, por su efecto sobre el contenido de humedad y temperatura del combustible y sobre los vientos de ladera. Actualmente el autor de esta tesis doctoral está trabajando en esta tarea en colaboración con el Dr. Rafael Montenegro Armas y el Dr. Gustavo Montero García, del SIANI (*Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería*) de la *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.
3. El uso de técnicas de teledetección para la captura de información durante la evolución real de un incendio, su tratamiento e incorporación en la simulación mediante técnicas de asimilación de datos.
4. Ampliación de la base cartográfica realizada para la aplicación de los modelos PhyFire y HDWind a otros países. Actualmente se dispone de la cartografía adaptada para todo el territorio nacional español y chileno. Se está trabajando en la incorporación del país vecino Portugal por cercanía y compartir fronteras con España, y por ser uno de los países más afectados por incendios forestales en la Cuenca Mediterránea.
5. Para superar la naturaleza estática de la base cartográfica desarrollada, se propone diseñar un procedimiento para la mejora local de los mapas creados mediante el análisis de las imágenes y demás información espectral captadas por los diferentes satélites y sistemas de teledetección durante los instantes previos al inicio del incendio.

6. Fortalecer la integración entre los modelos PhyFire y HDWind y el GIS, con el objetivo de simplificar el intercambio de información entre estos y reducir el tiempo necesario para llevar a cabo la simulación.
7. Para continuar mejorando el tiempo requerido para llevar a cabo la simulación de un determinado escenario, se propone el uso de arquitecturas masivamente paralelas como las actuales GPU (*Graphics Processing Unit*) y sus herramientas de desarrollo CUDA (*Compute Unified Device Architecture*).
8. La simulación de nuevos incendios reales mediante las herramientas desarrolladas, para validar el trabajo realizado y dar difusión de sus resultados.

## Capítulo 6

# Financiación y colaboraciones

### 1. Financiación

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por una beca predoctoral, 2 proyectos de investigación nacionales, 2 proyectos autonómicos y 3 contratos artículo 83 L.O.U.; todos ellos detallados a continuación:

- **Contrato predoctoral:** Financiado por el *Fondo Social Europeo* y la *Consejería de Educación* de la *Junta de Castilla y León*. Orden EDU, de 10 de noviembre de 2016.
- **Modelos numéricos predictores de gestión medioambiental (CGL2008-06003-C03-03/CLI):** Proyecto financiado por el *Ministerio de Ciencia e Innovación* del *Gobierno de España*.
- **Asimilación de datos en modelos de propagación de incendios forestales (CGL2011-29396-C03-02):** Proyecto financiado por la *Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación* y el CDTI (*Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial*) del *Ministerio de Economía y Competitividad* del *Gobierno de España*.
- **Asimilación de datos para su integración en modelos de propagación de incendios forestales (SA266A12-2):** Proyecto financiado por la *Consejería de Educación* de la *Junta de Castilla y León*.
- **Ajuste, validación e implantación del modelo físico PhyFire**

**de simulación de incendios forestales (SA020U16):** Proyecto financiado por la *Consejería de Educación* de la *Junta de Castilla y León*, con la participación de FEDER (*Fondo Europeo de Desarrollo Regional*).

- **Estudio de mercado y pruebas de concepto para modelos de simulación de problemas medioambientales (PC-TCUE15-17-F2-021):** Proyecto financiado por la *Fundación General de la Universidad de Salamanca*, con la participación de FEDER y de la *Junta de Castilla y León*, dentro del plan TCUE 2015-2017.
- **Herramienta para la simulación de incendios forestales transfronterizos basada en el modelo físico PhyFire:** Ayuda concedida en el marco de la convocatoria PROTOTRANSFER, dentro del proyecto INESPO III (*Innovation Network Spain-Portugal*), que se encuentra enmarcado en el Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Portugal (POCTEP 2014-2020).
- **CENIT PROMETEO: Tecnologías para el combate integral contra incendios forestales y para la conservación de nuestros bosques:** OPI (*Organismo Público de Investigación*) asociado a Tecnosylva S.L. Proyecto financiado por el CDTI.
- **Generación de mallas adaptadas de tetraedros en yacimientos fracturados:** Asociado al proyecto **Simulador numérico composicional para yacimientos naturalmente fracturados vulgares con comportamiento fractal**. Proyecto financiado por *PETROSOFT* a través del Fondo sectorial *CONACYT-SENER- HIDROCARBUROS*.
- **Resolución de sistemas de ecuaciones lineales asociados al simulador numérico composicional y su paralelización en memoria distribuida y compartida:** Asociado al proyecto **Simulador numérico composicional para yacimientos naturalmente fracturados vulgares con comportamiento fractal**. Proyecto financiado por *PETROSOFT* a través del Fondo sectorial *CONACYT-SENER- HIDROCARBUROS*.
- **Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, CONICYT-CHILE:** Financiamiento de las dos estancias de investigación llevadas cabo en la *Universidad Técnica Federico Santa María* de Santiago de Chile.

## 2. Colaboraciones

A continuación se mencionan a aquellas personas u organismos, por orden alfabético, que de una manera u otra han colaborado para poder llevar a cabo el trabajo recogido en esta tesis doctoral:

- **Dr. Erwin Carlos Hernández Hernández**, por compartir su experiencia profesional y darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo en la *Universidad Técnica Federico Santa María*.
- **D. Ignacio Juárez Relaño**, Jefe de la Delegación de Salamanca de la *Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente* de la *Junta de Castilla y León*: mediante el suministro de datos históricos de incendios reales ocurridos en la provincia de Salamanca y sus sugerencias sobre las funcionalidades que debería incorporar un simulador de incendios forestales, las cuales se han tenido en cuenta en el desarrollo de la herramienta PhyFire.
- **Dña. Esther Lobo Cortés**, Técnica de SIGMENA (*Sistema de Información Geográfica del Medio Natural*) de la *Consejería de Medio Ambiente* de la *Junta de Castilla y León* en Salamanca: mediante la provisión de información cartográfica referente a la comunidad autónoma de Castilla y León, y en especial de la provincia de Salamanca.
- **MatCom SpA.** (Chile): mediante la búsqueda de nuevas utilidades y la orientación de las herramientas desarrolladas para su difusión en el mercado de sus potenciales usuarios.
- **D. Arsenio Morillo Rodríguez**, Jefe del *Área de Prevención y Valorización del Monte* de la *Consellería do Medio Rural e do Mar* de la *Xunta de Galicia*: mediante el suministro de información sobre la evolución de incendios reales ocurridos en la comunidad autónoma de Galicia, utilizada en el desarrollo, calibración y validación del modelo; y por compartir su experiencia en el ámbito de la extinción de incendios forestales.
- **Dña. Blanca Ruiz Franco**, Jefa del *Área del Banco de Datos de la Naturaleza* del *Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente* del *Gobierno de España*: mediante el suministro de la cartografía del MFE25 (*Mapa Forestal de España a escala 1:25.000*).
- **Tecnosylva S.L.**, empresa afincada en León dedicada al desarrollo de soluciones avanzadas de software basadas en GIS para la planificación preventiva de incendios forestales, respuesta operacional y seguridad pública: mediante el suministro de datos históricos de incendios reales utilizados en el desarrollo, calibración y validación del modelo.



# PUBLICACIONES



## Capítulo 7

# A wildland fire physical model well suited to data assimilation

### 1. Información de la publicación

- **Título:** [A wildland fire physical model well suited to data assimilation.](#)
- **Autores:** Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>, Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>
  - <sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca
  - <sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca
  - <sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca
- **Nombre de la revista:** Pure and Applied Geophysics
- **Proceso de publicación:**
  - *Enviado:* 28 de febrero de 2014.
  - *Aceptado:* 27 de junio de 2014.
  - *Online:* 22 de julio de 2014.
  - *Print:* 01 de enero de 2015.
- **Volumen:** 172(1)

- **Páginas:** 121–139
- **DOI:** [10.1007/s00024-014-0893-9](https://doi.org/10.1007/s00024-014-0893-9).
- **Editorial:** Springer International Publishing.
- **Print ISSN (ISSN):** 0033-4553
- **Online ISSN (eISSN):** 1420-9136
- **Revista indexada en *Web of Science*** (datos referidos al año 2014):
  - **Factor de impacto:** 1.618
  - **Factor de impacto a 5 años:** 1.910
  - **Ranking de la revista:**
    - *Geochemistry & Geophysics*: 38/79  
Cuartil: Q2
- **Revista indexada en *Scopus*** (datos referidos al año 2014):
  - **CiteScore:** 1.52
  - **SJR (SCImago Journal Rank):** 0.893
  - **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 1.067
  - **Ranking de la revista:**
    - *Earth and Planetary Sciences, Geophysics*: 35/94  
Percentil: 63
    - *Earth and Planetary Sciences, Geochemistry and Petrology*:  
51/101  
Percentil: 50

## 2. Resumen

El trabajo recogido en este artículo se centra en la integración de datos observados sobre incendios reales en la simulación de un incendio forestal utilizando los modelos matemáticos PhyFire y HDWind, con el propósito de mejorar las aproximaciones obtenidas. Para ello, se han incorporado técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo del *Filtro de Kalman* en el modelo PhyFire.

PhyFire, al tratarse de un modelo de propagación de incendios de tipo cuasifísico, proporciona el valor de variables físicas susceptibles de ser medidas, como la temperatura del combustible sólido, y que puede ser contrastado experimentalmente. Esta característica facilita el uso de técnicas de asimilación de datos al poder establecer una relación directa entre la información observada y las entradas/salidas del modelo.

Como prueba y validación del procedimiento propuesto para la asimilación de datos, se ha llevado a cabo la simulación de un incendio real ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano (Salamanca, España) en septiembre del año 2012. La información necesaria para reproducir este incendio ha sido proporcionada por D. Ignacio Juárez Relano.

En la simulación realizada empleando asimilación de datos, se han alterado las condiciones iniciales del incendio representando la incertidumbre presente en los primeros instantes de su evolución. La simulación incluyendo datos observados ha sido capaz de corregir las predicciones proporcionadas por el modelo a pesar del error introducido inicialmente, presentando una predicción final más realista.

Los datos asimilados han sido la temperatura del combustible sólido (relacionada con la posición del frente de fuego) y la fracción másica del combustible sólido (relacionada con el perímetro del incendio) en ciertos puntos del dominio. Al no disponer de suficientes datos observados sobre la evolución real de incendio, se ha reproducido este escenario utilizando la información precisa proporcionada sobre las condiciones iniciales del incendio y las tareas llevadas a cabo durante las labores de extinción para su simulación utilizando los modelos PhyFire y HDWind, sin asimilación de datos. Posteriormente se ha realizado un ajuste empírico de los parámetros del modelo PhyFire para obtener una simulación aproximada al escenario real [37]. Los resultados de esta simulación se han utilizado como solución de referencia sobre la que se han realizado las observaciones, perturbadas convenientemente a fin de reproducir la incertidumbre propia de los procesos de medición, para llevar a cabo la asimilación de datos.

Para que el procedimiento propuesto sea capaz de proporcionar una respuesta en un tiempo razonable, el proceso se ha implementado empleando técnicas de computación paralela basadas en memoria distribuida que permiten la resolución eficiente del problema utilizando un clúster formado por

varios equipos informáticos.

## Palabras clave

- Modelado de incendios forestales.
- Asimilación de datos.

## Objetivos

El objetivo final alcanzado con el trabajo recogido en este artículo es la incorporación de técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo del Filtro de Kalman en el modelo PhyFire a fin de mejorar las predicciones proporcionadas por este. La asimilación de datos es un procedimiento que combina una solución numérica con observaciones reales para obtener una predicción final más realista.

Para validar el trabajo realizado, se simula un incendio real ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano en septiembre del año 2012, cuya información ha sido proporcionada por D. Ignacio Juárez Relañó, incorporando las tácticas de extinción, concretamente las líneas de defensa empleadas.

Los datos observados provienen de una solución de referencia, obtenida tras la simulación del mismo incendio utilizando unos datos bien conocidos.

A fin de que el procedimiento propuesto sea de utilidad, el tiempo de cómputo total de la simulación y del proceso de asimilación de datos debe ser inferior al real, por lo que ha sido necesaria la utilización de técnicas de computación HPC, que han permitido la resolución eficiente del problema en clústeres de equipos informáticos.

## Metodología

El trabajo desarrollado durante la elaboración de este artículo puede dividirse en seis puntos bien diferenciados:

- **Estudio** de las técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo del Filtro de Kalman.
- **Implementación** del procedimiento de asimilación de datos mediante la utilización del DEnKF aplicado al modelo PhyFire.
- **Simulación del incendio real**, utilizando únicamente los modelos PhyFire y HDWind sin la incorporación de datos observados. Este resultado se utilizará como solución de referencia y sobre él se realizarán las observaciones para la asimilación de datos.

- **Incorporación de datos observados:** Se vuelve a simular el incendio real, esta vez utilizando el procedimiento de asimilación de datos implementado para incorporar los datos observados sobre la anterior solución de referencia.
- **Optimización de la implementación,** para resolver el problema en tiempo real.
- **Pruebas, depuración y validación del trabajo realizado.**

## El Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman [55] es un procedimiento de asimilación de datos que puede ser interpretado como una aproximación por mínimos cuadrados dinámica que combina las predicciones de un modelo y las observaciones realizadas. Este procedimiento requiere que el modelo bajo estudio sea lineal. Sin embargo, en este trabajo tratamos con un modelo de propagación de incendios, claramente no-lineal.

El EnKF (*Ensembled Kalman Filter*) propuesto por Evensen [36] combina el Método de Montecarlo<sup>1</sup> con la versión lineal del Filtro de Kalman para dar solución al problema de incorporación de datos experimentales en modelos no-lineales. Esta variante del Filtro de Kalman ya ha sido utilizada para la asimilación de datos en modelos de propagación de incendios en [60].

El EnKF debe su nombre al hecho de que emplea un conjunto de predicciones (estados) que son obtenidas perturbando convenientemente la condición inicial. La distribución de probabilidad del estado se representa por el conjunto de predicciones. La estimación se toma a partir de la media aritmética del conjunto y su varianza se reemplaza por la varianza muestral.

En este trabajo se ha utilizado una variante del EnKF, el DEnKF (*Deterministic Ensemble Kalman Filter*) [80], debido a los buenos resultados alcanzados y su eficiencia en términos de tiempo de cálculo para este tipo de problemas. No obstante, su implementación eficiente requiere de cálculo intensivo ya que el procedimiento propuesto requiere lanzar un gran número de simulaciones, el conjunto de predicciones, de forma paralela para que los resultados del filtro supongan una buena aproximación, problema únicamente abordable mediante el uso de supercomputación. Los resultados de estas simulaciones serán convenientemente combinados con los datos observados durante el proceso de asimilación.

## El *Deterministic Ensemble Kalman Filter*

El algoritmo utilizado para la aplicación del DEnKF ha sido el siguiente:

---

<sup>1</sup>**Método de Montecarlo:** es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias, permitiendo calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas.

1. Dada una estimación del estado inicial  $x^0 \in \mathbb{R}^n$ , que contiene los valores correspondientes a la temperatura del combustible sólido y a la fracción másica del combustible, se genera un conjunto  $X^0 \in \mathbb{R}^{n \times m}$  de  $m$  estados iniciales  $X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0]$  a través de la perturbación del estado inicial  $x^0$  mediante un ruido de tipo gaussiano que afecta tanto a la ubicación del foco como a las condiciones meteorológicas.
2. **Predicción:** Se aplica el operador no-lineal  $f$ , en este caso el modelo PhyFire, a cada elemento del conjunto de estados  $x_j$  para calcular su predicción  $x_j^f$ :

$$x_j^f = f(x_j) + w \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (1)$$

donde  $w \in \mathbb{R}^n$  es el error asociado al modelo. La estimación de la predicción  $x^f$  se calcula a partir de la media aritmética de la predicción de cada uno de los estados  $x_j^f$ :

$$x^f = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j^f \quad (2)$$

3. Se calcula la matriz de desviaciones  $A^f \in \mathbb{R}^{n \times m}$  de cada uno de los estados según la siguiente ecuación:

$$A^f = [x_1^f - x^f, x_2^f - x^f, \dots, x_m^f - x^f] \quad (3)$$

4. Se calcula la matriz de covarianza  $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$  de la matriz de desviaciones:

$$Q = \frac{1}{m-1} A^f (A^f)^t \quad (4)$$

5. **Medición:** En cada etapa del proceso se obtiene información de la evolución del sistema que denotamos  $d \in \mathbb{R}^d$ . Estos datos están relacionados con el estado real  $x \in \mathbb{R}^n$ , vía:

$$d = Hx + v \quad (5)$$

donde  $H \in \mathbb{R}^{d \times n}$  relaciona la observación  $d$  con el estado real  $x$ ; y  $v \in \mathbb{R}^d$  es el ruido presente en la medición con covarianza  $R \in \mathbb{R}^{d \times d}$ . En nuestro caso las observaciones son la temperatura del combustible sólido y la fracción másica del combustible sólido en determinados puntos del dominio. Por tanto, el operador  $H$  se encarga de extraer esta información en estas posiciones.

6. Se calcula la ganancia de Kalman según la siguiente ecuación:

$$K = QH^t(HQH^t + R)^{-1} \quad (6)$$

7. **Corrección:** Se aplica la corrección sobre el estado predicho, sopesando la diferencia entre la medición realizada  $d$  y la predicción de la medición  $Hx^f$  en función de la ganancia de Kalman  $K$  calculada anteriormente:

$$x^a = x^f + K(d - Hx^f) \quad (7)$$

8. Se actualiza la matriz de desviaciones:

$$A^a = A^f - \frac{1}{2}KHA^f \quad (8)$$

9. Y por último se actualiza la matriz de estados:

$$X^a = A^a + [x^a, x^a, \dots, x^a] \quad (9)$$

10. La estimación óptima  $x^a$  se toma a partir de la media del conjunto después de aplicar la corrección:

$$x^a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j^a \quad (10)$$

## Simulación del incendio real

Para obtener la solución de referencia sobre la que se han realizado las mediciones a utilizar durante la asimilación de datos, se ha simulado el mismo incendio ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano en septiembre del año 2012. Para ello se ha reunido y adaptado la información geográfica necesaria para la ejecución del modelo PhyFire tratando de incorporar las labores llevadas a cabo durante las tareas de extinción, mediante la incorporación de las líneas de defensa modificando para ello la capa de combustible.

A continuación se ha realizado un ajuste de los diferentes parámetros del modelo PhyFire para que los resultados de la simulación tuvieran una evolución acorde a la evolución real del incendio. Para ello se ha trabajado en el ajuste empírico de los parámetros más influyentes de este modelo, destacando el factor de corrección del término convectivo ( $\beta$ ) seguido del coeficiente medio de absorción de la radiación ( $a$ ) y el coeficiente de convección natural adimensional ( $\alpha$ ) [74].

## Incorporación de datos observados

En este punto se aborda el problema de como combinar los resultados de la simulación del incendio utilizando el modelo PhyFire con las mediciones realizadas en un determinado instante de tiempo sobre la solución de referencia. En la resolución de este problema hay que tener en cuenta que existe cierta incertidumbre tanto en las predicciones obtenidas por el modelo

(debidas por ejemplo a la inexactitud de los datos de entrada o a las simplificaciones del modelo) como en las mediciones realizadas *in situ* (debidas por ejemplo al propio procedimiento de medición o a la georreferenciación de las medidas tomadas).

Las mediciones para obtener los datos observados se han realizado sobre la solución de referencia resultado de la simulación del incendio real realizada anteriormente, perturbadas convenientemente para representar el error en el proceso de medición.

El error en los resultados proporcionados por el modelo procede del desconocimiento inicial de la ubicación del foco del incendio y de las condiciones meteorológicas.

El Filtro de Kalman, mediante el cálculo adecuado de su ganancia  $K$ , se encarga de combinar convenientemente las observaciones realizadas con las predicciones obtenidas en función de la variabilidad de cada uno.

### Optimización de la implementación

Para la resolución eficiente del problema de asimilación de datos mediante el uso del DEnKF en el modelo PhyFire, se han utilizado técnicas de computación paralela de alto rendimiento (HPC - *High Performance Computing*) que permiten su resolución en clústeres informáticos masivamente paralelos.

Para ello se ha implementado el procedimiento de asimilación de datos utilizando técnicas de programación híbrida, utilizando la librería MPICH3 como implementación de MPI (*Message Passing Interface*) para el paralelismo basado en memoria distribuida dentro del clúster y la API (*Application Programming Interface*) OpenMP para el paralelismo basado en memoria compartida para aprovechar el potencial de las actuales arquitecturas *multicore*.

Para la implementación del problema, se ha creado una arquitectura maestro-esclavo en la que el proceso maestro es el encargado de controlar el procedimiento, enviando trabajo a los esclavos, que se encargan de la simulación de la evolución de cada uno de los estados del conjunto; recogiendo los resultados y llevando a cabo la asimilación de datos.

El proceso maestro utiliza la librería paralela de álgebra lineal ATLAS (*Automatically Tuned Linear Algebra Software*) [16] para la resolución eficiente de las operaciones implicadas en el procedimiento para el cálculo de la ganancia de Kalman  $K$ .

### Pruebas, depuración y validación del trabajo realizado

Para validar el procedimiento propuesto para la asimilación de datos, una vez implementado, se ha aplicado al incendio ocurrido en Serradilla del Llano.

Para generar el conjunto de estados necesarios para aplicar el DEnKF, se ha utilizado la incertidumbre propia de la localización del punto de inicio del fuego en los primeros instantes del incendio. También se han perturbado las condiciones meteorológicas, según las sugerencias aportadas por los expertos en extinción de incendios en cuanto a discrepancias entre los servicios de información meteorológica y las mediciones en campo.

La información considerada de referencia proviene de la simulación del mismo incendio utilizando unos datos de partida (foco del incendio y condiciones meteorológicas) bien conocidos tras el estudio realizado *a posteriori* del incendio. Los datos asimilados son la temperatura del combustible sólido (relacionada con la posición del frente de fuego) y la fracción másica del combustible (relacionada con el perímetro afectado por el incendio) en ciertos puntos del dominio.

Tras la realización de diversas pruebas, se ha podido comprobar que el proceso de asimilación de datos ha permitido mejorar la solución obtenida por el modelo gracias a la ayuda de las observaciones tomadas sobre la solución de referencia. Para obtener esta solución, el Filtro de Kalman combina convenientemente las observaciones realizadas con los resultados del conjunto de simulaciones para tratar de minimizar el error. Una vez aplicado el filtro, la estimación final se obtiene mediante el cálculo de la media aritmética de las soluciones de cada uno de los estados involucrados.

Para cuantificar la mejora obtenida, se han calculado los correspondientes índices de similitud (Sørensen) [43] entre la solución de referencia y el resultado de la simulación antes y después del proceso de asimilación, obteniendo unos resultados que validan el trabajo realizado.

## Recursos utilizados

Los medios utilizados para llevar a cabo este trabajo han sido los siguientes:

- Informe sobre la evolución y extinción del incendio, proporcionado por D. Ignacio Juárez Relaño<sup>2</sup>.
- Artículos y publicaciones disponibles en la bibliografía.
- Equipos informáticos: Clúster de cálculo propiedad de grupo de investigación SINUMCC.
- Software informático:

---

<sup>2</sup>**Ignacio Juárez Relaño:** Jefe de la Delegación de Salamanca de la *Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente* de la *Junta de Castilla y León*.

- Entorno de desarrollo QtCreator<sup>3</sup>.
- Compilador de C++ GNU 4.8.
- Librería *NEPTUNO*<sup>4</sup>.
- Librería de álgebra lineal ATLAS<sup>5</sup>.
- Librería de álgebra lineal CLAPACK<sup>6</sup>.
- MPICH3<sup>7</sup> como implementación MPI (*Message Passing Interface*).
- Herramienta de visualización Paraview<sup>8</sup>.

## Aportación científica

La aportación del autor de esta tesis doctoral en la elaboración del trabajo recogido en este artículo ha sido la implementación del procedimiento propuesto para la experimentación numérica, el ajuste y optimización de dicha implementación para su eficaz resolución, la experimentación numérica y la validación de los resultados obtenidos.

## Resultados

Esta publicación presenta el trabajo realizado para incorporar técnicas de asimilación de datos utilizando el DEnKF en el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire, permitiendo obtener una simulación final más realista y en un tiempo de cálculo inferior al real.

La aplicación del procedimiento de asimilación de datos a un incendio real muestra que el DEnKF puede ser utilizado para mejorar la solución obtenida por el modelo siempre que exista suficiente información experimental (en forma de posición de frentes de fuego, evolución del perímetro, superficie quemada, etc.) que pueda ser relacionada con los estados internos del modelo (temperatura del combustible sólido y fracción másica de combustible).

Los resultados obtenidos de la simulación de un incendio real empleando asimilación de datos muestran que el procedimiento propuesto permite eliminar la incertidumbre existente inicialmente respecto a la ubicación de la posición del frente inicial o a la variabilidad de las condiciones climatológicas, corrigiendo las predicciones obtenidas por el cálculo mediante la integración

---

<sup>3</sup><https://www.qt.io/download>

<sup>4</sup>**NEPTUNO**: Librería, desarrollada por el Profesor *Luis Ferragut Canals*, para el lenguaje de programación C++ utilizada en la implementación de los modelos HDWind y PhyFire.

<sup>5</sup><http://math-atlas.sourceforge.net/>

<sup>6</sup><http://www.netlib.org/clapack/>

<sup>7</sup><http://www.mpich.org/>

<sup>8</sup><https://www.paraview.org/>

---

con los datos adquiridos experimentalmente, proporcionando de este modo predicciones más probables en los tiempos siguientes.

## Conclusiones

En esta publicación se simula un incendio real, ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano (Salamanca, España), utilizando el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire y el modelo de campos de viento de alta definición HDWind. Se hace uso de la información recogida durante la evolución del incendio para mejorar los resultados de la simulación, utilizando técnicas de asimilación de datos basadas en el *Filtro de Kalman*, obteniendo así predicciones más realistas en los instantes siguientes. La utilización de HPC permite realizar tanto los procesos de simulación como de asimilación de datos de manera eficiente.

Sería interesante extender este estudio cuando las observaciones sean tomadas sobre un fuego real utilizando técnicas de teledetección (imágenes satelitales, fotogrametría aérea, etc.) para la captura de observaciones.



## Capítulo 8

# Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model

### 1. Información de la publicación

Documentación de la publicación y principales índices de calidad de la revista en la cual ha sido publicada (referidos al año de aceptación -2015-):

- **Título:** [Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model](#).

- **Autores:** Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca

<sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca

<sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca

- **Nombre de la revista:** Advances in Engineering Software

- **Proceso de publicación:**
  - *Enviado:* 10 de abril de 2015.
  - *Aceptado:* 02 de agosto de 2015.
  - *Online:* 25 de agosto de 2015.
  - *Print:* 01 de diciembre de 2015.
- **Volumen:** 90(C)
- **Páginas:** 98–106
- **DOI:** [10.1016/j.advengsoft.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.08.001).
- **Editorial:** Elsevier Science Limited.
- **Print ISSN (ISSN):** 0965-9978
- **Online ISSN (eISSN):** 1873-5339
- **Revista indexada en *Web of Science*** (datos referidos al año 2015):
  - **Factor de impacto:** 1.673
  - **Factor de impacto a 5 años:** 1.765
  - **Ranking de la revista:**
    - *Computer Science, Software Engineering:* 14/106  
*Cuartil:* Q1
    - *Engineering, Multidisciplinary:* 24/85  
*Cuartil:* Q2
    - *Computer Science, Interdisciplinary Applications:* 46/104  
*Cuartil:* Q2
- **Revista indexada en *Scopus*** (datos referidos al año 2015):
  - **CiteScore:** 2.54
  - **SJR (SCImago Journal Rank):** 0.771
  - **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 1.936
  - **Ranking de la revista:**
    - *Engineering, General Engineering:* 20/262  
*Percentil:* 92
    - *Computer Science, Software:* 71/367  
*Percentil:* 80

## 2. Resumen

El trabajo recogido en este artículo utiliza las mediciones de un fuego experimental llevado a cabo en un laboratorio bajo condiciones controladas [63] para validar el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire y aproximar los parámetros de este.

Como se ha expuesto en el Capítulo *Hipótesis de trabajo*, el modelo PhyFire debe incorporar, al tratarse de un modelo de tipo cuasifísico, una familia de variables que permitan estimar la magnitud de la energía liberada durante la combustión, y que será transferida a los combustibles colindantes para la propagación del fuego. Estas variables ( $F$ ,  $C$ ,  $M_0$ ,  $M_v$ ,  $T_f$ ,  $T_p$  y  $t_{1/2}$ ), recogidas en la Tabla 3 (página 25), proporcionan la información más relevante de la vegetación del terreno de cara a la simulación de incendios utilizando PhyFire.

En la simulación de un fuego experimental, contrariamente a la de un incendio real, es posible estimar el valor de estas variables debido a que el material combustible está adecuadamente caracterizado. Así, para reproducir el fuego experimental utilizando el modelo PhyFire solamente es necesario ajustar los tres parámetros del modelo: el coeficiente medio de absorción de la radiación  $a$  ( $m^{-1}$ ), el coeficiente de convección natural  $\alpha = \frac{H[t]}{MC}$  y el factor de corrección del término convectivo  $\beta$ , recogidos en la Tabla 2 (página 25).

En este trabajo se ha reproducido el escenario de fuego experimental descrito en [63], una quema a pequeña escala sobre un lecho de combustible dentro de un túnel de viento. Este escenario se ha utilizado para realizar un análisis de sensibilidad global del modelo PhyFire con el propósito de identificar los factores de entrada más influyentes en su salida, permitiendo así validar el modelo al comparar estos resultados con los teóricos y facilitando el diseño del procedimiento para el ajuste de sus parámetros.

Una vez determinados los factores más influyentes en la salida del modelo, medida en términos de la velocidad de avance del fuego (*RoS - Rate of Spread*) y de la profundidad del frente de llama (*FTH - Fire Thickness*); se ha realizado un ajuste de sus parámetros utilizando las medidas experimentales registradas en [63] y métodos de optimización iterativos de búsqueda directa con restricciones para establecer el valor de los diferentes parámetros.

## Palabras clave

- Modelo de propagación de incendios forestales.
- Validación de un modelo de incendios.
- Fuego experimental en laboratorio.
- Análisis de sensibilidad global.

- Ajuste de parámetros.

## Objetivos

El objetivo final a alcanzar con el trabajo recogido en este artículo es la validación del modelo PhyFire utilizando técnicas de análisis de sensibilidad global y el ajuste de sus parámetros más influyentes.

Con el análisis de sensibilidad global se pretende cuantificar la importancia de cada factor de entrada del modelo (tanto parámetros como variables de entrada) en determinadas variables de salida (*RoS* y *FTH*), lo que permitirá un diseño apropiado para el procedimiento de ajuste de los parámetros del modelo.

Una vez identificados los factores más influyentes, se pretende ajustar el valor de los parámetros para cada uno de los experimentos recogidos en [63] con fin de determinar la validez del modelo. Es de esperar que el valor estimado para cada uno de los parámetros en los diferentes experimentos tenga un valor similar, lo que confirmaría la validez del modelo al ser capaz de reproducir diferentes escenarios utilizando una única configuración común.

## Metodología

El trabajo desarrollado durante la elaboración de este artículo puede dividirse en cuatro puntos bien diferenciados:

- **Análisis dimensional**, para reducir el número de factores de entrada del modelo PhyFire.
- **Análisis de sensibilidad global**, para identificar los factores más influyentes en la salida del modelo PhyFire.
- **Ajuste de los parámetros** del modelo para cada uno de los experimentos.
- **Interpretación de los resultados.**

### Análisis dimensional

El primer paso en este trabajo ha sido la realización de un análisis dimensional de los parámetros del modelo PhyFire y de las variables de entrada que caracterizan el combustible utilizando el *Teorema II de Vaschy-Buckingham* [23], teorema fundamental del análisis dimensional.

Con el análisis dimensional se pretende reducir el número de factores de entrada del modelo PhyFire y eliminar la influencia dimensional en el resultado del mismo. Este paso facilitará el análisis de sensibilidad global al

reducir el número de factores a analizar, lo que supondrá una disminución importante del tiempo de cálculo necesario.

Con la aplicación del *Teorema II de Vaschy-Buckingham* pasamos de considerar el modelo PhyFire como una función de 11 factores (10 para el caso sin viento):

$$Y = f(M_0, C, t_{1/2}, \Delta T, \alpha, a, F, M_v, \sigma T_f^4, \beta) \quad (1)$$

en la que intervienen 4 magnitudes fundamentales (masa, longitud, tiempo y temperatura); a considerarlo como otra función de 7 factores (6 para el caso sin viento):

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7) \quad (2)$$

en la que únicamente intervienen variables adimensionales.

### Análisis de sensibilidad global

Una vez realizada la adimensionalización, el siguiente paso es la realización del análisis de sensibilidad global [82, 81] del modelo, con el que se pretende cuantificar la incertidumbre presente en la salida del modelo, entendida esta como la velocidad de avance del fuego (*RoS*) y la profundidad del frente de llama (*FTH*), debido a cada uno de los factores de entrada.

Existen diferentes métodos para llevar a cabo un análisis de sensibilidad global [50]. Algunos de los más efectivos son los métodos basados en la descomposición de la varianza de la variable de salida como un sumatorio de las varianzas de funciones de distinto orden en las que intervienen un diferente número de variables de entrada del modelo.

$$\begin{aligned} V[Y(X_1, \dots, X_n)] &= \sum_i V[A_i(X_i)] + \sum_{i < j} V[B_{ij}(X_i, X_j)] + \\ &+ \sum_{i < j < k} V[C_{ijk}(X_i, X_j, X_k)] + \dots \\ &+ V[H(X_1, \dots, X_n)]. \end{aligned} \quad (3)$$

La influencia de cada variable de entrada puede cuantificarse de forma directa (mediante las contribuciones de *primer orden*) cuando esta influencia no depende de ninguna otra variable, de forma cruzada (mediante las contribuciones de *alto orden*) cuando la influencia depende de la combinación con cualquier otra variable o de forma total cuando se incluyen tanto la influencia directa como las cruzadas de una determinada variable.

La relativización de la varianza de cada función con respecto a la varianza total de la variable de salida proporciona los *índices de sensibilidad*, que permiten establecer un orden de importancia de las diferentes variables en la salida del modelo.

Entre los tipos de métodos de análisis de sensibilidad global se pueden mencionar los métodos *Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test* (Extended FAST) [83] y Sobol [90] por ser dos métodos ampliamente utilizados e incluidos ambos en el software **SimLab 2.2** [54] utilizado en este trabajo. Ambos métodos permiten identificar tanto la influencia directa como la influencia total de una variable en la salida.

Para realizar el análisis de sensibilidad global del modelo PhyFire, se ha utilizado la herramienta SimLab 2.2 para generar las muestras de cada uno de los factores de entrada para cada uno de los dos métodos anteriores, Extended FAST y Sobol, siguiendo una *f.d.p.* (*función de densidad de probabilidad*) uniforme dentro de un rango teórico adecuado.

A continuación se ejecuta el modelo PhyFire utilizando las muestras creadas anteriormente, calculando a su salida dos variables para facilitar el análisis de sensibilidad global: la velocidad de avance del fuego (*RoS*) y la profundidad del frente de llama (*FTH*).

El análisis de sensibilidad global implica la ejecución del modelo, esto es la resolución de sus ecuaciones, un número muy elevado de veces, y para su solución eficiente se ha llevado a cabo el cálculo utilizando un clúster informático compuesto por varios equipos y el empleo de técnicas de HPC. El uso del análisis dimensional ha sido de vital importancia en este sentido, ya que disminuir el número de variables a analizar ha reducido considerablemente el número de ejecuciones del modelo necesarias.

Una vez realizadas todas las simulaciones correspondientes a los diferentes experimentos recogidos en [63] (la combinación de 2 valores para la humedad del combustible, 4 intensidades de viento y 4 pendientes diferentes; 32 escenarios en total) utilizando las diferentes muestras, se han reunido y adaptado las variables de salida de cada simulación para su análisis final con la aplicación **SimLab**, que ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- En situaciones sin viento o con viento bajo, el mecanismo de propagación de fuego predominante es la radiación. Esto es, el parámetro más influyente del modelo PhyFire en estas condiciones es el *coeficiente medio de absorción de la radiación* ( $a$ ) seguido de la *temperatura de la llama* ( $T_f$ ). Respecto a la profundidad del frente de llama, el *coeficiente de convección natural* ( $\alpha$ ) también condiciona de forma importante el comportamiento del modelo.
- En aquellas situaciones con viento, la convección es el mecanismo predominante de propagación. Esto es, el parámetro más influyente del modelo PhyFire en estas condiciones es el *factor de corrección del término convectivo* ( $\beta$ ). La influencia de este parámetro depende significativamente de la intensidad del viento.
- La influencia de la convección está relacionada con la intensidad de

viento, mientras que la radiación no muestra mucha dependencia con este.

### Ajuste de parámetros

Una vez determinados los parámetros más influyentes en el modelo, se han utilizado las mediciones recogidas en [63] y un algoritmo de optimización de búsqueda directa, utilizando como restricciones los valores teóricos de los parámetros, para calcular el valor de cada parámetro del modelo ( $a$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ) en cada uno de los escenarios medidos.

En el diseño de la función de coste utilizada por el algoritmo de optimización se ha considerado exclusivamente la velocidad de avance del fuego ( $RoS$ ) descartando la utilización de la profundidad del frente de llama ( $FTH$ ), debido a la poca información proporcionada en [63] al respecto.

Dado que del análisis de sensibilidad global se concluye que existe una diferencia de comportamiento entre aquellos casos en los que el viento es importante de los que no, se ajustan los parámetros distinguiendo los dos casos:

1. Se ajustan los parámetros correspondientes a la radiación ( $a$ ) y a la convección natural ( $\alpha$ ) en el caso sin viento sin considerar la convección debida a este. Para cada uno de los escenarios (2 valores para la humedad de combustible y 4 pendientes diferentes; 8 escenarios en total), se han ajustado los parámetros  $a$  y  $\alpha$  utilizando métodos de optimización iterativos. Los valores obtenidos para estos parámetros en cada uno de los escenarios son similares, permaneciendo siempre en el mismo orden de magnitud, lo que valida el uso del modelo PhyFire en estos escenarios al poder simularlos utilizando una única configuración común. El método de optimización utilizado para realizar este ajuste ha sido el método de búsqueda directa con restricciones *Hookes and Jeeves* [17], utilizando el método de la sección áurea para el ajuste en cada dirección.
2. Una vez establecidos los parámetros  $a$  y  $\alpha$  para todos los escenarios sin viento, se ajusta el parámetro correspondiente a la convección ( $\beta$ ) en el caso con viento. Para cada una de las magnitudes de viento, se ha ajustado  $\beta$  utilizando los valores medios de los parámetros  $a$  y  $\alpha$  calculados en el paso anterior. Los valores obtenidos para el *factor de corrección del término convectivo* ( $\beta$ ) presentan mayor variabilidad que en el caso anterior, pero en todo caso los valores obtenidos permanecen dentro del rango teórico adecuado. El método de optimización utilizado para realizar este ajuste ha sido el método de búsqueda directa con restricciones *Hookes and Jeeves* [17], utilizando el método de Fibonacci para el ajuste en cada dirección.

## Recursos utilizados

Los medios utilizados para llevar a cabo este trabajo han sido los siguientes:

- Artículos y publicaciones disponibles en la bibliografía.
- Equipos informáticos: Clúster informático propiedad de grupo de investigación SINUMCC para la experimentación numérica.
- Software informático:
  - Entorno de desarrollo QtCreator<sup>1</sup>.
  - Compilador de C++ GNU 4.9.
  - Librería *NEPTUNO*<sup>2</sup>.
  - Herramienta de software de análisis de sensibilidad: SimLab 2.2<sup>3</sup>.
  - Herramienta de software matemático Matlab<sup>4</sup>.

## Resultados

En este trabajo se ha aplicado el modelo PhyFire a la simulación de diferentes escenarios de fuego experimental llevados a cabo en un laboratorio, bajo condiciones controladas, bien documentados en [63].

Se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad global del modelo para validar su uso y determinar los factores de entrada más influyentes en su salida, medida en términos de *RoS* y *FTH*, permitiendo diseñar de forma óptima el procedimiento de ajuste de los diferentes parámetros. Los resultados obtenidos de este análisis muestran que el modelo PhyFire refleja correctamente la importancia del mecanismo de propagación de la radiación en condiciones donde el viento no es importante, así como la importancia de la convección en presencia de viento.

Se ha llevado a cabo la calibración del modelo PhyFire utilizando las medidas documentadas en [63], obteniendo un valor para cada uno de sus parámetros:  $a$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ; que permite reproducir los diferentes escenarios experimentales utilizando una única configuración común. Los valores calculados para cada uno de los tres parámetros del modelo se encuentran en el mismo orden de magnitud en todos los escenarios analizados (humedad, pendiente y viento), resultado que da validez al modelo PhyFire.

---

<sup>1</sup><https://www.qt.io/download>

<sup>2</sup>**NEPTUNO**: Librería, desarrollada por el Profesor *Luis Ferragut Canals*, para el lenguaje de programación C++ utilizada en la implementación del modelo PhyFire.

<sup>3</sup>SIMLAB (2009) Version 2.2 Simulation Environment for Uncertainty and Sensitivity Analysis, developed by the Joint Research Centre of the European Commission.

<sup>4</sup><https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

## Conclusiones

En esta publicación se reproducen diferentes escenarios de fuegos experimentales documentados en [63] utilizando el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire. Estos escenarios han sido utilizados para cuantificar la importancia de cada factor de entrada del modelo en las variables de salida *RoS* y *FTH* mediante el uso de técnicas de *análisis de sensibilidad global*. Identificados los parámetros más influyentes, se ha trabajado en su ajuste mediante la utilización de algoritmos de optimización iterativos, el método de búsqueda directa con restricciones *Hookes and Jeeves* combinado con los métodos de *Fibonacci* y de la *sección aurea*. La obtención de un conjunto de valores del mismo orden para los parámetros ajustados valida la adecuación del modelo PhyFire para la simulación de incendios.



## Capítulo 9

# A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model

### 1. Información de la publicación

- **Título:** A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model.
- **Autores:** Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>, Arsenio Morillo Rodríguez<sup>4</sup>
  - <sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca
  - <sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca
  - <sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca
  - <sup>4</sup> Empresa Pública de Servicios Agrarios Galegos S.A.
- **Nombre de la revista:** International Journal of Geographical Information Science

- **Proceso de publicación:**
  - *Enviado:* 14 de julio de 2016.
  - *Aceptado:* 22 de mayo de 2017.
  - *Online:* 05 de junio de 2017.
  - *Print:* 22 de agosto de 2017.
- **Volumen:** 31(11)
- **Páginas:** 2142–2163
- **DOI:** [10.1080/13658816.2017.1334889](https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1334889).
- **Editorial:** Taylor & Francis Limited.
- **Print ISSN (ISSN):** 1365-8816
- **Online ISSN (eISSN):** 1362-3087
- **Revista indexada en *Web of Science*** (datos referidos al año 2017):
  - **Factor de impacto:** 2.370
  - **Factor de impacto a 5 años:** 2.866
  - **Ranking de la revista:**
    - *Information Science & Library Science:* 23/88  
*Cuartil:* Q2
    - *Geography:* 24/84  
*Cuartil:* Q2
    - *Computer Science, Information Systems:* 54/148  
*Cuartil:* Q2
    - *Geography, Physical:* 24/49  
*Cuartil:* Q2
- **Revista indexada en *Scopus*** (datos referidos al año 2017):
  - **CiteScore:** 3.00
  - **SJR (SCImago Journal Rank):** 1.113
  - **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 1.620
  - **Ranking de la revista:**
    - *Social Sciences, Geography, Planning and Development:* 43/605  
*Percentil:* 92
    - *Social Sciences, Library and Information Sciences:* 15/202  
*Percentil:* 92
    - *Computer Science, Information Systems:* 50/251  
*Percentil:* 80

## 2. Resumen

Este artículo presenta la integración de los modelos matemáticos para la simulación de fenómenos medioambientales PhyFire y HDWind en un entorno GIS, permitiendo vincular estos modelos con la información espacial necesaria para su ejecución.

La herramienta propuesta automatiza la adquisición de datos para llevar a cabo la simulación, esto es:

- preprocesa la información espacial,
- lanza los modelos PhyFire y HDWind,
- visualiza los resultados de la simulación en un único entorno.

La implementación realizada utiliza el lenguaje de programación *Python* y la librería *ArcPy* de Esri para extender la funcionalidad de la aplicación ArcMap 10.4.

Para que la penalización del tiempo requerido para llevar a cabo una simulación sea la mínima posible, se ha reunido y adaptado toda aquella información espacial necesaria para limitar al máximo el número de tareas a realizar en el instante de la simulación.

Finalmente, la simulación de un incendio real ocurrido en la localidad de Osoño (Ourense, España) en agosto del año 2009, confirma que la herramienta desarrollada es eficiente y plenamente operacional.

## Palabras clave

- GIS (*Geographic Information System*).
- Integración en GIS.
- ArcPy.
- Modelo de propagación de incendios forestales.
- Modelo de campos de viento de alta definición.

## Objetivos

El objetivo final a alcanzar con el trabajo recogido en este artículo es crear una herramienta que permita el uso del modelo físico de propagación de incendios forestales PhyFire y del modelo de campos de viento de alta definición HDWind, de forma rápida e intuitiva por parte de cualquier usuario ajeno al funcionamiento interno de estos modelos.

Esta herramienta debe proporcionar una interfaz de usuario que permita establecer las condiciones iniciales para la simulación de un incendio forestal (en forma de condiciones meteorológicas, posición del foco del incendio y posibles actuaciones en las tareas de extinción) y debe visualizar los resultados de una forma fácilmente interpretable por el usuario.

Para validar el funcionamiento de la aplicación, se debe simular un incendio real, eligiendo el incendio documentado por Morillo [66], ocurrido en la localidad de Osoño en agosto del año 2009.

## Metodología

Para el desarrollo de esta herramienta, se ha continuado el trabajo iniciado por el autor de esta tesis doctoral en [73] estableciendo cuatro líneas de trabajo bien diferenciadas:

- **Desarrollo cartográfico:** Generación de una cartografía de ámbito nacional que permite la utilización de los modelos en cualquier punto del territorio nacional.
- **Desarrollo de la interfaz:** Desarrollo de un *Add-in de Python* para la aplicación ArcMap 10.4 que interactúa con el usuario para permitir establecer las condiciones iniciales de simulación, gestionar la información cartográfica, lanzar la simulación e interpretar los resultados para su visualización.
- **Optimización de la herramienta.**
- **Pruebas, depuración y validación del trabajo realizado.**

## Cartografía

Para generar la cartografía se han reunido diferentes recursos cartográficos disponibles públicamente, que se han evaluado, seleccionado y procesado para construir tres mapas que serán utilizados para alimentar los modelos físicos PhyFire y HDWind. De este modo, mediante el procesamiento de los siguientes recursos cartográficos:

- MDT05 (*Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 5 m*).
- SIOSE (*Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España*).
- BTN25 (*Base Topográfica Nacional 1:25.000*).
- MFE25 (*Mapa Forestal de España a escala 1:25.000*).
- MFE50 (*Mapa Forestal de España a escala 1:50.000*).

Se han construido tres mapas de ámbito estatal que recogen únicamente la información de interés para los modelos a integrar y que han sido almacenados en una *geodatabase de archivos*.

- MDE (*Modelo Digital de Elevaciones*).
- Distribución de combustibles.
- Modelos de combustibles.

Estos datos se han preprocesado y optimizado (ver apartado 2) para que en el momento de la simulación únicamente sea necesario extraer los datos relativos al área de estudio. De esta forma:

- Se logra reducir el tiempo de simulación al no tener que identificar la hoja (u hojas) cartográfica a la que pertenece el área seleccionada.
- Se ha simplificado el desarrollo, gracias a la uniformidad de la información, que a su vez influye en la robustez de la herramienta.

### **Modelo digital de elevaciones**

Este mapa contiene la altimetría del terreno. Se trata de un mapa de tipo ráster elaborado a partir del MDT05 (*Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 5 m*) del IGN (*Instituto Geográfico Nacional*). Según las regiones procede bien de la interpolación de puntos LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) o bien de una estereocorrelación fotogramétrica, ambos procedentes del PNOA (*Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*).

Para la elaboración del mapa:

1. Se han obtenido todas las hojas (1.112 en total).
2. Se han separado las hojas pertenecientes a la Península y Baleares de las hojas correspondientes al archipiélago de Canarias, y se han proyectado a un sistema de referencia común, esto es ETRS89 UTM huso H30N para la Península y Baleares y REGCAN95 para el archipiélago de Canarias, según lo especificado en la regulación española [22].
3. Se han fusionado ambos grupos.

### **Distribución de combustibles**

Este mapa contiene aquellas zonas en las que no existe cubierta vegetal y por tanto se interpretan como combustible nulo en esos puntos. Se trata de un mapa de tipo vectorial elaborado a partir del SIOSE (*Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España*) y de la BTN25 (*Base Topográfica Nacional 1:25.000*).

Para la elaboración del mapa, se ha trabajado paralelamente con el SIOSE y la BTN25:

1. Se han obtenido los mapas correspondientes a cada una de las comunidades autónomas (SIOSE) y todas las hojas (BTN25) (4.179 en total).
2. Se ha separado la información perteneciente a la Península y Baleares de la información correspondiente al archipiélago de Canarias, y se han proyectado a un sistema de referencia común según corresponde.
3. Se han fusionado los datos de los diferentes tipos.
4. Se han seleccionado aquellas entidades de interés, esto es, aquellas en las que no existe cubierta vegetal.

Una vez extraídas todas las entidades de interés tanto del SIOSE como de la BTN25, se han fusionado para crear el mapa de distribución de combustibles.

Los datos de este mapa se deben combinar de forma temporal (en cada simulación) con la información introducida por el usuario para incorporar las tácticas llevadas a cabo en la lucha contra el incendio en una situación real, como por ejemplo la construcción de líneas de defensa.

### Modelos de combustibles

Este mapa clasifica el suelo según el tipo de combustible presente en la superficie de acuerdo con el sistema de clasificación de combustibles BEHAVE [7]. Para su elaboración, se ha trabajado con el MFE25 (*Mapa Forestal de España a escala 1:25.000*) y el MFE50 (*Mapa Forestal de España a escala 1:50.000*) según regiones, seleccionando aquellas entidades de interés y fusionándolas en un único mapa.

### Desarrollo

Para el desarrollo de la herramienta se ha trabajado con:

- El lenguaje de programación *Python*.
- La librería *ArcPy* de ESRI [35].
- La plataforma de desarrollo *.Net* de *Microsoft*.
- El compilador *Cython*.

para crear un *Add-in de Python* [34].

## Optimización

Uno de los requisitos en la simulación de incendios es la rapidez de respuesta del sistema, siendo necesario que el tiempo requerido para llevar a cabo una simulación sea notablemente inferior al tiempo simulado. Para lograr este requisito, se ha trabajado en tres vertientes:

- Uso de técnicas numéricas avanzadas en la resolución del modelo, descritas en [38] (ver Capítulo 3).
- Uso de técnicas de cálculo paralelo en la resolución del modelo, evaluadas en [5] (ver Apéndice C, Sección 2).
- Optimización de la cartografía generada para acelerar su consulta.

Para satisfacer este último punto, después de generar los mapas descritos, se han tratado para disminuir el tiempo de consulta. Para ello se ha recurrido a diferentes técnicas, entre las que destacan:

- Disminución de tamaño:
  - Se han fusionado todos los polígonos adyacentes con idénticos atributos.
  - Se han suavizado los contornos de los polígonos, mediante la eliminación de puntos irrelevantes.
  - Se ha redondeado el valor de la altimetría en cada punto para ayudar a los algoritmos de comprensión.
  - Se ha compactado la *geodatabase* reorganizando la forma en la que se almacena en el disco.
- Se han reordenado las entidades de los mapas vectoriales siguiendo las curvas de *Peano* para que entidades cercanas en la realidad estén próximas en la base de datos.
- Se ha añadido un índice espacial a los mapas.

## Distribución

Para proteger el trabajo realizado, de cara a la cesión de la herramienta a sus potenciales usuarios, se han realizado las siguientes tareas:

- *Cython*: utilizando este compilador el código Python desarrollado se ha traducido al lenguaje de programación C, el cual se ha compilado utilizando el compilador *Microsoft Visual C++ Compiler* para crear un módulo Python que proteja el trabajo desarrollado.
- Se ha añadido un sistema de licencias a la *geodatabase*.

## Validación

El último punto de la metodología seguida en el desarrollo de la herramienta es probar su funcionamiento para tratar de reproducir incendios reales utilizando la documentación histórica. A modo de ejemplo, en el artículo se presentan los resultados de la simulación del incendio ocurrido en la localidad de Osoño durante agosto del año 2009.

## Recursos utilizados

Los medios utilizados para llevar a cabo este trabajo han sido los siguientes:

- Informe sobre la evolución y extinción del incendio, proporcionado por D. Arsenio Morillo Rodríguez<sup>1</sup> [66].
- Artículos y publicaciones disponibles en la bibliografía.
- Equipos informáticos: Ordenador personal.
- Software informático:
  - ArcGIS Desktop 10.4<sup>2</sup>.
  - Entorno de desarrollo QtCreator<sup>3</sup>.
  - Compilador de C++ GNU 4.8.
  - Librería *NEPTUNO*<sup>4</sup>.
- Recursos cartográficos:
  - MDT05 (*Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 5 m*).
  - SIOSE (*Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España*).
  - BTN25 (*Base Topográfica Nacional 1:25.000*).
  - MFE25 (*Mapa Forestal de España a escala 1:25.000*).
  - MFE50 (*Mapa Forestal de España a escala 1:50.000*).

---

<sup>1</sup>**Arsenio Morillo Rodríguez:** Jefe del Área de Prevención y Valorización del Monte de la Consellería do Medio Rural e do Mar de la Xunta de Galicia

<sup>2</sup>ArcGIS® and ArcMap™ son propiedad intelectual de Esri y son usados en este trabajo bajo licencia. Copyright © Esri. All rights reserved. Para más información sobre el software de Esri®, es posible visitar [www.esri.com](http://www.esri.com).

<sup>3</sup><https://www.qt.io/download>

<sup>4</sup>**NEPTUNO:** Librería, desarrollada por el Profesor *Luis Ferragut Canals*, para el lenguaje de programación C++ utilizada en la implementación de los modelos HDWind y PhyFire.

## Resultados

Este trabajo presenta una herramienta creada mediante la integración de los modelos matemáticos medioambientales de propagación de incendios forestales PhyFire y de cálculo de campos de viento de alta definición HDWind en un *Sistema de Información Geográfica*. El desarrollo de esta herramienta se basa en extender la funcionalidad del software comercial ArcGIS de Esri, mediante el lenguaje de programación Python y la librería ArcPy para crear un *add-in de Python* para la aplicación ArcMap.

Con la integración de los modelos PhyFire y HDWind se ha creado una herramienta capaz de realizar simulaciones de forma rápida, sencilla e intuitiva, haciendo accesibles estos complejos modelos a los potenciales usuarios no familiarizados con ellos.

El sistema propuesto contempla todas las etapas de simulación, incluyendo el preprocesado de las condiciones iniciales, la extracción de la información cartográfica, la simulación utilizando los modelos PhyFire y HDWind y el posprocesado de los resultados obtenidos para su visualización.

La información cartográfica se extrae de una base de datos cartográfica de ámbito nacional, desarrollada dentro de este trabajo, y que contiene toda la información espacial requerida por los modelos HDWind y PhyFire (orografía, modelos de combustibles y distribución de combustibles), permitiendo su aplicación a cualquier punto del territorio nacional.

De esta forma la herramienta creada permite reducir el tiempo necesario para llevar a cabo una simulación mediante la automatización de la adquisición de los datos necesarios, mejorando la accesibilidad del modelo y la interpretación de los resultados gracias a la visualización sobre un mapa base de fácil comprensión.

Por otra parte, esta herramienta es de gran ayuda en el proceso de testeo y validación de los modelos, gracias a la automatización y simplificación del proceso de adquisición de datos y de la visualización de resultados.

Se ha comprobado su adecuado funcionamiento y utilidad mediante la simulación de un incendio ocurrido en la localidad de Osoño en agosto de 2009, mostrando unos resultados bastante acordes a la evolución real observada del incendio.

El código que implementa esta herramienta está incluido en el Registro General de la Propiedad Intelectual, con números de asiento registrales **00/2017/3202** y **00/2017/3203**.

## Conclusiones

En esta publicación se presenta el trabajo realizado para automatizar la provisión de información y la visualización de los resultados del modelo de propagación de incendios forestales PhyFire mediante su integración en GIS,

convirtiéndolo en una herramienta accesible a cualquier usuario. Se ha trabajado en la generación de una cartografía que contenga toda la información necesaria para llevar a cabo simulaciones en todo el territorio español. Para validar el trabajo realizado, se ha simulado un incendio real, ocurrido en la localidad de Osoño (Ourense, España).

# APÉNDICES



## Apéndice A

# Factor de impacto de las publicaciones

Este apéndice recoge los principales indicadores de calidad de las revistas en las que han sido publicados los artículos aportados en esta tesis doctoral.

La siguiente información ha sido extraída de las dos principales bases de datos científicas de referencias bibliográficas y citas de publicaciones periódicas:

1. *Web of Science*, propiedad de *Clarivate Analytics*.
2. *Scopus*, propiedad de *Elsevier B.V.*

## 1. A wildland fire physical model well suited to data assimilation

Documentación de la revista y sus principales índices de calidad (referidos al año de aceptación de la publicación del artículo -2014-):

- **Nombre de la revista:** Pure and Applied Geophysics
- **Página Web:** <https://link.springer.com/journal/24>
- **Editorial:** Springer International Publishing
- **Print ISSN (ISSN):** 0033-4553
- **Online ISSN (eISSN):** 1420-9136
- **Indexada en *Web of Science*:**
  - **Factor de impacto:** 1.618
  - **Factor de impacto a 5 años:** 1.910
  - **Ranking de la revista:**
    - *Geochemistry & Geophysics*: 38/79  
*Cuartil*: Q2
- **Indexada en *Scopus*:**
  - **CiteScore:** 1.52
  - **SJR (SCImago Journal Rank):** 0.893
  - **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 1.067
  - **Ranking de la revista:**
    - *Earth and Planetary Sciences, Geophysics*: 35/94  
*Percentil*: 63
    - *Earth and Planetary Sciences, Geochemistry and Petrology*: 51/101  
*Percentil*: 50

## 2. Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model

Documentación de la revista y sus principales índices de calidad (referidos al año de aceptación de la publicación del artículo -2015-):

- **Nombre de la revista:** Advances in Engineering Software
- **Página Web:** <https://www.journals.elsevier.com/advances-in-engineering-software>
- **Editorial:** Elsevier Science Limited
- **Print ISSN (ISSN):** 0965-9978
- **Online ISSN (eISSN):** 1873-5339
- **Indexada en *Web of Science*:**
  - **Factor de impacto:** 1.673
  - **Factor de impacto a 5 años:** 1.765
  - **Ranking de la revista:**
    - *Computer Science, Software Engineering*: 14/106  
*Cuartil:* Q1
    - *Engineering, Multidisciplinary*: 24/85  
*Cuartil:* Q2
    - *Computer Science, Interdisciplinary Applications*: 46/104  
*Cuartil:* Q2
- **Indexada en *Scopus*:**
  - **CiteScore:** 2.54
  - **SJR (SCImago Journal Rank):** 0.771
  - **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 1.936
  - **Ranking de la revista:**
    - *Engineering, General Engineering*: 20/262  
*Percentil:* 92
    - *Computer Science, Software*: 71/367  
*Percentil:* 80

### 3. A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model

Documentación de la revista y sus principales índices de calidad (referidos al año de aceptación de la publicación del artículo -2017-):

- **Nombre de la revista:** International Journal of Geographical Information Science
- **Página Web:** <http://www.tandfonline.com/toc/tgis20/current>
- **Editorial:** Taylor & Francis Limited.
- **Print ISSN (ISSN):** 1365-8816
- **Online ISSN (eISSN):** 1362-3087
- **Indexada en *Web of Science*:**
  - **Factor de impacto:** 2.370
  - **Factor de impacto a 5 años:** 2.866
  - **Ranking de la revista:**
    - *Information Science & Library Science*: 23/88  
Cuartil: Q2
    - *Geography*: 24/84  
Cuartil: Q2
    - *Computer Science, Information Systems*: 54/148  
Cuartil: Q2
    - *Geography, Physical*: 24/49  
Cuartil: Q2
- **Indexada en *Scopus*:**
  - **CiteScore:** 3.00
  - **SJR (SCImago Journal Rank):** 1.113
  - **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 1.620
  - **Ranking de la revista:**
    - *Social Sciences, Geography, Planning and Development*: 43/605  
Percentil: 92
    - *Social Sciences, Library and Information Sciences*: 15/202  
Percentil: 92
    - *Computer Science, Information Systems*: 50/251  
Percentil: 80

## Apéndice B

# Propiedad Intelectual

Este apéndice recoge los productos desarrollados e inscritos en el Registro General de la Propiedad Intelectual para su protección, entre cuyos autores se encuentra el autor de esta tesis doctoral.

### 1. PhFFS

- **Título:** PhFFS: *Physical Forest Fire Spread*.
- **Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador.
- **Clase de obra:** Programa de ordenador.
- **Autores:**
  1. Luis Ferragut Canals (40 %)
  2. María Isabel Asensio Sevilla (20 %)
  3. José Manuel Cascón Barbero (20 %)
  4. Diego Prieto Herráez (20 %)
- **Propietario:** Universidad de Salamanca.
- **Fecha:** 16 de julio de 2015.
- **Número de solicitud:** SA-197-15
- **Asiento registral:** 00/2015/4720

El contenido protegido incluye el modelo PhyFire.







- Cedente: CASCÓN BARBERO, José Manuel  
Nacionalidad: ESP D.N.I./N.I.F./Pasaporte: 70863100-P
- Cedente: PRIETO HERRÁEZ, Diego  
Nacionalidad: ESP D.N.I./N.I.F./Pasaporte: 70810292-P



### **Datos de la solicitud**

Núm. solicitud: SA-197-15

Fecha de presentación y efectos: 16/07/2015 Hora: 09:40

En Madrid, a tres de noviembre de dos mil quince



EL REGISTRADOR CENTRAL

Miguel Ángel Calle Izquierdo





## 2. HDWF

- **Título:** HDWF: *High Definition Wind Field*.
- **Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador.
- **Clase de obra:** Programa de ordenador.
- **Autores:**
  1. Luis Ferragut Canals (40 %)
  2. María Isabel Asensio Sevilla (20 %)
  3. José Manuel Cascón Barbero (20 %)
  4. Diego Prieto Herráez (20 %)
- **Propietario:** Universidad de Salamanca.
- **Fecha:** 16 de julio de 2015.
- **Número de solicitud:** SA-198-15
- **Asiento registral:** 00/2015/4721

El contenido protegido incluye el modelo HDWind.



# REGISTRO GENERAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

Según lo dispuesto en la Ley de Propiedad Intelectual (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril), quedan inscritos en este Registro los derechos de propiedad intelectual en la forma que se determina seguidamente:

## NÚMERO DE ASIENTO REGISTRAL 00 / 2015 / 4721

**Título:** HDWF: High Definition Windfield Model

**Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador

**Clase de obra:** Programa de ordenador



### PRIMERA INSCRIPCIÓN

#### *Autor/es y titular/es originarios de derechos*

- **Apellidos y nombre:** FERRAGUT CANALS, Luis  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 41400730-V  
**Parte de la obra de la que es autor:** 40%
- **Apellidos y nombre:** ASENSIO REVILLA, María Isabel  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 07961048-N  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%
- **Apellidos y nombre:** CASCÓN BARBERO, José Manuel  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70863100-P  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%
- **Apellidos y nombre:** PRIETO HERRÁEZ, Diego  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70810292-P  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%

#### *Transmisión de derechos*

- **Titular cesionario:** UNIVERSIDAD DE SALAMANCA  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** Q-3718001-E

Es titular en exclusiva de los derechos de explotación de esta obra por mediar relación laboral y estar creada en el ejercicio de las funciones asignadas en la empresa al autor/es.

- **Cedente:** FERRAGUT CANALS, Luis  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 41400730-V
- **Cedente:** ASENSIO REVILLA, María Isabel  
**Nacionalidad:** ESP **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 07961048-N



· Cedente: CASCÓN BARBERO, José Manuel

Nacionalidad: ESP

D.N.I./N.I.F./Pasaporte: 70863100-P

· Cedente: PRIETO HERRÁEZ, Diego

Nacionalidad: ESP

D.N.I./N.I.F./Pasaporte: 70810292-P

### ***Datos de la solicitud***

Núm. solicitud: SA-198-15

Fecha de presentación y efectos: 16/07/2015

Hora: 09:45

En Madrid, a tres de noviembre de dos mil quince



EL REGISTRADOR CENTRAL

Miguel Ángel Calle Izquierdo





### 3. ArcPhFFS

- **Título:** ArcPhFFS.
- **Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador.
- **Clase de obra:** Programa de ordenador.
- **Autores:**
  1. Luis Ferragut Canals (30 %)
  2. Diego Prieto Herráez (30 %)
  3. María Isabel Asensio Sevilla (20 %)
  4. José Manuel Cascón Barbero (20 %)
- **Propietario:** Universidad de Salamanca.
- **Fecha:** 27 de julio de 2017.
- **Número de solicitud:** SA-182-17
- **Asiento registral:** 00/2017/3203

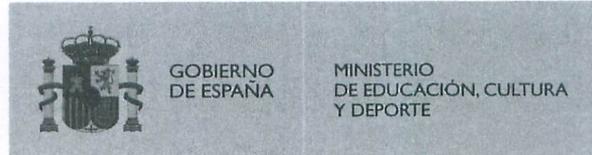
El contenido protegido incluye el modelo PhyFire, su integración en GIS y la base cartográfica necesaria para su uso.



**REGISTRO CENTRAL  
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL**



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE

**REGISTRO GENERAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL**

Según lo dispuesto en la Ley de Propiedad Intelectual (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril), quedan inscritos en este Registro los derechos de propiedad intelectual en la forma que se determina seguidamente:

**NÚMERO DE ASIENTO REGISTRAL 00 / 2017 / 3203**

**Título:** ArcPhFFS

**Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador

**Clase de obra:** Programa de ordenador

**PRIMERA INSCRIPCIÓN**



***Autor/es y titular/es originarios de derechos***

- **Apellidos y nombre:** FERRAGUT CANALS, Luis  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 41400730V  
**Parte de la obra de la que es autor:** 30%
- **Apellidos y nombre:** ASENSIO SEVILLA, María Isabel  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 07961048N  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%
- **Apellidos y nombre:** CASCÓN BARBERO, José Manuel  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70863100P  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%
- **Apellidos y nombre:** PRIETO HERRÁEZ, Diego  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70810292P  
**Parte de la obra de la que es autor:** 30%

***Transmisión de derechos***

- **Titular cesionario:** UNIVERSIDAD DE SALAMANCA  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** Q3718001E

Es titular en exclusiva de los derechos de explotación de esta obra por mediar relación laboral y estar creada en el ejercicio de las funciones asignadas en la empresa al autor/es o siguiendo las instrucciones de su empresario.

- **Cedente:** FERRAGUT CANALS, Luis  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 41400730V



**REGISTRO CENTRAL  
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL**



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE

• **Cedente:** PRIETO HERRÁEZ, Diego

**Nacionalidad:** España

**D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70810292P

• **Cedente:** ASENSIO SEVILLA, María Isabel

**Nacionalidad:** España

**D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 07961048N

• **Cedente:** CASCÓN BARBERO, José Manuel

**Nacionalidad:** España

**D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70863100P

***Datos de la solicitud***

**Núm. solicitud:** SA-182-17

**Fecha de presentación y efectos:** 27/07/2017

**Hora:** 10:12

En Madrid, a treinta y uno de octubre de dos mil diecisiete



LA REGISTRADORA CENTRAL

Lucía Gutiérrez García





#### 4. ArcHDWF

- **Título:** ArcHDWF.
- **Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador.
- **Clase de obra:** Programa de ordenador.
- **Autores:**
  1. Luis Ferragut Canals (30 %)
  2. Diego Prieto Herráez (30 %)
  3. María Isabel Asensio Sevilla (20 %)
  4. José Manuel Cascón Barbero (20 %)
- **Propietario:** Universidad de Salamanca.
- **Fecha:** 27 de julio de 2017.
- **Número de solicitud:** SA-181-17
- **Asiento registral:** 00/2017/3202

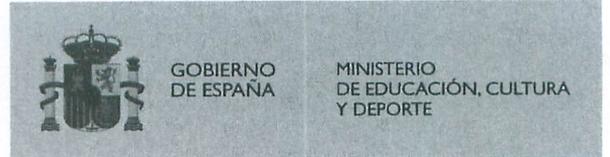
El contenido protegido incluye el modelo HDWind, su integración en GIS y la base cartográfica necesaria para su uso.



**REGISTRO CENTRAL  
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL**



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE



**REGISTRO GENERAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL**

Según lo dispuesto en la Ley de Propiedad Intelectual (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril), quedan inscritos en este Registro los derechos de propiedad intelectual en la forma que se determina seguidamente:

**NÚMERO DE ASIENTO REGISTRAL 00 / 2017 / 3202**

**Título:** ArcHDWF

**Objeto de propiedad intelectual:** Programa de ordenador

**Clase de obra:** Programa de ordenador

**PRIMERA INSCRIPCIÓN**



***Autor/es y titular/es originarios de derechos***

- **Apellidos y nombre:** FERRAGUT CANALS, Luis  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 41400730V  
**Parte de la obra de la que es autor:** 30%
- **Apellidos y nombre:** PRIETO HERRÁEZ, Diego  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70810292P  
**Parte de la obra de la que es autor:** 30%
- **Apellidos y nombre:** ASENSIO SEVILLA, María Isabel  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 07961048N  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%
- **Apellidos y nombre:** CASCÓN BARBERO, José Manuel  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70863100P  
**Parte de la obra de la que es autor:** 20%

***Transmisión de derechos***

- **Titular cesionario:** UNIVERSIDAD DE SALAMANCA  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** Q3718001E

Es titular en exclusiva de los derechos de explotación de esta obra por mediar relación laboral y estar creada en el ejercicio de las funciones asignadas en la empresa al autor/es o siguiendo las instrucciones de su empresario.

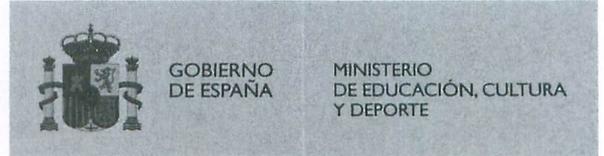
- **Cedente:** FERRAGUT CANALS, Luis  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 41400730V



**REGISTRO CENTRAL  
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL**



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN, CULTURA  
Y DEPORTE

- **Cedente:** PRIETO HERRÁEZ, Diego  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70810292P
- **Cedente:** ASENSIO SEVILLA, María Isabel  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 07961048N
- **Cedente:** CASCÓN BARBERO, José Manuel  
**Nacionalidad:** España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70863100P

**Datos de la solicitud**

**Núm. solicitud:** SA-181-17

**Fecha de presentación y efectos:** 27/07/2017

**Hora:** 10:12

En Madrid, a treinta y uno de octubre de dos mil diecisiete



LA REGISTRADORA CENTRAL

Lucía Gutiérrez García





## Apéndice C

# Aportaciones a congresos

Este apéndice contiene las publicaciones originales difundidas en actas de congresos:

1. *A simplified wildland fire model applied to a real case*
2. *Parallel implementation of a simplified semi-physical wildland fire spread model using OpenMP*

El trabajo recogido en estas publicaciones está basado en contribuciones presentadas a diversos congresos, que tras un proceso de selección y revisión por parte de expertos han sido publicadas para su difusión. Se incluye para cada una de estas publicaciones un resumen en castellano en el cual se especifican los objetivos del trabajo realizado, la metodología utilizada para su consecución y los resultados alcanzados.

## 1. A simplified wildland fire model applied to a real case

### 1.1. Información de la publicación

- **Título del capítulo:** [A simplified wildland fire model applied to a real case](#).
- **Autores:** Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>, Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>
  - <sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca
  - <sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca
  - <sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca
- **Título del libro:** Advances in Differential Equations and Applications
- **Serie:** SEMA SIMAI Springer Series.
- **Fecha de publicación:**
  - *Online:* 11 de octubre de 2014.
- **Volumen:** 4
- **Páginas:** 155–167
- **DOI:** [10.1007/978-3-319-06953-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06953-1_16).
- **Editorial:** Springer International Publishing.
- **Print ISBN (ISBN):** 978-3-319-06952-4
- **Online ISBN (eISBN):** 978-3-319-06953-1
- **Series Print ISSN (ISSN):** 2199-3041
- **Series Online ISSN (eISSN):** 2199-305X
- **Capítulo indexado en *Web of Science* (2014).**
- **Capítulo indexado en *Scopus* (2014).**

Este capítulo constituye la contribución presentada en el XXIII Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones (XXIII CEDYA) / XIII Congreso de Matemática Aplicada (XIII CMA), organizado por el *Departamento de Matemáticas* y el *Instituto de Matemáticas y Aplicaciones* de Castellón, de la *Universitat Jaume I*; el cual tuvo lugar los días 9–13 de septiembre del año 2013 en Castellón (Valencia).

## 1.2. Resumen

En este capítulo se presenta el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire y su aplicación a la simulación de incendios forestales reales mediante la utilización de datos proporcionados por un GIS.

Para la simulación de un incendio forestal, dado el punto de inicio, la duración del incendio y las condiciones meteorológicas requeridas por el modelo (temperatura, humedad y viento); el modelo proporciona el estado de la evolución del frente de fuego a lo largo de los diferentes instantes de tiempo, permitiendo establecer los perímetros del avance del incendio en cada momento. Las condiciones de viento pueden bien ser consideradas constantes en todo el dominio de simulación o bien ser calculadas a partir de datos meteorológicos puntuales por el modelo de viento de alta definición HDWind obteniendo un campo de viento adaptado al dominio de simulación. Mediante la modificación de los ficheros correspondientes a la tipología del combustible, es posible incorporar a la simulación las líneas de defensa llevadas a cabo durante las labores de extinción con el objetivo de adaptar la simulación al escenario real. La visualización de los resultados sobre un GIS proporciona una imagen de fácil comprensión a cualquier usuario ajeno a la complejidad del modelo PhyFire.

La simplicidad del modelo y su eficiente solución numérica permiten llevar a cabo la simulación de un incendio forestal en un tiempo inferior al real.

Para validar el modelo PhyFire, se simula un incendio real ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano (Salamanca, España) en septiembre del año 2012. La similitud de los resultados de la simulación con la evolución real del incendio muestra la validez del trabajo realizado.

### Palabras clave

- Modelo de propagación de incendios forestales.
- Modelo físico simplificado.
- Simulación de un incendio real.

### Objetivos

El objetivo final a alcanzar con el trabajo recogido en este capítulo es la validación del modelo matemático para la simulación de incendios forestales PhyFire, mediante aplicación del mismo a un caso real, simulando el incendio ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano en septiembre del año 2012.

Para llevar a cabo dicha simulación se debía trabajar en la provisión de la información geográfica correspondiente al área de estudio y en su visualización sobre un entorno de fácil comprensión, permitiendo la comparación de los resultados de la simulación con la evolución real del incendio.

Para que los resultados fuesen acordes al comportamiento real del incendio, se debía trabajar en la modificación de la información geográfica obtenida para tratar de representar las líneas de defensa llevadas a cabo durante las tareas de extinción y sobre el ajuste de los diferentes parámetros del modelo PhyFire.

## Metodología

El trabajo desarrollado para cumplir los anteriores objetivos se ha centrado en tres puntos bien diferenciados:

- **Obtención de información para la simulación:** se ha trabajado en el estudio de diferentes recursos cartográficos para alimentar al modelo PhyFire con la información geográfica necesaria para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal. Para adecuar la simulación al escenario real, se ha trabajado en la modificación de esta información para incorporar las líneas de defensa realizadas por los equipos de extinción.
- **Visualización de resultados:** se ha trabajado en el uso del software GIS ArcMap como herramienta para la visualización de los resultados obtenidos de la simulación.
- **Ajuste del modelo:** se ha trabajado en la estimación empírica de los diferentes parámetros del modelo y de las variables que caracterizan cada tipo de combustible para lograr una simulación realista.

## Recursos utilizados

Los medios utilizados para llevar a cabo este trabajo han sido los siguientes:

- Informe sobre la evolución y extinción del incendio, proporcionado por D. Ignacio Juárez Relaño<sup>1</sup>.
- Equipos informáticos: Ordenador personal.
- Software informático:
  - ArcGIS Desktop<sup>2</sup>.
  - Entorno de desarrollo QtCreator<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup>**Ignacio Juárez Relaño:** Jefe de la Delegación de Salamanca de la *Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente* de la *Junta de Castilla y León*

<sup>2</sup>ArcGIS<sup>®</sup> y ArcMap<sup>™</sup> son propiedad intelectual de Esri y son usados en este trabajo bajo licencia. Copyright<sup>©</sup> Esri. Todos los derechos reservados. Para más información sobre el software de Esri<sup>®</sup>, es posible visitar [www.esri.com](http://www.esri.com).

<sup>3</sup><https://www.qt.io/download>

- Compilador de C++ GNU 4.8.
- Librería *NEPTUNO*<sup>4</sup>.
- Recursos cartográficos:
  - DEM (*Digital Elevation Model*) del ITACyL (*Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León*).
  - MFE50 (*Mapa Forestal de España a escala 1:50.000*).

### Aportación científica

La aportación del autor de esta tesis doctoral en la elaboración del trabajo recogido en este capítulo se ha centrado en la adaptación de la información geográfica necesaria para llevar a cabo la simulación del incendio y en la visualización de los resultados obtenidos.

### Resultados

El trabajo recogido en este capítulo se ha centrado en la validación del modelo PhyFire mediante la simulación de un incendio real, ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano en septiembre del año 2012, utilizando para ello información procedente de recursos cartográficos disponibles públicamente y la información sobre las tareas de extinción llevadas a cabo, proporcionadas por D. Ignacio Juárez Relano.

Este trabajo ha servido como una primera aproximación a la integración en GIS de los modelos matemáticos medioambientales HDWind y PhyFire. Se ha trabajado en el tratamiento de la información geográfica y su utilización para llevar a cabo una simulación con los modelos antes mencionados.

A partir de estos resultados se ha desarrollado una línea de trabajo cuyos resultados se plasman en el artículo *A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model* [75].

### Conclusiones

En esta publicación se simula un incendio real, ocurrido en la localidad de Serradilla del Llano (Salamanca, España), utilizando el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire y el modelo de campos de viento de alta definición HDWind. La información necesaria para la simulación ha sido extraída de un GIS.

---

<sup>4</sup>**NEPTUNO**: Librería, desarrollada por el Profesor *Luis Ferragut Canals*, para el lenguaje de programación C++ utilizada en la implementación de los modelos HDWind y PhyFire.



## 2. Parallel implementation of a simplified semi-physical wildland fire spread model using OpenMP

### 2.1. Información de la publicación

- **Título del capítulo:** [Parallel implementation of a simplified semi-physical wildland fire spread model using OpenMP](#).
- **Autores:** David Álvarez León<sup>1</sup>, Diego Prieto Herráez<sup>1</sup>, María Isabel Asensio Sevilla<sup>1,3</sup>, José Manuel Cascón Barbero<sup>2,3</sup>, Luis Ferragut Canals<sup>1,3</sup>
  - <sup>1</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca
  - <sup>2</sup> Departamento de Economía e Historia Económica, Universidad de Salamanca
  - <sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas, Universidad de Salamanca
- **Título del libro:** *Hybrid Artificial Intelligent Systems: 12th International Conference, HAIS 2017*. La Rioja, Spain, June 21–23, 2017, Proceedings.
- **Serie:** Lecture Notes in Computer Science / Lecture Notes in Artificial Intelligence.
- **Fecha de publicación:**
  - *Online:* 02 de junio de 2017.
  - *Print:* 21 de junio de 2017.
- **Volumen:** 10334
- **Páginas:** 256–267
- **DOI:** [10.1007/978-3-319-59650-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59650-1_22).
- **Editorial:** Springer International Publishing.
- **Print ISBN (ISBN):** 978-3-319-59649-5
- **Online ISBN (eISBN):** 978-3-319-59650-1
- **Series Print ISSN (ISSN):** 0302-9743
- **Series Online ISSN (eISSN):** 1611-3349
- **Capítulo indexado en *Scopus*** (datos referidos al año 2017):
  - **CiteScore:** 0.90

- **SJR (SCImago Journal Rank):** 0.295
- **SNIP (Source Normalized Impact per Paper):** 0.655
- **Ranking de la serie:**
  - *Computer Science, General Computer Science:* 91/195  
*Percentil:* 53
  - *Theoretical Computer Science:* 73/114  
*Percentil:* 36

Este capítulo ha sido publicado como parte de las actas del XII Congreso Internacional en Sistemas Inteligentes Artificiales (HAIS 2017 | XII Edition), que tuvo lugar los días 21–23 de junio del año 2017 en Logroño (La Rioja).

## 2.2. Resumen

En este capítulo se presenta el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire y la optimización del tiempo de ejecución de su implementación mediante la utilización de técnicas de HPC (*High Performance Computing*).

Un requisito para la usabilidad del modelo PhyFire es la rapidez de respuesta, debiendo permitir obtener los resultados de una simulación en un tiempo inferior al tiempo real de evolución del incendio. Para ello, en su implementación se han utilizado técnicas de cálculo paralelo basadas en memoria compartida y el uso del API OpenMP (*Open Multi-Processing*) para el aprovechamiento de las actuales arquitecturas *multicore*, cuya efectividad se analiza en este trabajo.

El API OpenMP permite añadir concurrencia a un programa, posibilitando reducir su tiempo de ejecución mediante la ejecución simultánea de varias de sus órdenes en un mismo equipo, aprovechando así todo su potencial y permitiendo la ejecución de aplicaciones de alto rendimiento en equipos sencillos.

Para evaluar la mejora obtenida en el tiempo de ejecución del modelo una vez paralelizado, se ha simulado el incendio ocurrido en la localidad de Osoño (Ourense, España) en agosto del año 2009, documentado por A. Morillo [66]. Los datos para llevar a cabo la simulación, la orografía del terreno, la carga y tipo de combustible y las condiciones meteorológicas requeridas por el modelo (temperatura, humedad y viento) han sido obtenidos vía GIS siguiendo el trabajo recogido en [75].

La simulación de este incendio se ha llevado a cabo repetidas veces empleando diferentes configuraciones paralelas, esto es, variando el número de hilos de ejecución utilizados al lanzar el modelo y probando diferentes algoritmos para el reparto del trabajo entre los mismos, lo que ha permitido evaluar la mejora obtenida en el tiempo de ejecución gracias a las técnicas de computación paralela.

Los resultados alcanzados muestran una mejora de hasta 6 veces en el tiempo de ejecución secuencial, elevando el aprovechamiento del procesador hasta el 50 %.

### Palabras clave

- OpenMP.
- Computación paralela.
- Rendimiento computacional.
- Modelo de propagación de incendios forestales.

## Objetivos

El objetivo final a alcanzar con el trabajo recogido en este capítulo es la reducción del tiempo de respuesta del modelo PhyFire, mediante la utilización de técnicas de programación paralela basadas en memoria compartida que permiten reducir el tiempo necesario para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal.

El tiempo de simulación es un aspecto crítico en la simulación de incendios, debiendo este ser notablemente inferior al tiempo real de propagación del fuego, de cara a que la simulación sea útil en la planificación de la extinción del incendio.

Para reducir el tiempo de simulación, se pretende adaptar el código que implementa el modelo de forma que sus tareas puedan ser llevadas a cabo de forma simultánea entre los diferentes núcleos que incorporan los modernos procesadores con arquitectura *multicore*, utilizando para la distribución de tareas el API OpenMP.

## Metodología

El trabajo desarrollado para cumplir los objetivos puede dividirse en 5 puntos bien diferenciados:

- **Identificación de los puntos críticos:** Se ha analizado el tiempo requerido para la ejecución de cada parte del modelo, con el objetivo de identificar aquellos puntos que más tiempo consumen, y por tanto cuya mejora puede resultar más efectiva.
- **Análisis de dependencias:** Se ha valorado la posibilidad de aplicar las técnicas de paralelización en aquellos puntos críticos donde la paralelización puede beneficiar significativamente el tiempo global de ejecución del modelo, buscando para ello las dependencias que pueden ocasionar problemas en la paralelización, como carreras, bloqueos, etc.
- **Reorganización de código:** Resolución de las dependencias encontradas en el punto anterior, con el objetivo de garantizar la independencia entre las ejecuciones llevadas a cabo por los diferentes *cores*. La correcta resolución de estas dependencias garantiza que el resultado del modelo no se vea afectado por la paralelización.
- **Paralelización:** Se han insertado las directivas OpenMP necesarias para paralelizar el código ya reorganizado.
- **Pruebas, depuración y validación del trabajo realizado:** Se ha comprobado que los resultados de la simulación utilizando la implementación paralela son idénticos a los resultados de la implementación

secuencial original, se han probado diferentes configuraciones de paralelismo para encontrar una solución óptima, y se ha validado el trabajo realizado mediante su aplicación a la simulación de un incendio real.

## Recursos utilizados

Entre medios utilizados para llevar a cabo este trabajo se encuentran los siguientes:

- Informe sobre la evolución y extinción del incendio, proporcionado por D. Arsenio Morillo Rodríguez<sup>5</sup> [66].
- Recursos bibliográficos [28].
- Equipos informáticos: Estación de trabajo propiedad de grupo de investigación SINUMCC, equipada con un procesador de 6 núcleos Intel<sup>®</sup> Xeon<sup>®</sup> E5-1650 v4 con arquitectura Broadwell y 16Gb de memoria RAM.
- Software informático:
  - Entorno de desarrollo QtCreator<sup>6</sup>.
  - Compilador de C++ GNU 5.4.
  - Librería *NEPTUNO*<sup>7</sup>.
  - API de programación paralela *OpenMP*<sup>8</sup>.

## Aportación científica

La aportación del autor de esta tesis doctoral en la elaboración del trabajo recogido en este capítulo ha sido la adaptación del código que implementa el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire para la implementación del paralelismo, llevando a cabo la identificación de los puntos críticos, el análisis de dependencias, la reorganización del código y la paralelización del mismo. Una vez adaptado, ha llevado a cabo la experimentación numérica, el ajuste de dicha implementación para su eficaz resolución y la validación de los resultados obtenidos.

---

<sup>5</sup> **Arsenio Morillo Rodríguez:** Jefe del Área de Prevención y Valorización del Monte de la Consellería do Medio Rural e do Mar de la Xunta de Galicia

<sup>6</sup> <https://www.qt.io/download>

<sup>7</sup> **NEPTUNO:** Librería, desarrollada por el Profesor *Luis Ferragut Canals*, para el lenguaje de programación C++ utilizada en la implementación de los modelos HDWind y PhyFire.

<sup>8</sup> <http://www.openmp.org/>

## Resultados

Esta publicación recoge el trabajo llevado a cabo para acelerar la ejecución del modelo matemático para la simulación de incendios forestales PhyFire utilizando técnicas de programación paralela basadas en memoria compartida mediante la utilización del API *OpenMP*.

La implementación de este modelo se ha reorganizado para poder aplicar la paralelización y poder así aprovechar las arquitecturas *multicore* de los actuales procesadores.

Una vez adaptada la implementación, se ha evaluado la mejora alcanzada y el rendimiento del procesador cuando varía el número de núcleos utilizados, durante la simulación de un incendio real ocurrido en la localidad de Osoño en agosto del año 2009.

Los resultados alcanzados muestran una mejora, medida como la relación entre el tiempo de ejecución del programa secuencial y el tiempo de ejecución del programa paralelo, de hasta 6 veces cuando se emplean 12 hilos y un aprovechamiento del procesador del 50 % en este caso.

Se aprecia un rendimiento del paralelismo, medido como la relación entre la mejora obtenida y el número de hilos utilizados, muy superior cuando se utilizan los núcleos reales del procesador frente a cuando se utilizan los núcleos lógicos (uso la tecnología Intel<sup>®</sup> *Hyper-Threading*), obteniendo una disminución del tiempo de ejecución de 4.89 veces y un aprovechamiento 81,50 %, resultado que valida el trabajo realizado.

## Conclusiones

En esta publicación abarca el uso de técnicas HPC basadas en memoria compartida, y en concreto el uso del API OpenMP, para disminuir el tiempo de ejecución del modelo de propagación de incendios forestales PhyFire.

# Bibliografía

- [1] AGER, A. A., VAILLANT, N. M. y FINNEY, M. A. Integrating fire behavior models and geospatial analysis for wildland fire risk assessment and fuel management planning. *Journal of Combustion*, vol. 2011, páginas 1–19, 2011. ISSN 2090-1968.
- [2] ALBINI, F. A. Estimating wildfire behavior and effects. General Technical Report INT-GTR-30, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1976.
- [3] ALBINI, F. A. A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combustion Science and Technology*, vol. 42(5-6), páginas 229–258, 1985. ISSN 0010-2202.
- [4] ALBINI, F. A. Wildland fire spread by radiation a model including fuel cooling by natural convection. *Combustion Science and Technology*, vol. 45(1-2), páginas 101–113, 1986. ISSN 0010-2202.
- [5] ÁLVAREZ, D., PRIETO, D., ASENSIO, M. I., CASCÓN, J. M. y FERRAGUT, L. Parallel implementation of a simplified semi-physical wildland fire spread model using OpenMP. En *Hybrid Artificial Intelligent Systems: 12th International Conference, HAIS 2017, La Rioja, Spain, June 21–23, 2017, Proceedings* (editado por F. M. de Pisón, R. Urraca, H. Quintián y E. Corchado), vol. 10334 de *Lecture Notes in Computer Science / Lecture Notes in Artificial Intelligence*, capítulo 22, páginas 256–267. Springer International Publishing, Cham, 2017. ISBN 978-3-319-59650-1.
- [6] ANDERSON, D. H., CATCHPOLE, E. A., DE MESTRE, N. J. y PARKES, T. Modelling the spread of grass fires. *The Journal of the Australian Mathematical Society*, vol. 23(4), páginas 451–466, 1982. ISSN 1446-7887.
- [7] ANDERSON, H. E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. General Technical Report INT-122, U.S. Department of Agri-

- culture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1982.
- [8] ANDREWS, P. L. BEHAVE: fire behaviour prediction and fuel modellings system - burn subsystem, part 1. General Technical Report INT-194, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1986.
- [9] ANDREWS, P. L. Current status and future needs of the BehavePlus fire modeling system. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 23(1), páginas 21–33, 2014. ISSN 1049-8001.
- [10] ARELLANO, S., VEGA, J. A., RUIZ, A. D., ARELLANO, A., ÁLVAREZ, J. G., VEGA, D. J. y PÉREZA, E. *Foto-guía de combustibles forestales de Galicia y comportamiento del fuego asociado*. Andavira Editora, España, 2016. ISBN 978-84-8408-986-5.
- [11] ASENSIO, M. I., CASCÓN, J. M., FERRAGUT, L. y HERNÁNDEZ, E. A downscale wind forecasting method based on WRF-HDWF coupling. En *Congress on Numerical Methods in Engineering (CMN2017)*. Spanish Society on Numerical Methods in Engineering, Valencia, 2017.
- [12] ASENSIO, M. I. y FERRAGUT, L. On a wildland fire model with radiation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 54(1), páginas 137–157, 2002. ISSN 1097-0207.
- [13] ASENSIO, M. I., FERRAGUT, L. y SIMON, J. Modelling of convective phenomena in forest fire. *RACSAM - Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, vol. 96(3), páginas 299–313, 2002.
- [14] ASENSIO, M. I., FERRAGUT, L. y SIMON, J. A convection model for fire spread simulation. *Applied Mathematics Letters*, vol. 18(6), páginas 673–677, 2005. ISSN 0893-9659. Special issue on the occasion of MEGA 2003.
- [15] ASENSIO, M. I., PRIETO, D., ÁLVAREZ, D., FERRAGUT, L. y CASCÓN, J. M. GIS-integrated environmental models. En *XXV Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones (XXV CEDYA) / XV Congreso de Matemática Aplicada (XV CMA)*. Cartagena, 2017.
- [16] ATLAS. Automatically Tuned Linear Algebra Software. 2004. Disponible en <http://math-atlas.sourceforge.net/> (último acceso, 15 de julio de 2014).
- [17] BAZARAA, M. S. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. Wiley Publishing, 2006. ISBN 978-047148600-8.

- [18] BEEZLEY, J. D. y MANDEL, J. Morphing ensemble Kalman filters. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 60(1), páginas 131–140, 2008. ISSN 1573-3009.
- [19] BENGTSSON, L., ANDRAE, U., ASPELIEN, T., BATRAK, Y., CALVO, J., DE ROOY, W., GLEESON, E., HANSEN-SASS, B., HOMLEID, M., HORTAL, M., IVARSSON, K. I., LENDERINK, G., NIEMELÄ, S., NIELSEN, K. P., ONVLEE, J., RONTU, L., SAMUELSSON, P., SANTOS, D., SUBIAS, A., TIJM, S., TOLL, V., YANG, X. y ØDEGAARD KØLTZOW, M. The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Monthly Weather Review*, vol. 145(5), páginas 1919–1935, 2017. ISSN 0027-0644.
- [20] BENZI, M., FERRAGUT, L., PENNACCHIO, M. y SIMONCINI, V. Solution of linear systems from an optimal control problem arising in wind simulation. *Numerical Linear Algebra with Applications*, vol. 17(6), páginas 895–915, 2010. ISSN 1099-1506.
- [21] BLANCO, J., GARCÍA, D., CASTELLNOU, M., MOLINA, D., GRILLO, F. y POUS, E. *Curso básico de incendios forestales*. Universidad de Lérida, Lleida, 2008.
- [22] BOE. Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. 2007. Disponible en: [http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/5B614FA3-5B57-4838-9D08-1434B8FD2DD5/70540/RD\\_1071\\_2007.pdf](http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/5B614FA3-5B57-4838-9D08-1434B8FD2DD5/70540/RD_1071_2007.pdf).
- [23] BUCKINGHAM, E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review.*, vol. 4, páginas 345–376, 1914. ISSN 0031-899X.
- [24] BUTLER, B. W., FINNEY, M. A., ANDREWS, P. L. y ALBINI, F. A. A radiation-driven model for crown fire spread. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34(8), páginas 1588–1599, 2004.
- [25] CAMPOLONGO, F. y SALTELLI, A. Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 57(1), páginas 49–69, 1997. ISSN 0951-8320. The role of sensitivity analysis in the corroboration of models and its links to model structural and parametric uncertainty.
- [26] CASCÓN, J. M., ENGD AHL, A., FERRAGUT, L. y HERNÁNDEZ, E. A reduced basis for a local high definition wind model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 311, páginas 438–456, 2016. ISSN 0045-7825.

- [27] CENTRO DE COORDINACIÓN DE LA INFORMACIÓN NACIONAL DE INCENDIOS FORESTALES. Estadística General de Incendios Forestales. Technical report 01/01/2017 - 31/12/2017. AVANCE INFORMATIVO, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, 2018. Disponible en: <http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas>.
- [28] CHAPMAN, B., JOST, G. y VAN DER PAS, R. *Using OpenMP: portable shared memory parallel programming*. Scientific and Engineering Computation. The MIT Press, 2007. ISBN 978-026253302-2.
- [29] CHUI, C. K. y CHEN, G. *Kalman filtering with real-time applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-87849-0.
- [30] CHUVIECO, E. y SALAS, J. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 10(3), páginas 333–345, 1996. ISSN 1365-8816.
- [31] COPERNICUS EMERGENCY MANAGEMENT SERVICE AND THE GROUP ON EARTH OBSERVATIONS. Global Wildfire Information System. Aplicación WEB: <http://gwis.jrc.ec.europa.eu/>, 2018. Último acceso: mayo, 2018.
- [32] COX, G. *Combustion fundamentals of fire*. Combustion treatise. Academic Press, Londres, 1995. ISBN 978-01-2194-230-4.
- [33] DAVENPORT, A. G., GRIMMOND, C. S. B., OKE, T. R. y WIERINGA, J. Estimating the roughness of cities and sheltered country. En *Preprints Twelfth Conference on Applied Climatology*, páginas 96–99. American Meteorological Society, 2000.
- [34] ESRI. What is a Python add-in? 2016. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guide-books/python-addins/what-is-a-python-add-in.htm>.
- [35] ESRI. What is ArcPy? 2016. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/arcpy/what-is-arcpy-.htm>.
- [36] EVENSEN, G. *Data assimilation: The Ensemble Kalman Filter*. Springer Science & Business Media, 2009. ISBN 978-3-642-03711-5.
- [37] FERRAGUT, L., ASENSIO, M. I., CASCÓN, J. M. y PRIETO, D. A simplified wildland fire model applied to a real case. En *Advances in Differential Equations and Applications* (editado por F. Casas y V. Martínez), vol. 4 de *SEMA SIMAI Springer Series*, capítulo 16, páginas 155–167. Springer International Publishing, Cham, 2014. ISBN 978-3-319-06953-1.

- 
- [38] FERRAGUT, L., ASENSIO, M. I., CASCÓN, J. M. y PRIETO, D. A wildland fire physical model well suited to data assimilation. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 172(1), páginas 121–139, 2015. ISSN 1420-9136.
- [39] FERRAGUT, L., ASENSIO, M. I., CASCÓN, J. M., PRIETO, D. y RAMÍREZ, J. An efficient algorithm for solving a multi-layer convection–diffusion problem applied to air pollution problems. *Advances in Engineering Software*, vol. 65(C), páginas 191–199, 2013. ISSN 0965-9978.
- [40] FERRAGUT, L., ASENSIO, M. I. y MONEDERO, S. Modelling radiation and moisture content in fire spread. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 23(9), páginas 819–833, 2007. ISSN 1099-0887.
- [41] FERRAGUT, L., ASENSIO, M. I. y MONEDERO, S. A numerical method for solving convection-reaction-diffusion multivalued equations in fire spread modelling. *Advances in Engineering Software*, vol. 38(6), páginas 366–371, 2007. ISSN 0965-9978. *Advances in Numerical Methods for Environmental Engineering*.
- [42] FERRAGUT, L., ASENSIO, M. I. y SIMON, J. High definition local adjustment model of 3D wind fields performing only 2D computations. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, vol. 27(4), páginas 510–523, 2011. ISSN 2040-7947.
- [43] FILIPPI, J. B., MALLET, V. y NADER, B. Representation and evaluation of wildfire propagation simulations. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 23(1), páginas 46–57, 2014. ISSN 1049-8001.
- [44] FINNEY, M. A. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 (revised), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT, 2004.
- [45] FLANNIGAN, M. D., KRAWCHUK, M. A., DE GROOT, W. J., WOTTON, B. M. y GOWMAN, L. M. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18(5), páginas 483–507, 2009. ISSN 1049-8001.
- [46] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Fire management global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. Número 151 en FAO forestry paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 2007. ISBN 978-92-5105-666-0.

- [47] GIGLIO, L., RANDERSON, J. T. y VAN DER WERF, G. R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 118(1), páginas 317–328, 2013. ISSN 2169-8961.
- [48] GRISHIN, A. M. *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Publishing House of Tomsk State University, Tomsk, Russia, 1997. ISBN 978-57-5110-840-3. English translation edition. Translated from Russian by M. Czuma, L. Chikina and L. Smokotina.
- [49] GRISHIN, A. M., GRUZIN, A. D. y GRUZINA, E. E. Aerodynamics and heat exchange between the front of a forest fire and the surface layer of the atmosphere. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 25, páginas 889–894, 1984. ISSN 0021-8944. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System.
- [50] HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 32(2), páginas 135–154, 1994. ISSN 1573-2959.
- [51] INSTITUTO PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA (ICONA). *Guía fotográfica para la identificación de modelos de combustible*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid, 1987.
- [52] INSTITUTO PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA (ICONA). *Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible, Defensa contra incendios forestales*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid, 1990.
- [53] JOHNS, C. J. y MANDEL, J. A two-stage ensemble Kalman filter for smooth data assimilation. *Environmental and Ecological Statistics*, vol. 15(1), páginas 101–110, 2008. ISSN 1573-3009.
- [54] JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION. SIM-LAB Version 2.2 Simulation environment for uncertainty and sensitivity analysis. 2009. Disponible en <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab> (último acceso, 15 de marzo de 2015).
- [55] KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Journal of Basic Engineering*, vol. 82, páginas 35–45, 1960.
- [56] LINN, R. R. y CUNNINGHAM, P. Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: Basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110(D13), páginas 1–19, 2005. ISSN 2169-8996.

- [57] LINN, R. R., REISNER, J., COLMAN, J. J. y WINTERKAMP, J. Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 11(4), páginas 233–246, 2002. ISSN 1049-8001.
- [58] MANDEL, J., AMRAM, S., BEEZLEY, J. D., KELMAN, G., KOCHANSKI, A. K., KONDRATENKO, V. Y., LYNN, B. H., B. REGEV y VEJMEJKA, M. Recent advances and applications of WRF-SFIRE. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14(10), páginas 2829–2845, 2014. ISSN 2829-2845. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System.
- [59] MANDEL, J., BEEZLEY, J. D. y KOCHANSKI, A. K. Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011. *Geoscientific Model Development*, vol. 4(3), páginas 591–610, 2011. ISSN 1991-959X.
- [60] MANDEL, J., BENNETHUM, L. S., BEEZLEY, J. D., COEN, J. L., DOUGLAS, C. C., KIM, M. y VODACEK, A. A wildland fire model with data assimilation. *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 79(3), páginas 584–606, 2008. ISSN 0378-4754.
- [61] MARGERIT, J. y SÉRO-GUILLAUME, O. Modelling forest fires. Part II: reduction to two-dimensional models and simulation of propagation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45(8), páginas 1723–1737, 2002. ISSN 0017-9310.
- [62] MELL, W., JENKINS, M. A., GOULD, J. y CHENEY, P. A physics-based approach to modelling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 16(1), páginas 1–22, 2007. ISSN 1049-8001.
- [63] MENDES-LOPES, J. M. C., VENTURA, J. M. P. y AMARAL, J. M. P. Flame characteristics, temperature-time curves, and rate of spread in fires propagating in a bed of pinus pinaster needles. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 12(1), páginas 67–84, 2003. ISSN 1049-8001.
- [64] MONTENEGRO, R., PLAZA, A., FERRAGUT, L. y ASENSIO, M. I. Application of a nonlinear evolution model to fire propagation. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, vol. 30(5), páginas 2873–2882, 1997. ISSN 0362-546X. Proceedings of the Second World Congress of Nonlinear Analysts.
- [65] MOORE, G. E. Progress in digital integrated electronics. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 11(3), páginas 36–37, 2006. ISSN 1098-4232. Technical literature, Copyright 1975 IEEE. Reprinted, with permission. Technical Digest. International Electron Devices Meeting, IEEE, 1975, pp. 11-13.

- [66] MORILLO, A. *Análisis del comportamiento del fuego forestal observado y simulado: Estudio del caso del incendio forestal de Osoño (Vilardevós)-Verín-Ourense*. Trabajo fin de máster, Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España, 2011.
- [67] MORVAN, D., LARINI, M., DUPUY, J., FERNANDES, P., MIRANDA, A., ANDRE, J., SÉRO-GUILLAUME, O., CALOGINE, D. y CUINAS, P. Eufirelab: Behaviour modelling of wildland fires: a state of the art. Research Paper D-03-01, EUFIRELAB, 2004.
- [68] NASA. Worldview. Aplicación WEB: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>, 2017. Último acceso: enero, 2018.
- [69] NASA. FIRMS (Fire Information for Resource Management System). Aplicación WEB: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>, 2018. Último acceso: mayo, 2018.
- [70] NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF. The climate data guide: GFED (Global Fire Emissions Database). Publicación WEB: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gfed-global-fire-emissions-database>, 2017. Último acceso: enero, 2018.
- [71] PASTOR, E., ZÁRATE, L., PLANAS, E. y ARNALDOS, J. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 29(2), páginas 139–153, 2003. ISSN 0360-1285.
- [72] PERRY, G. L. W. Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 22(2), páginas 222–245, 1998. ISSN 0309-1333.
- [73] PRIETO, D. *Asimilación de datos en un modelo de incendios forestales e integración en GIS*. Trabajo fin de máster, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, Ávila, España, 2013.
- [74] PRIETO, D., ASENSIO, M. I., FERRAGUT, L. y CASCÓN, J. M. Sensitivity analysis and parameter adjustment in a simplified physical wildland fire model. *Advances in Engineering Software*, vol. 90(C), páginas 98–106, 2015. ISSN 0965-9978.
- [75] PRIETO, D., ASENSIO, M. I., FERRAGUT, L., CASCÓN, J. M. y MORILLO, A. A GIS-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 31(11), páginas 2142–2163, 2017. ISSN 1365-8816.

- 
- [76] PYNE, S. J. The fires this time, and next. *Science*, vol. 294(5544), páginas 1005–1006, 2001. ISSN 0036-8075.
- [77] ROTHERMEL, R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1972.
- [78] ROTHERMEL, R. C. y BURGAN, R. E. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system - FUEL subsystem. General Technical Report INT-167, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1984.
- [79] SAAD, Y. y SCHULTZ, M. H. GMRES: A Generalized Minimal RESidual algorithm for solving nonsymmetric linear systems. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, vol. 7(3), páginas 856–869, 1986. ISSN 0196-5204.
- [80] SAKOV, P. y OKE, P. R. A deterministic formulation of the ensemble Kalman filter: an alternative to ensemble square root filters. *Tellus A*, vol. 60(2), páginas 361–371, 2008. ISSN 1600-0870.
- [81] SALTELLI, A., RATTO, M., ANDRES, T., CAMPOLONGO, F., CARIBONI, J., GATELLI, D., SAISANA, M. y TARANTOLA, S. *Global Sensitivity Analysis. The primer*. John Wiley & Sons, Ltd., 2008. ISBN 978-047005997-5.
- [82] SALTELLI, A., TARANTOLA, S., CAMPOLONGO, F. y RATTO, M. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. ISBN 978-047087093-8.
- [83] SALTELLI, A., TARANTOLA, S. y CHAN, K. P. S. A quantitative, model independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, vol. 41(1), páginas 39–56, 1999. ISSN 0040-1706.
- [84] SALVADOR, R., NOL, J. P., TARANTOLA, S. y PLA, E. Global sensitivity analysis and scale effects of a fire propagation model used over mediterranean shrublands. *Ecological Modelling*, vol. 136(2), páginas 175–189, 2001. ISSN 0304-3800.
- [85] SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DURRANT, T., BOCA, R., LIBERTÀ, G., BRANCO, A., DE RIGO, D., FERRARI, D., MAIANTI, P. y ARTÉS, T. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2016. Technical report EUR 28707 EN, Institute for Environment and Sustainability. Joint Research Centre. European Commission, Luxembourg, 2017. Disponible en: <http://effis.jrc.ec.europa.eu/reports-and-publications/annual-fire-reports>.

- [86] SCOTT, J. H. y BURGAN, R. E. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. General Technical Report RMRS-GTR-153, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005.
- [87] SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D. M., DUDA, K. G., HUANG, X. Y., WANG, W. y POWERS, J. G. A description of the advanced research WRF version 3. Technical note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, 2008.
- [88] SKIDMORE, A. *Environmental modelling with GIS and remote sensing*. Taylor & Francis, London, 2002. ISBN 978-020330221-7.
- [89] S.NUNES, M. C., VASCONCELOS, M. J., PEREIRA, J. M. C., DASGUPTA, N., ALLDREDGE, R. J. y REGO, F. C. Land cover type and fire in Portugal: Do fires burn land cover selectively? *Landscape Ecology*, vol. 20(6), páginas 661–673, 2005. ISSN 1572-9761.
- [90] SOBOL, I. M. Sensitivity estimates for non-linear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiment*, vol. 1(4), páginas 407–414, 1993.
- [91] SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18(4), páginas 349–368, 2009. ISSN 1049-8001.
- [92] SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18(4), páginas 369–386, 2009. ISSN 1049-8001.
- [93] SULLIVAN, A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18(4), páginas 387–403, 2009. ISSN 1049-8001.
- [94] SÉRO-GUILLAUME, O. y MARGERIT, J. Modelling forest fires. Part I: a complete set of equations derived by extended irreversible thermodynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45(8), páginas 1705–1722, 2002. ISSN 0017-9310.
- [95] WEBER, R. O. Analytical models for fire spread due to radiation. *Combustion and Flame*, vol. 78(3), páginas 398–408, 1989. ISSN 0010-2180.
- [96] WEBER, R. O. Toward a comprehensive wildfire spread model. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 1(4), páginas 245–248, 1991. ISSN 1049-8001.

- 
- [97] WILLIAMS, T. M., WILLIAMS, B. J. y SONG, B. Modeling a historic forest fire using GIS and Farsite. *Mathematical & Computational Forestry & Natural Resource Sciences*, vol. 6(2), páginas 80–88, 2014. ISSN 1946-7664.
- [98] YASSEMI, S., DRAGICEVIC, S. y SCHMIDT, M. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modelling*, vol. 210(1), páginas 71–84, 2008. ISSN 0304-3800.



# Lista de acrónimos

API.....	<i>Application Programming Interface</i>
ATLAS .....	<i>Automatically Tuned Linear Algebra Software</i>
BTN25.....	<i>Base Topográfica Nacional 1:25.000</i>
CDTI.....	<i>Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial</i>
CUDA .....	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DEM.....	<i>Digital Elevation Model</i>
DENKF .....	<i>Deterministic Ensemble Kalman Filter</i>
EFAST .....	<i>Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test</i>
EGIF .....	<i>Estadística General de Incendios Forestales</i>
EKF .....	<i>Extended Kalman Filter</i>
ENKF.....	<i>Ensembled Kalman Filter</i>
EOS .....	<i>Earth Observing System</i>
FAO .....	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FAST .....	<i>Fourier Amplitude Sensitivity Test</i>
<i>f.d.p.</i> .....	<i>función de densidad de probabilidad</i>
FEDER.....	<i>Fondo Europeo de Desarrollo Regional</i>
<i>FTH</i> .....	<i>Fire Thickness</i>
GFED .....	<i>Global Fire Emissions Database</i>
GIF .....	<i>Grandes Incendios Forestales</i>
GIS .....	<i>Geographic Information System</i>
GMRES .....	<i>Generalized Minimal RESidual</i>

---

GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
GSA	<i>Global Sensitivity Analysis</i>
HDWIND	<i>High Definition Wind Field</i>
HPC	<i>High Performance Computing</i>
ICONA	<i>Instituto para la Conservación de la Naturaleza</i>
IGN	<i>Instituto Geográfico Nacional</i>
ITACYL	<i>Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León</i>
JCR	<i>Journal Citation Reports</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
LÍDAR	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
MAPAMA	<i>Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente</i>
MDE	<i>Modelo Digital de Elevaciones</i>
MDT05	<i>Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 5 m</i>
MFE25	<i>Mapa Forestal de España a escala 1:25.000</i>
MFE50	<i>Mapa Forestal de España a escala 1:50.000</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OPENMP	<i>Open Multi-Processing</i>
OPI	<i>Organismo Público de Investigación</i>
PHYFIRE	<i>Physical Forest Fire Spread</i>
PNOA	<i>Plan Nacional de Ortofotografía Aérea</i>
RoS	<i>Rate of Spread</i>
SIANI	<i>Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería</i>
SIG	<i>Sistema de Información Geográfica</i>

---

SIGMENA....	<i>Sistema de Información Geográfica del Medio Natural</i>
SINUMCC....	<i>Simulación Numérica y Cálculo Científico</i>
SIOSE.....	<i>Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España</i>
USA.....	<i>United States of America</i>
VIIRS.....	<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>
WFDS.....	<i>Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator</i>
WRF.....	<i>Weather Research and Forecasting</i>



