



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# **Integración de un simulador de la evolución de incendios forestales en sistemas de mando y control para la gestión de emergencias**

*Autor:* Edwin Raúl Silva Urquizo

*Director:* Dr. D. Manuel Esteve Domingo

*Fecha de comienzo:* 6/04/2017

*Lugar de trabajo:* Grupo de Sistemas de Tiempo Real y Distribuidos



*Objetivos*

- Analizar los principales factores que intervienen en el modelamiento de un incendio forestal.
- Conocer las opciones de software libre disponibles para gestión de información geográfica e identificar el más adecuado.
- Generar un mapa con capas de información geográfica necesarias para realizar una simulación de incendios.
- Identificar las actuales opciones de software para simulación de incendios y seleccionar el más adecuado.
- Llevar a cabo mediante un ordenador una simulación de incendio forestal en una zona de riesgo de la Comunidad Valenciana.
- Realizar la implementación del simulador en el sistema SIMACOP.

*Metodología*

- Revisión bibliográfica.
- Adquisición de conceptos de propagación de incendios.
- Delimitación del problema.
- Simulación de un evento de incendio forestal.
- Redacción de la documentación.

*Desarrollos teóricos realizados*

En el desarrollo del trabajo fin de master se estudiaron conceptos relacionados a sistemas de predicción sobre la evolución de incendios forestales, se evaluó software existente en gestión información geográfica SIG, para obtener información que luego sirvió de entrada para los sistemas de simulación de propagación de incendios, se evaluaron los programas existentes y los estudios realizados por investigaciones académicas acerca de los mismos, lo cual permitió determinar el de mayor pertinencia al estudio, y que posteriormente fue utilizado para la simulación de un evento de incendio forestal.

*Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio*

- Diseño de la arquitectura para un sistema de tiempo real para emergencia de incendios

*Resultados*

En el desarrollo de esta tesina se logró en primera instancia adquirir los conocimientos que giran alrededor de la simulación de propagación de incendios, permitiendo conocer su modelamiento y las abstracciones que influyen para que ocurran estos eventos. Se realizó un ejercicio práctico de simulación conjugando el software QGIS, los mapas digitales de elevaciones MDE y el Simulador de incendios FARSITE para el resultado integrarlo en el sistema de mando y control para la gestión de emergencias SIMACOP.

*Líneas futuras*

- Validar la arquitectura diseñada.
- Desarrollar un software integral para todas las funciones de simulación requeridas.
- Evaluar los resultados de simulaciones del nuevo simulador de incendios de SIMACOP en ambientes reales

*Publicaciones*

- De momento no hay publicación alguna

## Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster analiza los principales factores que intervienen en el modelamiento de un incendio forestal como son la característica de los combustibles, la topografía del sitio, las condiciones climáticas y meteorológicas, humedad, existencia de cortafuegos. Se parte de la investigación acerca de los actuales programas libres disponibles para gestión de información geográfica (SIG), como son gvSIG, GRASS, Kosmo, OpenJump, Saga, uDig, QGIS y mediante la comparación de sus características se define como el indicado a QGIS, utilizando como origen de datos los mapas modelo digital de elevaciones (MDE) del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), se extraen capas ráster que luego son utilizadas como entradas para el software de simulación de propagación de incendios FARSITE el cual es seleccionado sobre otros luego de un análisis sus principales características. Finalmente se realiza la simulación de la propagación de un incendio en el Parque natural de la Sierra Calderona que se encuentra ubicado entre la provincia de Castellón y la provincia de Valencia, en la Comunidad Valenciana, obteniéndose resultados que fueron exportados en formato KLM y archivo de texto para luego ser utilizados en SIMACOP.

**Palabras clave:** SIG, GIS, FARSITE, SIMACOP, Sistemas de mando y control.

## Abstract

The present final Master's work analyzes the most important factors involved in the modeling of a forest fire, for instance the characteristic of fuels, site topography, climatic and meteorological conditions, humidity, and existence of firewalls. It starts since the investigation about the current free software available for geographic information system (GIS), such as gvSIG, GRASS, Kosmo, OpenJump, Saga, uDig, QGIS, and by comparing its characteristics it was defined that the indicated is QGIS. By using the digital elevation model maps (MDE) of the National Geographic Information Center (CNIG) as the data source, it is extracted ráster layers that are then used as inputs for the FARSITE fire propagation simulation software, which is selected over others after an analysis of its main characteristics. Finally, the simulation of the spread of a fire in the Natural Park of the Sierra Calderona is performed. This place is located between the province of Castellón and the province of Valencia, in the Valencian Community. Results obtained were exported in KLM format and text file, so that they can be used in SIMACOP.

**Keywords:** SIG, GIS, FARSITE, SIMACOP, Command and control systems.

Autor: Silva Urquizo Edwin Raúl, email: [edsilur@teleco.upv.es](mailto:edsilur@teleco.upv.es)

Director: Dr. D. Esteve Domingo Manuel, email: [mesteve@dcom.upv.es](mailto:mesteve@dcom.upv.es)

Fecha de entrega: 11-09-2017

## ÍNDICE

I. INTRODUCCION .....	5
II. ESTADO DEL ARTE .....	5
II.1. Sistemas de Información Geográfica SIG .....	6
II.1.1. Comparación de software SIG .....	8
II.2. MODELADO DE INCENDIOS .....	10
II.2.1. SIMULADORES DE INCENDIOS .....	12
III. DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS .....	14
III.1. Sistemas de información geográfica GVSIG y QGIS.....	14
III.1.1. Generación de capas en QGIS .....	14
III.2. Simulador FARSITE .....	17
IV. Simulación .....	20
IV.1. Archivos de paisaje.....	20
IV.2. Datos de entrada .....	21
IV.3. Configuración de la simulación .....	23
IV.3.1. Parámetros del modelo .....	24
IV.3.2. Duración de la simulación.....	24
IV.3.3. Localización del punto de ignición .....	25
IV.4. Configuración de salidas .....	25
IV.5. Resultados de la simulación .....	25
V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	26
V.1. CONCLUSIONES .....	26
V.2. LÍNEAS FUTURAS .....	27
VI. AGRADECIMIENTOS .....	27
VII. BIBLIOGRAFÍA .....	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Focos actuales de incendios a nivel mundial (2017-07-07).....	5
Fig. 2 Representación en formato ráster y vectorial.....	6
Fig. 3 Descomposición de una imagen en varias capas .....	7
Fig. 4 Ventajas y desventajas del modelo vectorial .....	7
Fig. 5 Ventajas y desventajas del modelo ráster .....	8
Fig. 6 Resultados del interés a lo largo del tiempo en la búsqueda de información en Google de los programas SIG durante los últimos cinco años .....	9
Fig. 7 Resultados del interés a lo largo del tiempo en la búsqueda de información en Google de los programas SIG durante los últimos cinco años para España .....	10

Integración de un simulador de la evolución de incendios forestales en sistemas de mando y control para la gestión de emergencias	4
Fig. 8 Descarga de mapas del Centro Nacional de Información Geográfica	14
Fig. 9 Mapa del Parque natural Sierra Calderona [18]	15
Fig. 10 Mapa del área de estudio	15
Fig. 11 Proceso de obtención en QGIS de los mapas base para el análisis de la simulación	16
Fig. 12 Capas de datos para las simulaciones de fuego requeridas por FARSITE [20]	18
Fig. 13 Creación del archivo de paisaje LCP en FARSITE	18
Fig. 14 Capas esenciales para la creación del archivo de paisaje	19
Fig. 15 Esquema de los datos necesarios de entrada en FARSITE	20
Fig. 16 Ruta para generar un Landscape File en FARSITE	21
Fig. 17 Ventana para generar un Landscape File	21
Fig. 18 Datos de entrada para simulación	21
Fig. 19 Factores de ajuste asociados al combustible	22
Fig. 20 Humedad inicial de combustible	22
Fig. 21 Editor del flujo de tiempo	23
Fig. 22 Editor del flujo de vientos	23
Fig. 23 Definición de parámetros del modelo	24
Fig. 24 Duración de la simulación	24
Fig. 25 Opciones de exportación y salida de resultados	25
Fig. 26 Resultado de la simulación mostrada en FARSITE	26
Fig. 27 Representación del área afectada en Google Earth	26

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultado de comparación de programas SIG	9
Tabla 2 Clasificación de los modelos de fuego [13]	12
Tabla 3: Comparación de simuladores de incendio y sus principales características [13], [16]	14

## I. INTRODUCCION

Desde la antigüedad el comportamiento de los incendios forestales han sido un problema muy complicado de entender y por esta razón, difícil de extinguirlo, lo que ha causado destrucción de ecosistemas [1], además de pérdidas económicas y en muchas oportunidades trágicas pérdidas de vidas humanas. Conocer la velocidad con la que avanza el fuego, su dirección y los daños potenciales que puede ocasionar es vital en la lucha contra su extinción [2]. Por lo tanto, es útil para las instituciones de defensa y control de incendios conocer el tiempo óptimo para actuar en cada fase de combate, minimizando de esta manera el impacto ambiental, social y económico. Los factores que intervienen de manera directa en la ocurrencia y forma de propagación de un incendio, es decir, su tamaño, son entre otros: la característica de los combustibles, la topografía del sitio, las condiciones climáticas y meteorológicas, humedad, existencia de cortafuegos. [3]. Existe una variada diversidad de investigaciones que se han desarrollado para comprender el comportamiento de la evolución de incendios, sin embargo, son destacables aquellos que reúnen estudios de laboratorio con pruebas realizadas en campo, formando equipos multidisciplinarios [4].

Resulta necesario contar con una herramienta que permita tomar decisiones rápidamente durante la evolución de un evento de incendio para definir las estrategias que seguirán los grupos especializados de protección contra incendios.

## II. ESTADO DEL ARTE

Los incendios que afectan al planeta tienen una relación directa con las alteraciones sufridas por el cambio climático como son el aumento de la temperatura, disminución de la precipitación, prolongándose los períodos secos (sequías), mayor frecuencia de olas de calor, estos conjuntos de condiciones favorecen la propagación de incendios forestales, dificultando a la vez su control.

En la Fig. 1 tomada del Sistema de Datos e Información del Sistema de Observación de la Tierra (EOSDIS) [5], se muestran los focos actuales de incendios a nivel mundial y de las últimas 24 horas.

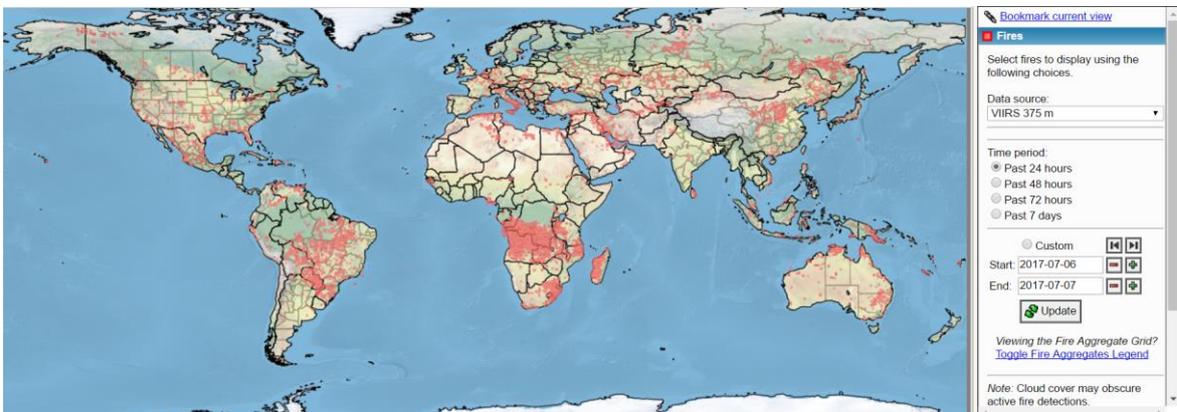


Fig. 1 Focos actuales de incendios a nivel mundial (2017-07-07)

Existen diversos estudios sobre propagación de incendios y prevención de los mismos, enfocados cada uno a criterios variados como son el entorno forestal, donde se plantea incrementar la atención

hacia labores preventivas que contribuyan a disminuir los riesgos y a facilitar las tareas de extinción [6]. Haciendo referencia a la detección temprana de los incendios se han planteado trabajos basados en teledetección utilizando procesamiento de imágenes y uso de sensores [7]. Existen también estudios en los cuales se evalúan las diferentes características que hacen que el fuego tenga variaciones en su comportamiento usando para ello simulaciones en ordenador y obteniendo mapas de riesgo.

### II.1. Sistemas de Información Geográfica SIG

Sistema de información es la agrupación de elementos encaminados a la gestión y tratamiento de datos, preparándolos para su posterior utilización. Un sistema de información geográfica SIG (o en inglés GIS) está creado para ser utilizado con datos cartográficos, georreferenciados en coordenadas espaciales o geográficas, con lo cual es posible ubicar un elemento con mucha precisión, además permite añadir capas de información con datos particulares o atributos de los elementos [8].

Los datos de información se pueden agrupar en diferentes capas lo cual permite una mejor administración, estas capas se activan o desactivan conforme el requerimiento de elementos de la aplicación a utilizarse, por ejemplo, se puede mostrar el mapa de una ciudad con elementos como calles, ríos, paradas de servicio público, entidades de la administración pública, sitios turísticos, entre otros, representados cada uno en una capa diferente.

Los elementos almacenados (información geográfica) en los SIG son representados de dos maneras: en tipo ráster y tipo vectorial, como se puede observar en la Fig. 2. Además, en la Fig. 3 se puede notar la descomposición de una imagen en varias capas las cuales contendrán información específica tanto en formato ráster como en formato vectorial, para ser tratadas, almacenadas o representadas de acuerdo a la aplicación a la cual se las vayan a destinar.

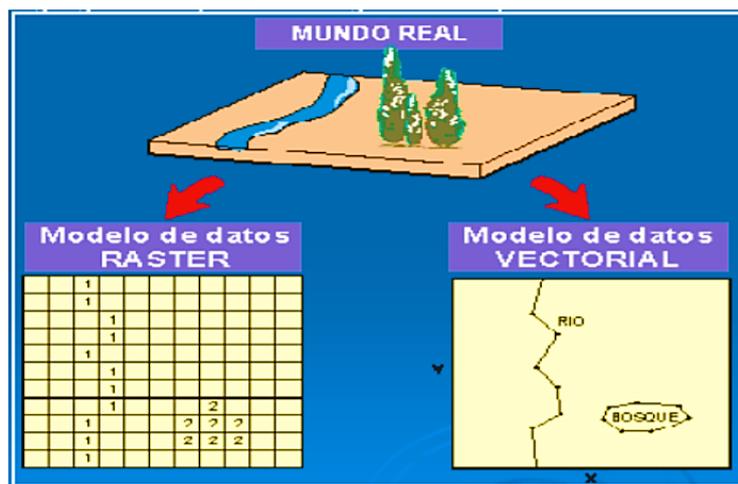


Fig. 2 Representación en formato ráster y vectorial

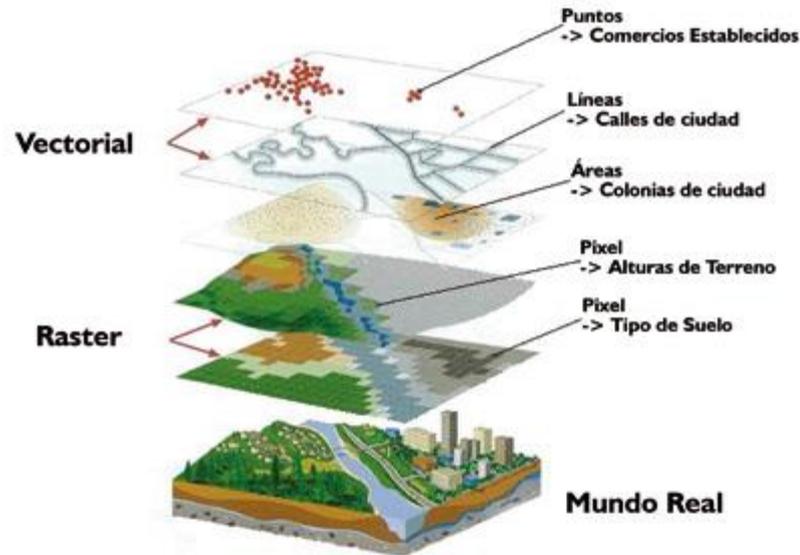


Fig. 3 Descomposición de una imagen en varias capas

El modo ráster funciona en base a división del área en varias cuadrículas o píxeles creando una matriz de posiciones llamada también malla coordinada cuyos elementos adoptan diferentes valores de acuerdo a la entidad a la que están representando y el modo vectorial almacena la información en base a puntos, líneas o polígonos georreferenciados en un conjunto de pares de coordenadas.

En la Fig. 4 se presentan las ventajas y desventajas del modelo vectorial y en la Fig. 5 las correspondientes al modelo ráster.

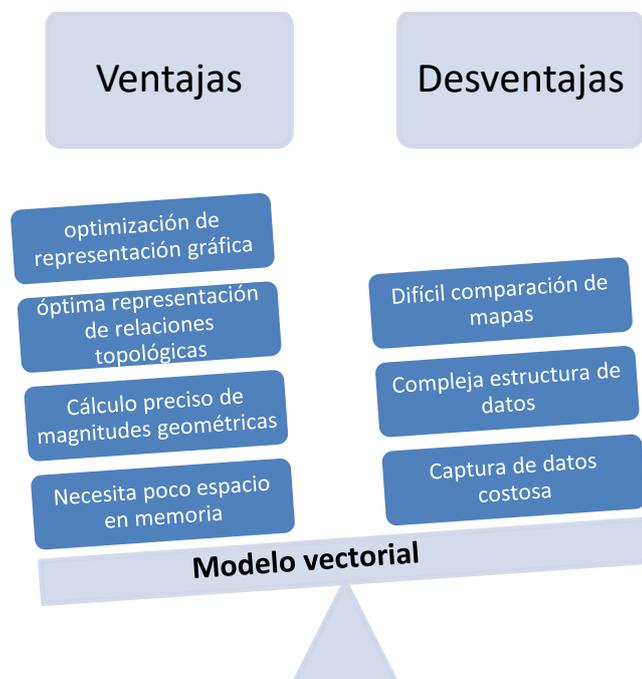


Fig. 4 Ventajas y desventajas del modelo vectorial

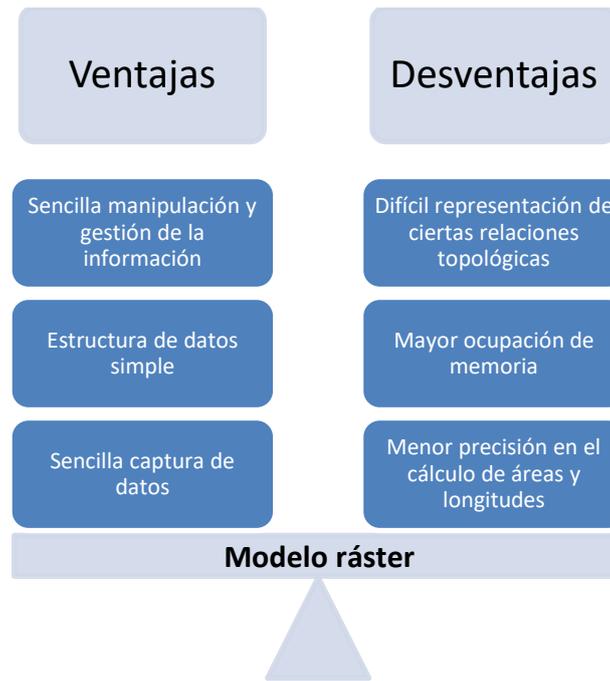


Fig. 5 Ventajas y desventajas del modelo ráster

Los dos tipos de modelos están orientados a representar diferentes objetos y realizar o representar distintas operaciones geográficas, por lo que según su uso se emplea uno u otro, la combinación de los dos modelos es lo que brinda una mejor comprensión de la realidad y es donde los sistemas de información intentan destacarse.

Otra funcionalidad ampliamente utilizada es el análisis o relaciones entre capas y tratamiento de los datos gracias a los métodos informáticos, con lo cual se puede crear, editar, administrar capas ráster y vectoriales e incluso exportarlas y publicarlas [9].

La información que contienen los SIG representa cada uno de los elementos que existen en la vida real, ya sean carreteras, ríos, casas, etc. El tratamiento de esta información geográfica sedimentada es la característica que los diferencia, para la recolección de datos instantáneos se suele utilizar redes de sensores remotos, datos de GPS, imágenes de aviones no tripulados e imágenes satelitales [10].

### II.1.1. Comparación de software SIG

Existen en la actualidad gran variedad de programas para aplicaciones de información geográfica de escritorio libres que permiten abrir, visualizar y manipular datos. De la revisión de la literatura se tiene el resultado de varias investigaciones científicas las cuales hacen una comparación de los programas más utilizados. En la Tabla 1 se presenta el resultado de comparación de programas SIG realizado en la investigación de Comparación de herramientas SIG Desktop para el desarrollo de SIGPOT [11].

Herramienta	Gradación
gvSIG	4,9
GRASS	4,88
Kosmo	3,47
OpenJump	3,7
Saga	3,01
uDig	3,96
QGIS	4,01

Tabla 1: Resultado de comparación de programas SIG

Por otra parte, el Estudio comparativo de herramientas SIG libres aplicadas a contextos de cooperación al desarrollo [12], muestra también resultados favorables con respecto a las evaluaciones para los programas gvSIG y Quantum GIS (QGIS).

Al realizar una búsqueda en Google Tendencias (Google Trends) para los últimos cinco años, de los principales programas en el campo de Sistemas de Información Geográfica SIG, se visualiza un creciente aumento en el interés de búsqueda para QGIS, mientras gvSIG apenas se encuentra representado.

Se ha incluido también el programa de pago ArcGIS que es el más utilizado en la actualidad, únicamente para comparación pues el presente trabajo se basará en software que no requiera el pago de licenciamiento, no obstante, se puede notar la tendencia decreciente en el interés mundial del uso de ArcGIS y a su vez una creciente tendencia mundial al uso de QGIS, la Fig. 6 muestra el resultado de la búsqueda.

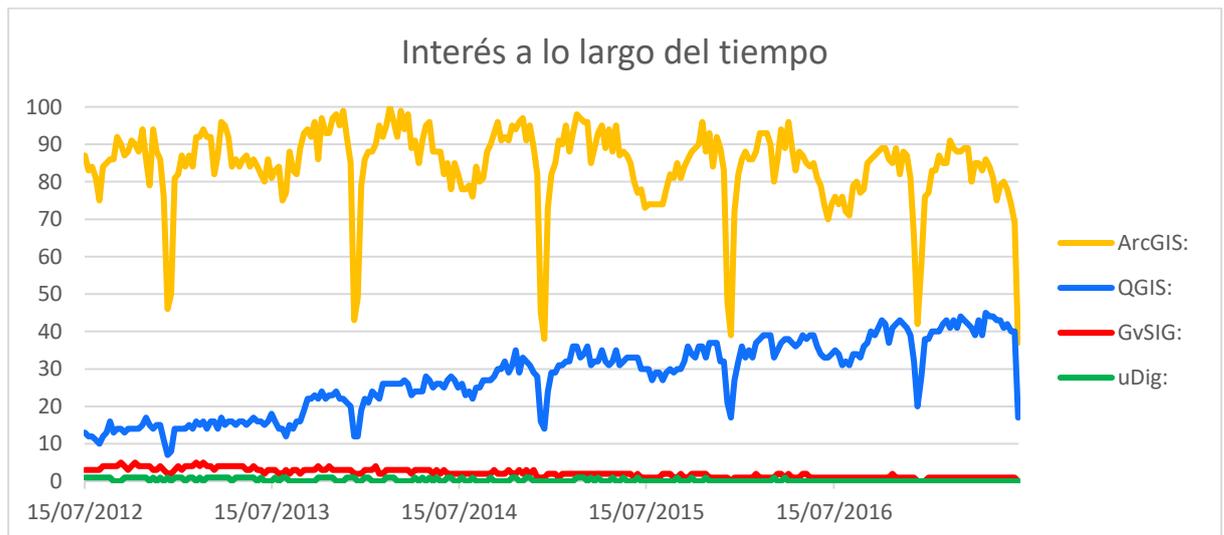


Fig. 6 Resultados del interés a lo largo del tiempo en la búsqueda de información en Google de los programas SIG durante los últimos cinco años

Como caso particular en España, para el mismo intervalo de tiempo se encontraron varias comunidades autónomas en donde en un principio mostraron mayor interés en gvSIG como se muestra en la Fig. 7 en donde el color rojo representa a gvSIG y el azul a QGIS.

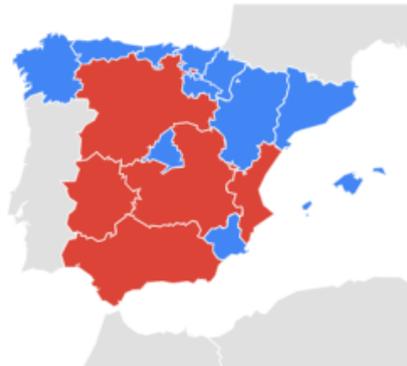


Fig. 7 Resultados del interés a lo largo del tiempo en la búsqueda de información en Google de los programas SIG durante los últimos cinco años para España

## II.2. MODELADO DE INCENDIOS

Se puede explicar como un incendio forestal a la interacción del calor (energía liberada) en la combustión y su transferencia al combustible no quemado próximo y por tanto su ignición [13]. La liberación de calor se encuentra en el dominio de la química y se produce en escala de moléculas, y la propagación en el dominio de la física y se produce en escalas que van desde milímetros hasta kilómetros.

Estos procesos físico químicos evaluados en el tiempo y espacio han hecho difícil la elaboración de un modelo del comportamiento del fuego, es por tanto que existe una gran variedad de métodos empleados en los últimos años para definir un modelo que sea confiable. Estos métodos van desde análisis:

- Puramente físicos que se basan en el análisis de la física y química involucrada en la combustión del combustible de biomasa y el comportamiento de un incendio forestal;
- Puramente empíricos que se basan en la regresión estadística del comportamiento observado del fuego.

Otro estudio clasifica los modelos de fuego en los siguientes dos grupos: modelos físicos y cuasi físicos [14]; Modelos empíricos y cuasi empíricos [15].

	<b>Modelo físico</b>	<b>Modelo cuasi físico</b>	<b>Modelo empírico</b>	<b>Modelo cuasi empírico</b>
<b>Aplicación</b>	Utilizado para simular o explorar un determinado proceso o aspecto físico.	Utilizado en dominios de laboratorio.	Estima la probable propagación en dirección del viento para fines de	Es particularmente adecuado para realizar cálculos más rápidos que en tiempo real con

	Aplicado tanto en dominios de laboratorio como en grandes incendios forestales		planificación de supresión. Se calcula de forma simple y se usa para trazar los resultados en un mapa de pared.	bajos requerimientos de datos.
<b>Principal característica</b>	Utiliza teorías físicas y químicas. se utiliza ecuaciones diferenciales para describir el proceso de dispersión.	Se basa en la teoría de la física. Los parámetros son determinados por experimentos de laboratorio.	Se basa en la observación y el experimento, es decir, es de naturaleza pragmática.	Los datos son obtenidos de la observación experimental y analizados estadísticamente utilizando un marco físico para las relaciones funcionales entre variables dependientes e independientes
<b>Salidas</b>	ROS Energía de combustible liberada Modelos bidimensionales o tridimensionales de propagación del fuego	ROS Intensidad de la línea de fuego Geometría de llamas	ROS Tasa de aumento del perímetro Área de daño por incendio Altura, ángulo y profundidad de las llamas	ROS Calor producido por convección Relación entre el tiempo de combustión y el tiempo característico de la dinámica de la llama Contenido de humedad del combustible Geometría del perímetro del fuego
<b>Ventajas</b>	De naturaleza analítica Se puede representar mejor los combustibles forestales Se puede realizar pruebas	Se basan en un modelo de nivel superior en comparación con los modelos físicos	Implementación relativamente sencilla Relación directa con el comportamiento de los incendios reales	Permite aplacar la influencia del tamaño del conjunto de datos y la elección personal necesario

	computarizada del modelo			
<b>Desventajas</b>	Objetivos restringidos por su complejidad computacional	No es adecuado para la simulación de incendios forestales	Es dependiente de las condiciones obtenidas por los datos de origen, Requiere mayores aproximaciones	Es dependiente de las condiciones obtenidas por los datos de origen, Requiere mayores aproximaciones

Tabla 2 Clasificación de los modelos de fuego [13]

El modelo físico intenta representar la física y la química de la propagación del incendio, el modelo cuasi físico pretende describir solo la física de la propagación, un modelo empírico no toma en cuenta ningún entendimiento físico, se basa en la naturaleza estadística de los incendios, y un modelo cuasi empírico utiliza un marco físico en el que se basa el modelado estadístico [13].

En general para todos estos modelos no se dispone de la información necesaria de datos de entrada para los diferentes escenarios, y las complicaciones de validación de los modelos son también importantes en todos los grandes incendios forestales.

Con base en lo referido, se ha encontrado que los modelos empíricos tienen gran éxito y acogida sobre todo por la facilidad de implementación; además, se constituyen como punto de partida para evaluación de los datos analíticos, permitiendo el desarrollo de modelos semi empíricos o híbridos con mayor número de elementos físicos.

Apoyados con modelos de simulación y con el uso de gráficos por ordenador los modelos son capaces de predecir los patrones de crecimiento de los incendios forestales de forma visual.

En la actualidad se continúa estudiando modelos que se adaptan a las condiciones ambientales y variación espacial y temporal del avance del incendio, estos modelos incluyen: simulación basada en modelos elípticos de incendios forestales, autómatas celulares, propagación de incendios en arrays, cadenas de Markov, modelación de percolación, técnicas de contagio estocástico, técnicas caóticas[13].

### *II.2.1. SIMULADORES DE INCENDIOS*

Existen diferentes tipos de simuladores, que mediante modelos matemáticos y empíricos representan el comportamiento o evolución tanto espacial (propagación) como temporal (tiempo de llegada) del fuego; la propagación es afectada directamente por variables meteorológicas como humedad, temperatura, precipitaciones, contenido de humedad de los combustibles y condiciones del viento, cuyos valores dados por los sistemas de predicción del tiempo tienen cierto nivel de incertidumbre, además es importante tomar en consideración la precisión de la información geográfica dada por el SIG, respecto del terreno de estudio. En la Tabla 3 se muestra el análisis comparativo de simuladores donde se señalan sus principales características como son el modelo de predicción, la técnica de

simulación y la intención de uso, que servirán de soporte para la elección del software de simulación del presente trabajo.

<b>Nombre</b>	<b>Modelo de predicción</b>	<b>Técnica de simulación</b>	<b>Intención de uso (Simulación)</b>	<b>SISTEMA OPERATIVO</b>	<b>Procedencia</b>
Dynafire	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Propagación de incendios superficiales de intensidad baja a moderada	PC con MS-DOS	Estados Unidos
Firemap	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Propagación de incendios superficiales de intensidad baja a moderada	Estación de trabajo UNIX con PROMAP	Estados Unidos
Pyrocart	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Propagación y el comportamiento del incendio forestal	PC con sistema operativo Windows	Nueva Zelanda
Firestation	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Propagación de incendios superficiales de intensidad baja a moderada	PC con sistema operativo Windows	Portugal
Geofogo	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Propagación de incendios superficiales de intensidad baja a moderada	Windows C++	Portugal
Embyr	Probabilístico (Hargrove)	Percolación	Patrones de quemadura a escala de paisaje	Estación de trabajo UNIX	Estados Unidos
Wildfire	Empírico (Fire Danger Group)	Propagación elíptica	Propagación de incendios superficiales de intensidad baja a moderada	PC con MS-DOS	Canadá
SiroFire	Empírico (McArthur)	Propagación elíptica	Propagación y el comportamiento del incendio forestal	PC con sistema operativo Windows	Australia
Farsite	Semiempírico (Rothermel)	Propagación elíptica	Propagación y el comportamiento del incendio forestal	PC con sistema operativo Windows	Estados Unidos

Nombre	Modelo de predicción	Técnica de simulación	Intención de uso (Simulación)	SISTEMA OPERATIVO	Procedencia
Prometheus	Semiempírico (Rothermel)	Propagación elíptica	Propagación y el comportamiento del incendio forestal	Windows C++	Canadá

Tabla 3: Comparación de simuladores de incendio y sus principales características [13], [16]

### III. DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS

#### III.1. Sistemas de información geográfica GVSIG y QGIS

En función de las referencias citadas anteriormente las opciones a ser utilizadas se restringen a los programas gvSIG y QGIS, para obtener los datos de entrada para el simulador de incendio.

En un principio se ejecutó la prueba con gvSIG, programa basado en lenguaje de desarrollo Java, se utilizó el sistema operativo Windows 64 bits, que de acuerdo con la información encontrada en la página oficial era soportado y que al momento de realizar pruebas con operaciones ráster mostró conflicto al requerir Java 32 bits. Esta dificultad no pudo ser superada hasta el momento de redactar el presente trabajo, razón por la cual se optó por utilizar QGIS.

Siendo necesario el trabajar con mapas en formato ráster para la obtención de las capas que servirán de entrada en el sistema de simulación de propagación de incendio se utilizó el paquete SIG QGIS, este software está publicado bajo Licencia Pública GPL y a diferencia de gvSIG utiliza el lenguaje de desarrollo C++, obteniéndose compatibilidad con el ordenador utilizado para las pruebas que cuenta con Sistema Operativo Windows 64 bits.

##### III.1.1. Generación de capas en QGIS

Para la obtención y generación de las capas de entrada que servirán de base para el cálculo de la propagación del incendio en el simulador de incendios, se trabajó con el software libre QGIS. Para generar estas capas ha sido necesario el uso de un mapa base del modelo digital de elevaciones MDE, para este caso se lo ha obtenido del centro de descargas correspondiente al Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) [17] como se muestra en la Fig. 8.

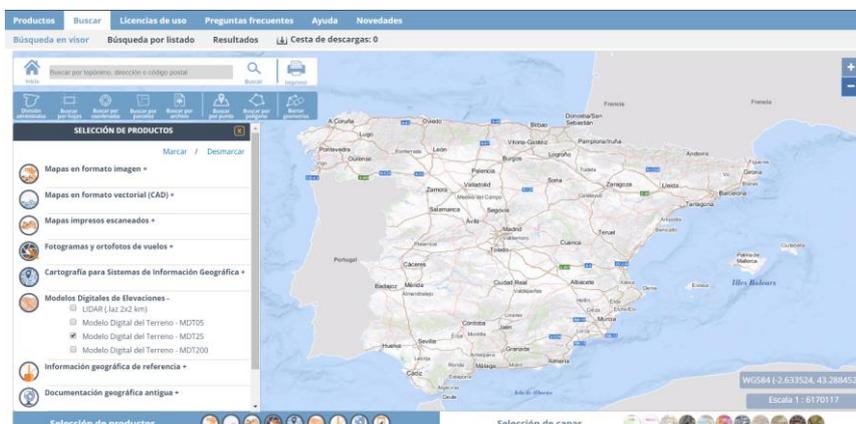


Fig. 8 Descarga de mapas del Centro Nacional de Información Geográfica

El mapa utilizado para este trabajo tiene una escala de referencia de 1:25.000, la zona elegida para el estudio de la propagación de incendio se la determinó mediante la investigación de las áreas de riesgo de incendios de la comunidad valenciana, encontrándose como un lugar adecuado para el análisis y simulación al parque natural de la Sierra Calderona que se encuentra entre las provincias de Valencia y Castellón.



Fig. 9 Mapa del Parque natural Sierra Calderona [18]

Una vez definida el área de estudio, se procedió a descargar el mapa cuyo nombre definido por el CNIG es “PNOA\_MDT25\_ETRS89\_HU30\_0668\_LID.asc”. en la siguiente Fig. 10 se puede ver el mapa del área de estudio, se distingue en tono de verdes el mapa del modelo MDT.

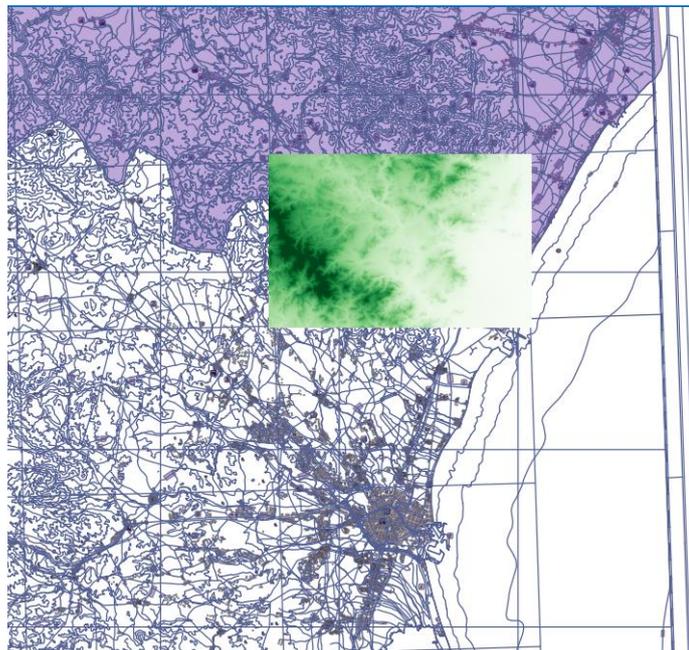


Fig. 10 Mapa del área de estudio

A partir de este MDE se obtiene en QGIS gracias a su herramienta de análisis GDAL los mapas de relieve, pendiente, orientación, y mapa de sombras requeridos para la simulación, estos mapas se los guarda en formato Arc/Info ASCII Grid (\*.asc), en la Fig. 11 se muestra en la parte superior izquierda el mapa MDE, en la parte inferior izquierda se muestra la interfaz de análisis del programa

QGIS, en la parte derecha de arriba hacia abajo se presentan los mapas resultantes del análisis de relieve, pendiente, orientación y mapa de sombras.

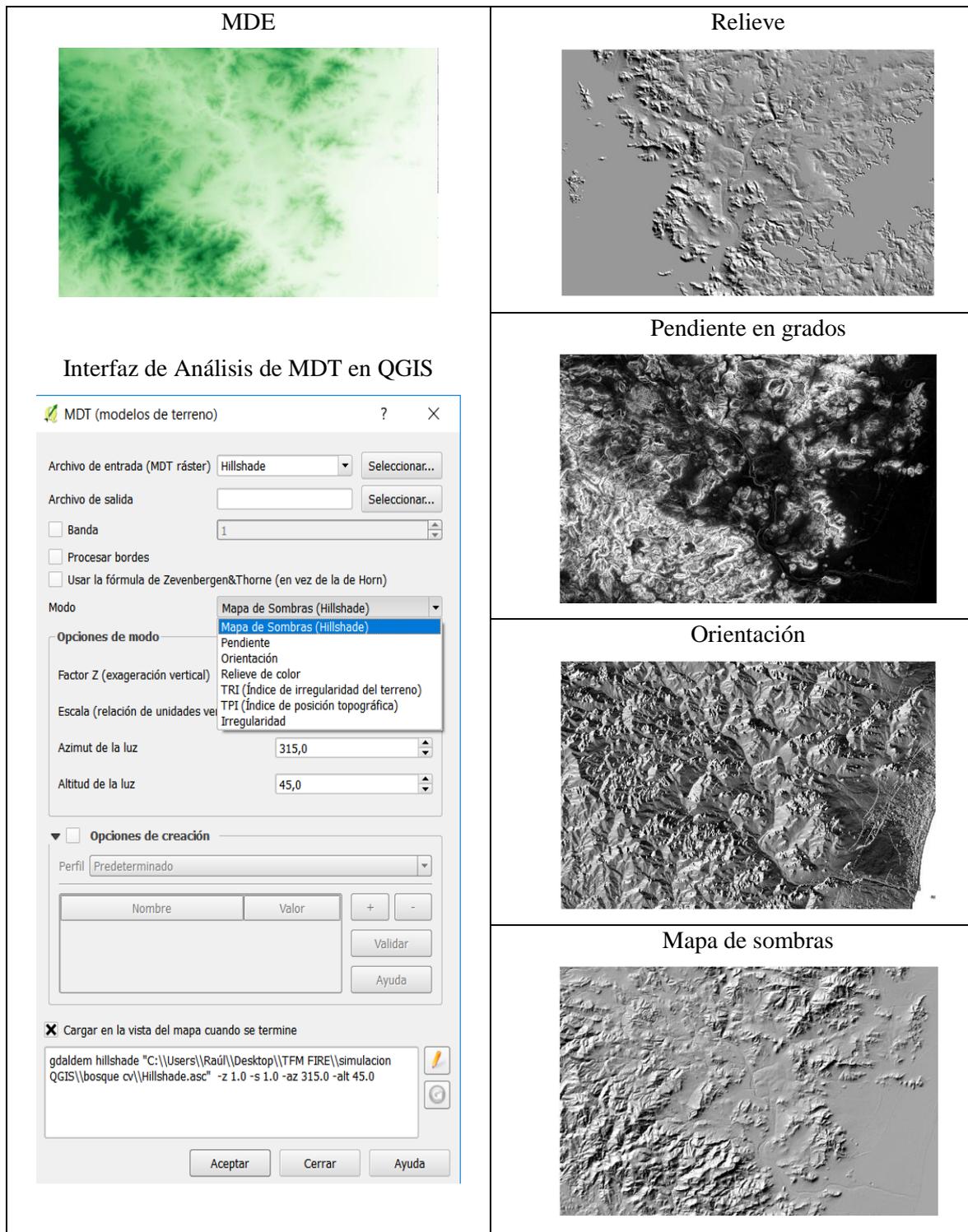


Fig. 11 Proceso de obtención en QGIS de los mapas base para el análisis de la simulación

### *III.2. Simulador FARSITE*

En la investigación realizada sobre simuladores de incendio específicamente de superficie se encontró mayor número de investigadores que consideran a FARSITE como una opción más acertada con predicciones de propagación de incendios más precisas, en diversos trabajos científicos se lo utiliza o se lo compara con otros programas de simulación dándole mayor relevancia a FARSITE [16], además es utilizado por reconocidas instituciones como es el caso del Servicio Forestal de los Estados Unidos [19], y al tratarse de un software libre, de fácil instalación y que funciona en sistema operativo Windows, lo que proporciona flexibilidad para su uso en el campo o en una oficina central de gestión de emergencias. Se puede simular con mucha rapidez distintos escenarios de propagación del incendio tomando como variables las previsiones meteorológicas, registros históricos, además de datos de redes de sensores que se pueden ubicar para obtener información a tiempo real. Por todas estas referencias, la presente investigación consideró al programa de simulación FARSITE como la herramienta apropiada a ser utilizada para realizar la simulación y para analizar su utilización como fuente de alimentación de información para SIMACOP.

FARSITE es un simulador para incendios forestales desarrollado por Mark Finney en 1998. Utiliza ecuaciones físicas de propagación del fuego combinadas con datos espaciales y temporales sobre el clima y los combustibles [20]. El uso del software brinda la posibilidad de evaluar el avance o movimiento de los incendios históricos y también, permite realizar la simulación del comportamiento y evolución del área de incendio en diferentes instantes de tiempo, es decir, predecir la propagación de un posible escenario de incendio futuro, lo que significaría poder identificar zonas de mayor riesgo, en donde se centrarían las acciones de control y mitigación.

El simulador se basa en el sistema de propagación del fuego BEHAVE de Rothermel, e incluye cinco sub-modelos de comportamiento del fuego: fuego superficie, propagación de fuego de corona, aceleración del fuego, humedad del combustible, y mancha de árboles incendiando. Todos los cálculos se aplican a la predicción del perímetro de incendio.

Es posible especificar el inicio del incendio como un punto, pero también se lo puede hacer con una línea o polígono en cuyo caso se realizan los cálculos como ondas elípticas desde los vértices, tomando en consideración la combinación de la velocidad del viento y la pendiente del terreno; la información adicional de topografía y combustibles para estos cálculos se la toma de la información proporcionada por los sistemas de información geográfica SIG en formato ráster; la información del clima se la obtiene con los datos que dependen de cambios de la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, humedad y nubosidad [20].

Con el objetivo de obtener predicciones ajustadas a la realidad de la propagación del incendio, se debe verificar la consistencia y fidelidad de los datos de entrada (capas). Esta información previa necesaria para poder realizar la simulación está relacionada al sitio en donde se simulará el incendio,

FARSITE requiere ocho capas de datos para las simulaciones de fuego de superficie y corona como se muestra en la Fig. 12.

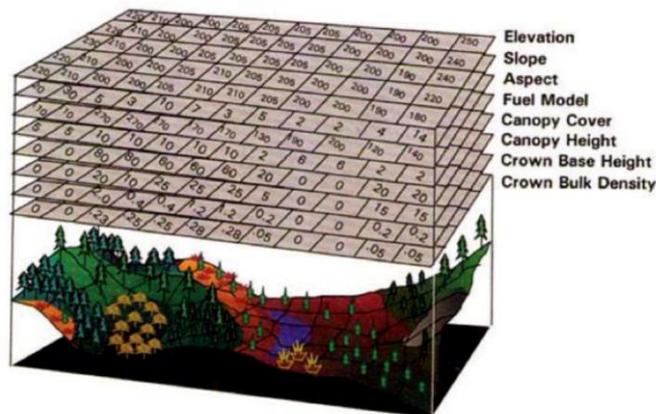


Fig. 12 Capas de datos para las simulaciones de fuego requeridas por FARSITE [20]

Los ficheros de entrada que contienen la información del lugar se las obtiene de los programas cartográficos SIG, dichos mapas deben ser de igual tamaño y deben contener la misma resolución, en formato ráster, deben ser precisas y consistentes para el área de análisis; una vez ingresados los ficheros se crea en el mismo programa FARSITE, un archivo de paisaje (Landscape File.LCP) como se muestra en la Fig. 13.

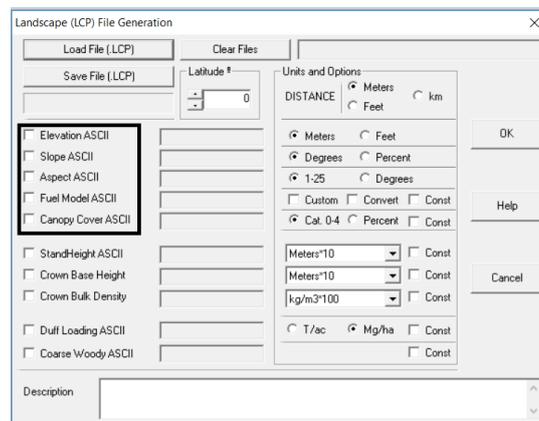


Fig. 13 Creación del archivo de paisaje LCP en FARSITE

Conforme se evidencia en la Fig. 13 para crear el Landscape File.LCP son indispensables las cinco primeras capas señaladas: altura, pendiente, orientación, modelo de combustible y fracción de superficie cubierta. En función de la disponibilidad de información complementaria del terreno a ser analizado y la experiencia de los expertos, se puede agregar las demás capas para ajustar el modelo y hacerlo más preciso. En la Fig. 14 se puede notar las cinco capas esenciales para la creación del archivo de paisaje en FARSITE.



Fig. 14 Capas esenciales para la creación del archivo de paisaje

Adicional al archivo de paisaje se debe ingresar un archivo de información de ajustes que está asociado al combustible, de esta forma se puede mejorar la predicción de la propagación, tomando en cuenta los criterios de los expertos en la zona y los datos locales e históricos, estos valores pueden ser entre 0 y 1, si se elige 1, se mantiene sin cambios el valor determinado de la velocidad de propagación (ROS) dada por el modelo, en cambio si se elige un valor de 0,5 este valor determinado se vería reducido a la mitad, ya para el valor de 0 la velocidad de propagación es nula.

A continuación, se debe ingresar la información correspondiente a la humedad inicial del combustible, la cual corresponde a un archivo de texto y contiene en porcentaje la humedad presente en el combustible al inicio de la simulación. En este archivo se tiene 5 columnas que representan: el modelo de combustible, humedad de combustible muerto en 1 hora, 10 horas, 100 horas, la humedad de combustible vivo corto (herbáceo) y la humedad de combustible vivo grande o leñoso, en resumen, los combustibles vivos tienen un valor constante mientras los combustibles muertos cambian su valor a lo largo del tiempo de la simulación[8].

El siguiente registro de texto a ser ingresado es el archivo correspondiente al clima, estos datos son utilizados para calcular los cambios de humedad en el combustible muerto, estos valores corresponden a su vez a los registros de precipitación, temperatura y humedad del ambiente. Se debe insertar datos de clima de un día anterior al inicio de la simulación.

El archivo de vientos sirve para predecir la dirección y la velocidad de propagación del incendio y gracias a la flexibilidad que brinda el programa permite cargar hasta 5 archivos de este tipo para analizar de mejor manera el comportamiento del fuego con los cambios en la grilla de clima y vientos, para los archivos de clima y vientos se requiere que cuenten con el mismo número de registros (cantidad de días).

En la Fig. 15 se presenta el esquema de los datos necesarios de entrada en FARSITE para realizar la simulación con sus formatos requeridos, como salida de la simulación se puede tener varios archivos para su posterior análisis en la toma de decisiones y además se los puede ver en el mismo

FARSITE, quedando también la posibilidad de exportarlos a diferentes formatos para poderlos observar en cualquier programa SIG como puede ser QGIS o gvSIG.



Fig. 15 Esquema de los datos necesarios de entrada en FARSITE

Como se aprecia en la Fig. 15 se puede también definir un período de quema para la simulación, lo que a su vez permite detener la simulación en condiciones bajas de actividad como una noche fría y húmeda, es decir, que se puede ajustar la simulación en horarios fríos, nubosos o cualquier condición que frenaría la aceleración de la propagación del incendio.

#### IV. SIMULACIÓN

En el presente capítulo se describen las diferentes etapas que se realizaron para dar inicio a la simulación, entre las opciones de configuración del simulador se han elegido las más utilizadas como son las definiciones de parámetros, duración, punto de ignición y barreras corta fuegos.

##### IV.1. Archivos de paisaje

Siguiendo la ruta: Input>Landscape Utilities>Generate Landscape File (.LCP) como se muestra en la Fig. 16, se observa una ventana en donde se procedió a cargar los archivos previamente obtenidos con el software QGIS Fig. 17, en esta simulación se consideró al combustible como constante con el objetivo de analizar el avance del fuego como función del terreno.

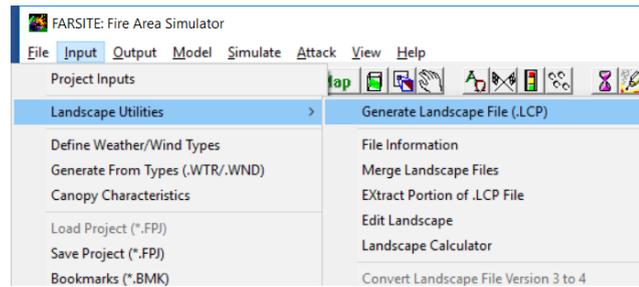


Fig. 16 Ruta para generar un Landscape File en FARSITE

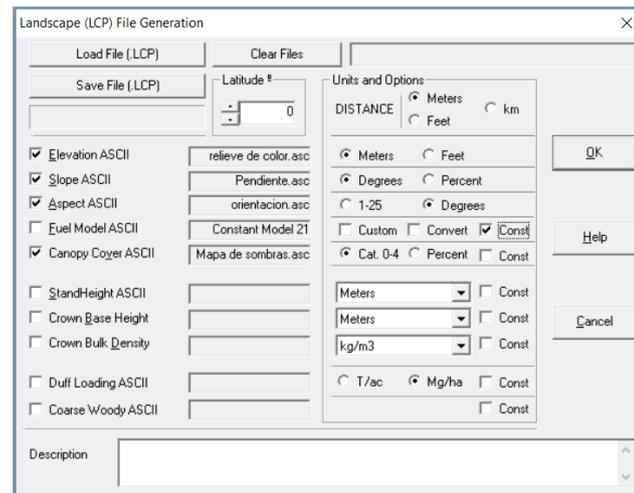


Fig. 17 Ventana para generar un Landscape File

#### IV.2. Datos de entrada

Siguiendo la ruta: Input>Project Inputs, se accedió a las opciones a configurar para todos los datos de entrada como se aprecia en la Fig. 18 en donde además del Landscape File, fue necesario ingresar la información de ajuste de valores de combustible, humedad inicial del combustible, valores de clima, archivos de viento y periodo de quemado diario.

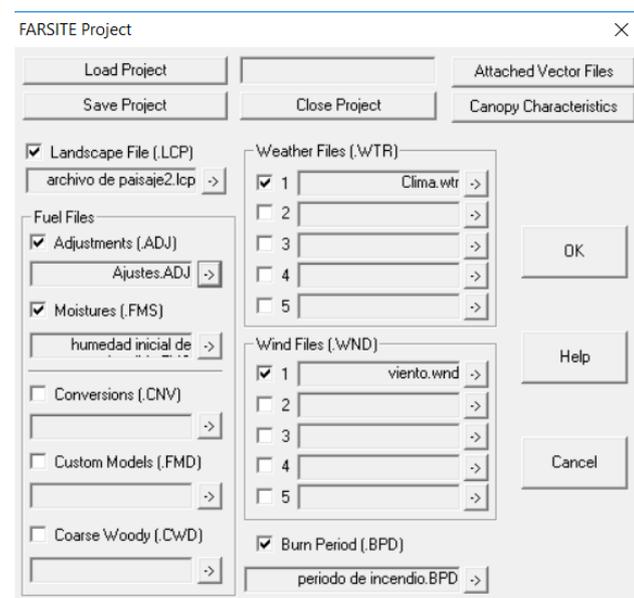


Fig. 18 Datos de entrada para simulación

Los siguientes archivos asociados al combustible que habilitan la posibilidad de variar la velocidad de propagación de los modelos de combustibles se los mantuvo con los valores generados por defecto, como se muestra en la Fig. 19.

La humedad inicial de combustible se la generó en la ventana de configuración con valores por defecto, se generaron seis columnas cuyos valores corresponden al número de modelo de combustible, humedad del combustible muerto para 1 hora, 10 horas, 100 horas, humedad de combustible vivo herbáceo y humedad de combustible leñoso, como se aprecia en la Fig. 20.

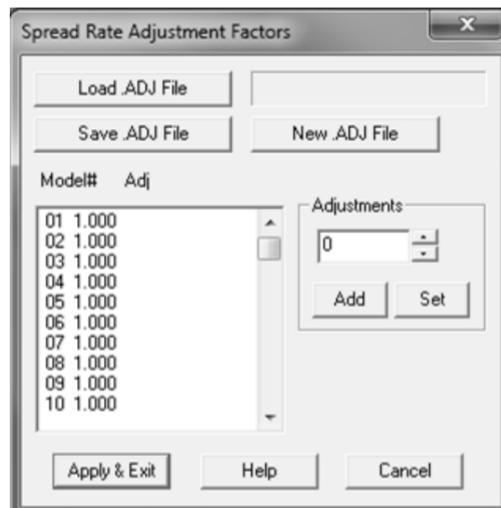


Fig. 19 Factores de ajuste asociados al combustible

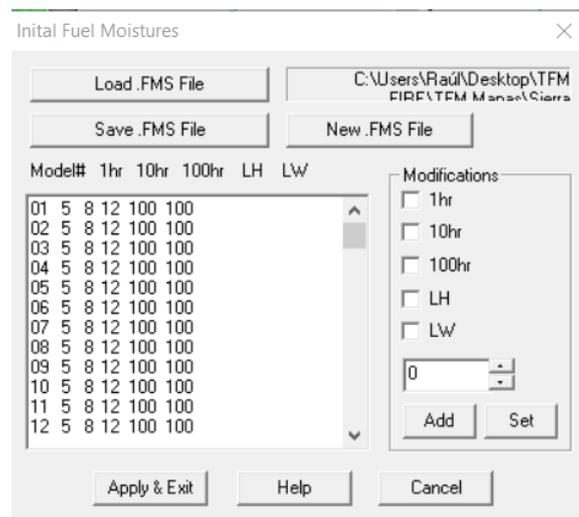


Fig. 20 Humedad inicial de combustible

Para los archivos de clima se generaron datos de cinco días consecutivos, las 9 columnas de izquierda a derecha representan el mes, el día, las precipitaciones diarias, la hora de menor temperatura, la hora de máxima temperatura, la temperatura mínima y la temperatura máxima, la humedad máxima, la humedad mínima y la elevación, en la Fig. 21 se muestran los valores ingresados.

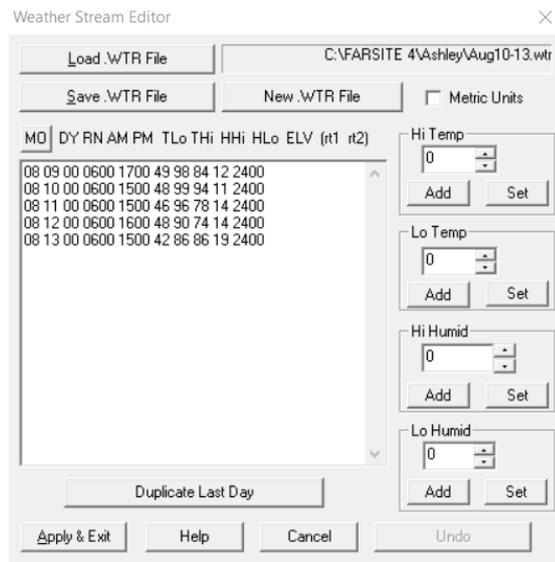


Fig. 21 Editor del flujo de tiempo

Para el archivo de viento se ingresaron registros de cinco días consecutivos al igual que para el archivo de clima, para esta simulación se ingresaron valores aleatorios generados en el mismo programa como se muestra en la Fig. 22. De izquierda a derecha se presenta los valores de mes, día, hora, intensidad del viento y dirección del viento (azimut).

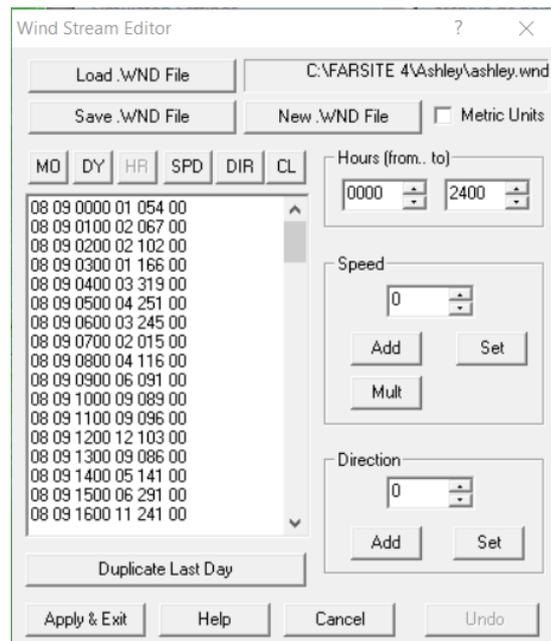


Fig. 22 Editor del flujo de vientos

### IV.3. Configuración de la simulación

Luego de haber ingresado todos los valores necesarios correspondientes a las entradas para la simulación fue necesario definir la configuración de la simulación.

### IV.3.1. Parámetros del modelo

Se definieron los parámetros del modelo, aquí definimos los valores para los pasos de tiempo en 30 minutos y se mostrarán cada 2 horas, la resolución se la dejó con los valores por defecto que corresponden a 60 metros para el caso del perímetro y 30 metros para el caso de la distancia como se muestra en la Fig. 23.

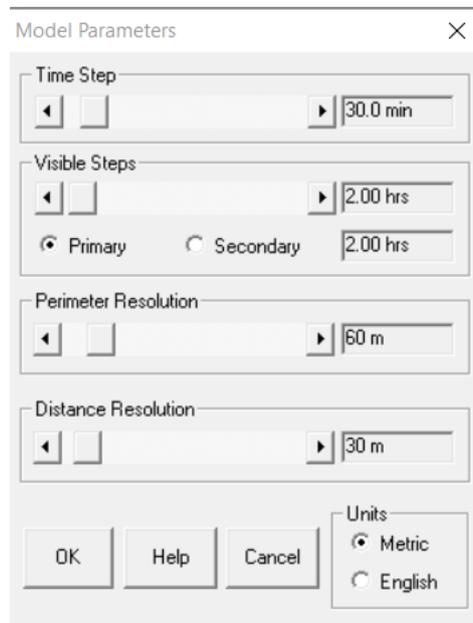


Fig. 23 Definición de parámetros del modelo

### IV.3.2. Duración de la simulación

Antes de iniciar la simulación fue necesario definir el intervalo de tiempo en el cual vamos a hacer el análisis, aquí se ingresaron los valores de la fecha y hora de inicio y fin, seleccionamos también la opción de período de acondicionamiento para que el programa realice los cálculos de humedad del combustible tomando como base el archivo de humedad inicial de combustible y el archivo de paisaje, lo que permite un ajuste de los valores dependiendo de las características topográficas, en la Fig. 24 se muestra los datos ingresados para la duración de la simulación.

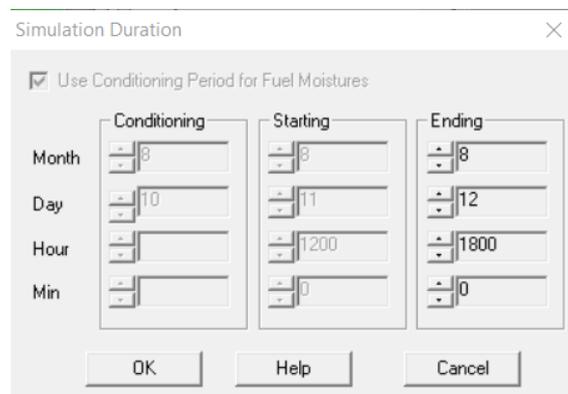


Fig. 24 Duración de la simulación

### IV.3.3. Localización del punto de ignición

Al dar click en Simulate>Initiate/Terminate se desplegó el mapa sobre el cual se realizó la simulación, y nos solicitó que definiéramos el punto de ignición el cual al realizar un click izquierdo seguido de un click derecho mostró una cruz blanca en el mapa indicando que ese era el sitio donde iniciaría la ignición, se puede también definir una línea o un polígono como puntos de ignición y además el programa permite importar un punto a partir de un archivo en formato vectorial.

### IV.4. Configuración de salidas

En esta sección se procedió con la configuración las opciones de salida de tal manera que los resultados los obtuvimos en unidades métricas, guardamos los reportes en formato vectorial .SHP y ráster \*.TOA dándoles una ubicación y un nombre, para el formato ráster se seleccionaron las opciones tiempo de arribo, intensidad de la línea de fuego, y tasa de propagación como se muestra en la Fig. 25.

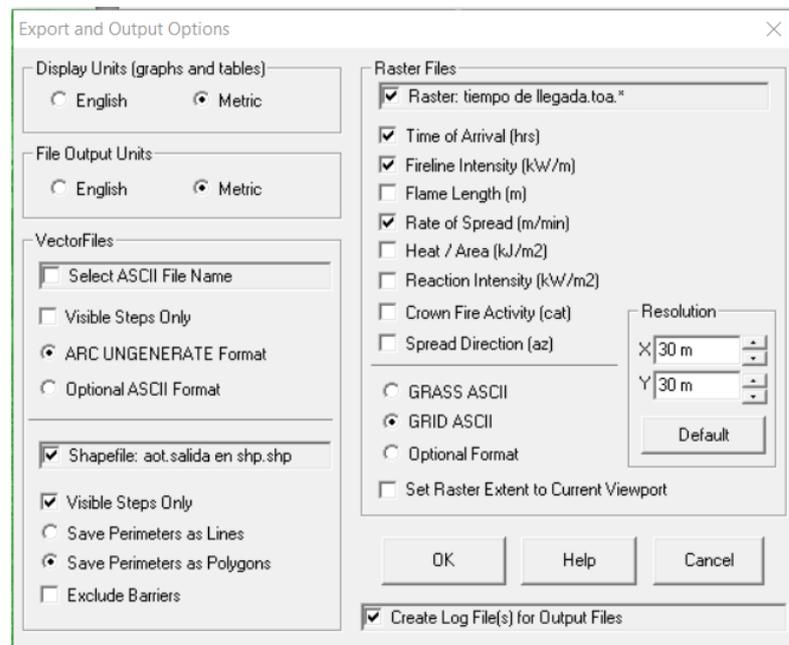


Fig. 25 Opciones de exportación y salida de resultados

### IV.5. Resultados de la simulación

Accediendo a la ruta Simulate>Start/Restart, se da inicio a la simulación obteniéndose el resultado mostrado en la Fig. 26 en la cual cada una de las líneas fue graficada en intervalos de dos horas como las configuramos en las opciones de simulación, el color de fondo fue dispuesto en color verde, además se puede notar el tiempo transcurrido en la simulación.

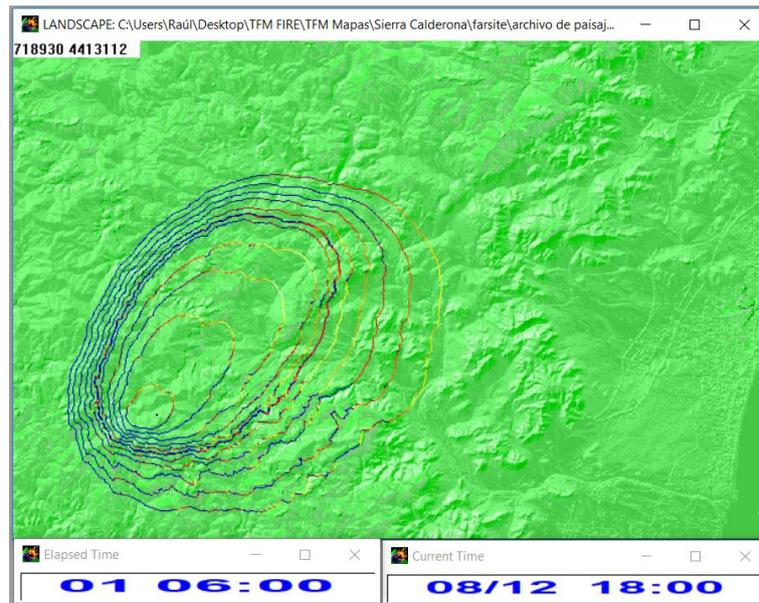


Fig. 26 Resultado de la simulación mostrada en FARSITE

Mediante el uso de QGIS el archivo .SHP generado se lo convirtió en \*.kml lo cual nos permitió visualizarlo en Google Earth y es el archivo que fue finalmente cargado de forma similar en SIMACOP, en la Fig. 27 se presenta la imagen tomada de Google Earth.

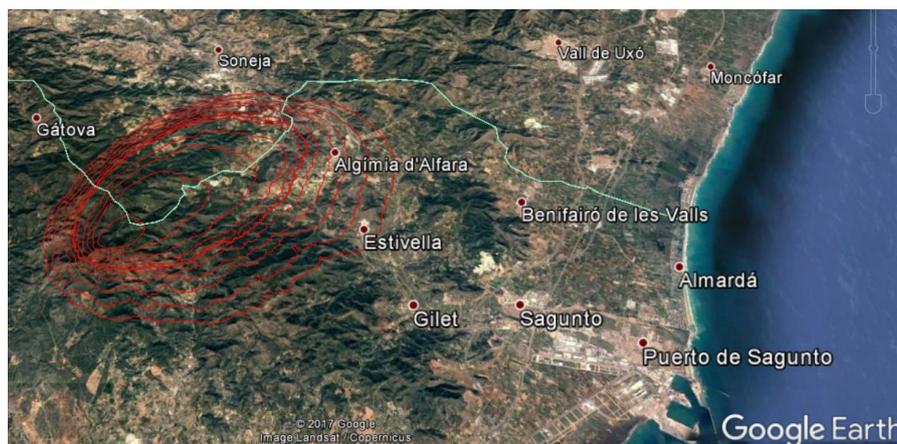


Fig. 27 Representación del área afectada en Google Earth

## V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### V.1. CONCLUSIONES

En Cualquier modelo predictivo de comportamiento de fuego se generan estimaciones de propagación que pueden acarrear alguna inexactitud, tanto en la extensión de área quemada y los valores de los parámetros de comportamiento del fuego (ROS, la intensidad de la línea de fuego, entre otras), por lo que es necesario contar con las mejores mediciones y predicciones de las variables que intervienen en la propagación del incendio.

El uso de barreras contra incendios resulta necesario para la mitigación de la expansión de la línea de fuego, es por eso importante realizar el estudio de las zonas con mayor vulnerabilidad y tomar medidas preventivas.

El tener una visión general de la situación de emergencia permite que se tomen decisiones acertadas permitiendo elaborar planes de contingencia que minimicen las pérdidas de recursos físicos, humanos y económicos.

Luego de haberse producido un incendio es importante contrastar la información de la zona afectada con datos simulados, esto permitirá ajustar los parámetros necesarios para tener mejores resultados en futuras emergencias.

Es importante el uso de sistemas de teledetección que permitan alertar de forma temprana la presencia de incendios, esto permitiría gracias a las simulaciones mejorar la estrategia de respuesta de los equipos de lucha contra incendios.

Desplegar redes de sensores que permitan detectar las variaciones en las condiciones climáticas y de los vientos en la zona afectada por el incendio permitiría realizar una mejor aproximación del crecimiento de la línea de fuego.

## V.2. *LÍNEAS FUTURAS*

- Realizar la validación de los resultados contrastándolos con incendios históricos.
- Desarrollar un software integral ya que para realizar la simulación se ha trabajado con dos programas y se ha necesitado recopilar información de varias bases de datos.
- Realizar simulaciones de un escenario de incendio real en un entorno controlado, con participación de equipos de lucha contra incendios para contrastar los datos obtenidos en la realidad con los datos obtenidos en el simulador de incendios de SIMACOP, además se puede verificar el nivel de respuesta al uso del programa y los datos obtenidos por parte de los miembros del grupo de mando y control.

## VI. AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme estar siempre en los lugares adecuados y rodeado de las mejores personas.

Agradecer al D. Manuel Esteve Domingo por acogerme como tesista y darme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo fin de Máster bajo su acertada dirección, las enseñanzas que en clase transmitió me hicieron reflexionar sobre todo el bien que podemos hacer a la sociedad cuando trabajamos utilizando nuestro conocimiento y lo enfocamos a la seguridad de los ciudadanos.

A mi esposa Ximena Rojas, que con su gran apoyo me ha permitido llevar a acabo esta dura empresa y a toda mi familia y amigos que siempre me han alentado.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Garnica, J. Germán, G. Murillo, y L. Patricia, «Estimación práctica de la variabilidad de la humedad de los combustibles bajo diferentes ecosistemas forestales», *Rev. Mex. Cienc. For.*, vol. 2, n.º 5, pp. 45-57, jun. 2011.
- [2] M. E. Castillo y F. Rodríguez y Silva, «Determinación de tiempos de respuesta en la llegada de recursos terrestres al combate de incendios forestales: Estudio de caso: Chile Mediterráneo», *Cienc. E Investig. Agrar.*, vol. 42, n.º 1, pp. 97-107, abr. 2015.
- [3] L. Ntaimo, J. A. G. Arrubla, C. Stripling, J. Young, y T. Spencer, «A stochastic programming standard response model for wildfire initial attack planning», *Can. J. For. Res.*, vol. 42, n.º 6, pp. 987-1001, jun. 2012.
- [4] M. Ilyas y I. Mahgoub, Eds., *Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems*. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [5] «FIRMS Web Fire Mapper». [En línea]. Disponible en: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/>. [Accedido: 07-jul-2017].
- [6] J. Ruiz-Mirazo, A. B. Robles, R. Jiménez, J. L. Martínez-Moya, J. López-Quintanilla, y J. L. González-Rebollar, «La prevención de incendios forestales mediante pastoreo controlado: el estado del arte en Andalucía», en *Comunicación Congreso Wildfire*, 2007.
- [7] D. Martín-Borregón Domènech, «Sistema de detección de incendios forestales utilizando técnicas de procesado de imagen», 2012.
- [8] M. Noguero Planas, «Integración de Farsite en el entorno de simulación para UAS», B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [9] I. O. Pastor, *Paisaje, teledetección y SIG: conceptos y aplicaciones*. Fundación Conde del Valle de Salazar, 1999.
- [10] A. A. D. González y L. en Geografía, «CARTOGRAFIA GEOGRAFICA Y MEDIO AMBIENTE EN AMERICA LATINA: REALIDADES Y PERSPECTIVAS DE UN NUEVO PARADIGMA EN LA GEOGRAFIA.»
- [11] G. Cáceres y J. S. González, «Comparación de herramientas SIG Desktop para el desarrollo de SIGPOT».
- [12] J. Gilavert Margalef y C. Puig i Polo, «Estudio comparativo de herramientas SIG libres aplicadas a contextos de cooperación al desarrollo», en *II Jornadas de SIG Libre*, 2008, pp. 1–13.
- [13] G. D. Papadopoulos y F.-N. Pavlidou, «A comparative review on wildfire simulators», *IEEE Syst. J.*, vol. 5, n.º 2, pp. 233–243, 2011.
- [14] A. L. Sullivan, «Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models», *Int. J. Wildland Fire*, vol. 18, n.º 4, p. 349, 2009.
- [15] A. L. Sullivan, «Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models», *Int. J. Wildland Fire*, vol. 18, n.º 4, p. 369, 2009.
- [16] J. Brakeall, «Wildfire assessment using FARSITE fire modeling: A case study in the chihuahua desert of mexico», 2013.
- [17] C. N. de I. Geográfica, «Centro de Descargas del CNIG (IGN)», *Centro de Descargas del CNIG*. [En línea]. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es>. [Accedido: 05-sep-2017].
- [18] «Descàrregues 2 | Terrasit». [En línea]. Disponible en: <http://terrasit.gva.es/es/descarregues2>. [Accedido: 06-sep-2017].
- [19] «US Forest Service». [En línea]. Disponible en: <https://www.fs.fed.us/>. [Accedido: 06-sep-2017].
- [20] M. A. Finney, «FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation», 2004.