

Empleo de una red de sensores en el reajuste de modelos de comportamiento del fuego en incendios forestales¹

**Aurelio Bermúdez², Rafael Casado², Eva M. García²,
Álvaro Gómez³, Francisco J. Quiles², J. Reyes Ruiz-Gallardo³**

Resumen

El empleo de simuladores de fuego como BehavePlus o FARSITE resulta de gran utilidad durante las tareas de extinción de un incendio forestal. Estos sistemas realizan una predicción del comportamiento del fuego en base a una serie de entradas, como son el modelo de combustible predominante en la zona, las condiciones meteorológicas (temperatura, velocidad y dirección del viento, etc.) y las características del terreno (MDT, etc.).

Es evidente que la salida proporcionada por el simulador de fuego será más precisa si el modelo generado es realimentado con información acerca del comportamiento real del incendio en cada momento. En este trabajo se propone el uso de una red inalámbrica de sensores con la finalidad de recoger dicha información, de forma directa y en tiempo real.

Introducción

Los incendios forestales son una de las principales causas de degradación medioambiental en los países mediterráneos (Ruiz-Gallardo 2004). Cada año, centenares de miles de hectáreas son arrasadas, conllevando consecuencias, no sólo ambientales, sino también económicas y sociales. En el pasado año 2006, ardieron en España 144.273 hectáreas en 5.038 incendios (de más de una hectárea). Según diversas estadísticas, durante la primera quincena de agosto, y sólo en Galicia, ardieron más de 75.000 hectáreas en 1.970 incendios (DGB 2007).

La diversidad de estudios que este fenómeno ha derivado son múltiples, pero especialmente interesantes son los que hacen confluír estudios de campo con los de laboratorio, dentro de equipos multidisciplinares. Las modelizaciones informáticas del comportamiento del fuego son un caso particularmente interesante, en donde se consideran determinadas variables dinámicas y/o estáticas (humedad y tipo de combustible, pendiente del terreno, presencia de cortafuegos, dirección y velocidad

¹ Este trabajo ha sido financiado por los siguientes proyectos: CSD2006-46 (Ministerio de Educación y Ciencia), TIN2006-15516-C04-02 (Ministerio de Educación y Ciencia), PBC05-007-1 (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha) y TC20070061 (Universidad de Castilla-La Mancha) y el Convenio suscrito entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Universidad de Castilla-La Mancha para la elaboración y suministro de información relevante a efectos de la planificación en la lucha contra incendios forestales.

² Instituto de Investigación en Informática de Albacete. Departamento de Sistemas Informáticos. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario, s/n., 02071 Albacete. España. E-mail: {aurelio.bermudez, rafael.casado, evamaria.garcia, francisco.quiles}@uclm.es

³ Instituto de Desarrollo Regional. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario, s/n., 02071 Albacete. España. E-mail: {alvaro.gomez, josereyes.ruiz}@uclm.es

del viento, intervenciones forestales contra el incendio, etc.) con objeto de determinar el avance y posible evolución del frente de llama. La utilidad de estos sistemas está fuera de toda duda, en procesos de entrenamiento de responsables contra incendios, así como en la ayuda a la toma de decisiones en incendios reales. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es la imposibilidad de realimentación con determinadas variables.

Por otro lado, numerosos trabajos recientes proponen emplear redes inalámbricas de sensores (en adelante WSN, *Wireless Sensor Network*) para el seguimiento de variables del entorno. Por ejemplo, en Mainwaring 2002 se define la arquitectura genérica de un sistema para la supervisión del hábitat y se describe una aplicación particular, el estudio del anidamiento de aves marinas en Great Duck Island (Maine, USA). También existen varias propuestas en las que el objetivo de la WSN es el seguimiento de incendios, bien en el ámbito urbano, como el sistema *FireNet* (Sha 2006), bien en el ámbito forestal. En Doolin 2005 se describe el sistema *FireBug*, compuesto por sensores ambientales comerciales que recogen temperatura, humedad y presión mediante sensores equipados con GPS. En Hartung 2006 y Li 2006 pueden encontrarse propuestas muy similares a *FireBug*.

En general, en todos los trabajos citados, la red de sensores se emplea como medio para recopilar datos físicos sobre la zona de interés. Estos datos son enviados a un nodo central o estación base, desde donde son mostrados, almacenados en una base de datos o enviados a una localización remota. En este trabajo se propone emplear una arquitectura similar, pero con la novedad de que los datos proporcionados por la WSN se emplean para refinar la salida de un simulador de incendios que se ejecuta en la estación base.

Este documento se estructura de la siguiente manera. El resto de esta sección presenta de manera muy general los elementos que integran el sistema propuesto. La siguiente sección se centra en la descripción de la red inalámbrica, prestando especial atención a los sensores y a la forma en la que éstos se posicionan y se comunican. Después se aborda el tema de la simulación de incendios forestales, introduciendo los modelos de fuego, los simuladores más populares y la información que emplean para generar modelos de fuego. A continuación se describen las fases en el desarrollo del sistema y la forma en la que evaluaremos nuestras propuestas. Finalmente, se presentan nuestras conclusiones y las referencias bibliográficas empleadas.

Descripción del sistema

La *figura 1* muestra la arquitectura del sistema propuesto en este trabajo. A grandes rasgos, el sistema está integrado por tres tipos de dispositivos: la red de sensores (WSN), la estación base y uno o varios vehículos aéreos no tripulados (en adelante UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*).

La WSN estará formada por cientos (e incluso miles) de diminutos dispositivos electrónicos recubiertos de un armazón ignífugo resistente a golpes, que al mismo tiempo no debe impedir las comunicaciones. Estos componentes son diseminados sobre la zona afectada por el incendio mediante los UAVs. Una vez desplegados, los sensores conforman una red de interconexión inalámbrica completamente autónoma y autoconfigurable. Cada sensor monitoriza su entorno próximo, tomando mediciones continuas de magnitudes físicas como temperatura, presión, humedad y velocidad y dirección del viento.

La estación base puede consistir en un ordenador portátil desplazado a la zona del incendio en uno de los vehículos empleados por los retenes. El ordenador está conectado a la WSN a través de un nodo sensor (o *gateway*) de las mismas características que los que componen la red. El *gateway* se conecta a uno de los puertos del ordenador, y no realiza tareas de obtención de datos, sino que se limita a reencaminar hacia la estación base la información que recibe del resto de nodos de la WSN. La estación base es la encargada de ejecutar el modelo de predicción del fuego, que se irá reajustando en tiempo real con la información proporcionada por la red de sensores. Toda esta información es utilizada en última instancia por el puesto de mando para decidir la mejor estrategia de actuación contra el fuego.

Por último, los aviones teledirigidos que dispersan los sensores en el área de trabajo también tienen la función de proporcionarles información de posicionamiento, como veremos en la sección siguiente.

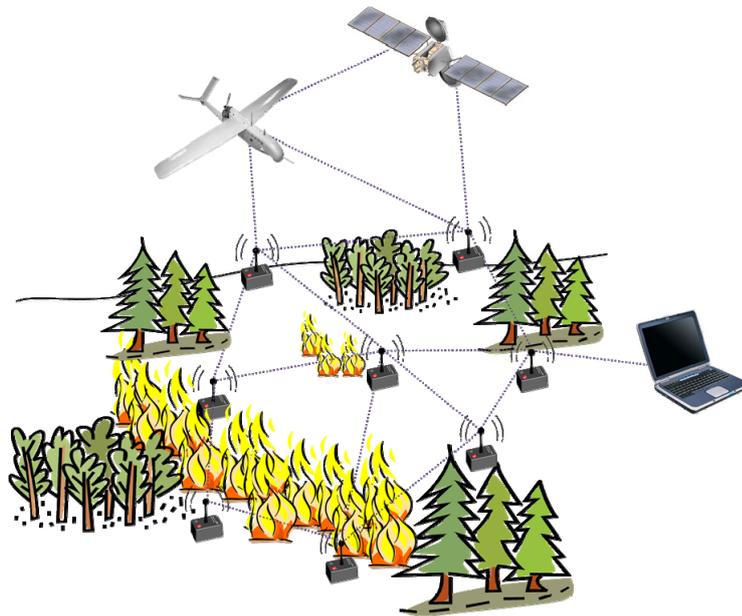


Figura 1—Arquitectura del sistema

La red de sensores

En esta sección se describen con mayor profundidad los sensores, como componentes fundamentales de la WSN, y la manera en la que éstos llevan a cabo ciertas tareas clave, como el posicionamiento o el envío de información hasta la estación base.

Los sensores

Los nodos sensores o *motes*⁴ son dispositivos electrónicos capaces de captar información proveniente del entorno en el que se encuentran, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia un destinatario. La *figura 2* muestra el aspecto de algunos sensores comerciales.

⁴ Expresión inglesa que equivale a mota de polvo en castellano

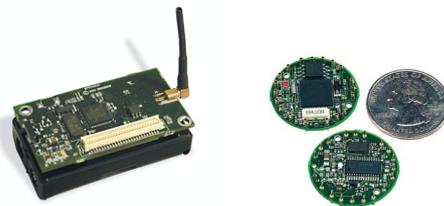


Figura 2—Dispositivos *MicaZ* y *Mica2dot* de *Crossbow*

A diferencia de otros dispositivos inalámbricos, como los ordenadores portátiles o las PDAs, los sensores se diseñan y programan para que formen parte de un todo, que es una WSN con un objetivo particular. En otras palabras, un sensor aislado tiene muy poca utilidad. El hardware de cada uno de estos dispositivos se compone de cuatro partes bien diferenciadas:

- **Sensores:** son elementos que captan determinadas magnitudes físicas del mundo exterior. Estos componentes dan nombre a todo el conjunto. En función de la aplicación a la que se destina, un mote puede incorporar una variedad heterogénea de sensores para medir diversas magnitudes como temperatura, presión, humedad, aceleración, sonido, magnetismo, etc.
- **Dispositivo de comunicaciones:** se trata de una radio que permite enviar y recibir datos para comunicarse con otros dispositivos situados dentro de su rango de transmisión. Un interfaz de radio muy popular en la actualidad es el Chipcon CC2420, que soporta el estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 (comercialmente conocido como *Zigbee*).
- **Procesador y una unidad de memoria:** integran un computador que ejecuta un programa que capta datos de los sensores, los procesa y transmite. En realidad, ambos elementos (procesador y memoria) se integran dentro de un mismo dispositivo, denominado microcontrolador. Dos microcontroladores muy empleados hoy en día en sensores comerciales son el Atmel AVR y el Texas Instruments MSP430.
- **Fuente de alimentación:** normalmente son baterías difícilmente sustituibles, o fuentes de energía como placas solares que no garantizan el suministro constante de dicha energía. En determinadas aplicaciones, se espera una vida útil del dispositivo de varios meses, por lo que realizar una gestión eficiente del consumo energético es una cuestión fundamental.

Existen diversas compañías que ofertan una amplia gama de sensores, entre las que podemos destacar Crossbow Technology Inc. (Crossbow 2007), que comercializa los populares Mica2, Mica2dot y MicaZ, y Moteiv Corporation (Moteiv 2007), que ofrece el Tmote, un sensor diseñado pensando en el consumo. Todos estos modelos de sensor gozan de una amplia aceptación entre la comunidad investigadora. De hecho, los diseños iniciales proceden del ámbito universitario. A todos estos productos comerciales hay que sumar el nuevo Imote2, anunciado recientemente por Crossbow. El Imote2 incorpora un procesador PXA271 Intel XScale® con 256KB de on-chip SRAM, 32MB de SDRAM y 32MB de FLASH. En cuanto a las comunicaciones, dispone de una radio 802.15.4 con un ancho de banda de 250kb/s y

16 canales en la banda de 2.4 GHz. La antena que incorpora proporciona un alcance de 30 metros, y es posible conectar una antena auxiliar para obtener mayores coberturas.

En cuanto al software que ejecutan estos dispositivos, el sistema operativo más aceptado en entornos académicos es el TinyOS (TinyOS 2007), desarrollado en Berkeley. TinyOS es un sistema basado en componentes (organizados en capas) y dirigido por eventos. El lenguaje de programación estandarizado es nesC (Gay 2003), que soporta y refleja el modelo de concurrencia basado en eventos de TinyOS.

Posicionamiento de los sensores

Prácticamente la totalidad de las aplicaciones de las WSNs, requieren que cada sensor conozca su ubicación exacta (o al menos aproximada) en el espacio. La aplicación planteada en este trabajo no es una excepción. En nuestro caso, es imposible que dicha posición pueda ser programada en cada dispositivo de antemano, dado que los sensores son desplegados desde un UAV y su ubicación definitiva en tierra es desconocida a priori.

En entornos al aire libre, es posible el empleo de un sistema de posicionamiento por satélite, como el GPS (*Global Positioning System*). Sin embargo, hoy por hoy, dotar a todos los sensores de la red de un receptor GPS es una opción inviable, debido fundamentalmente a razones de tamaño, consumo y precio. Por tanto, supondremos que solamente una porción de los motes conocen su posición exacta. Estos nodos, denominados *beacons* (balizas), difunden dicha información al resto de la red. Entonces, mediante un algoritmo distribuido, el resto de los motes podrán llegar a inferir su ubicación.

En particular, el mecanismo de posicionamiento podría consistir en que un nodo que recibe información de un vecino indicando su posición estima la propia dentro del área de cobertura del primero. En el algoritmo *Bounding-Box* (Simic 2002), por simplicidad, dicha área circular se representa mediante un cuadrado, obteniéndose un algoritmo más ligero pero no mucho más impreciso. Si además la potencia de emisión y el patrón de atenuación de la señal son conocidos, entonces se puede estimar la distancia entre emisor y receptor, lo que reduce el círculo anterior a la circunferencia que lo delimita. En este caso, la información de tres nodos es suficiente para determinar la posición de un cuarto mediante una técnica conocida como trilateración.

Además de emplear sensores en tierra equipados con GPS, nos planteamos que el propio UAV que dispersó la red colabore en la tarea de posicionamiento. Se trataría de incorporar un receptor GPS en el UAV, de forma que éste transmita su posición a los nodos en tierra, de forma similar a lo que se propone en Corke 2004.

Encaminamiento de información

El mecanismo de encaminamiento se refiere a la forma en la que la información es transmitida desde el lugar en que es recogida, es decir, los sensores de la red, hasta la estación base, donde puede ser almacenada en una base de datos a la que podrá acceder el simulador de incendios. Como la comunicación directa entre los sensores y la estación base no es siempre posible, dado que la estación no tiene por qué estar

bajo la cobertura de los sensores, asumimos que la información tiene que pasar por uno o varios sensores intermedios antes de alcanzar su destino.

En la bibliografía existen multitud de propuestas de algoritmos de encaminamiento para WSNs (Ilyas 2005). En los algoritmos *multi-hop* o planos, cuando un sensor quiere transmitir un dato, lo entrega al vecino más cercano a la estación base. A su vez, dicho vecino seleccionará al vecino más cercano a la estación base, y así sucesivamente. De esta forma, se construye una estructura arborescente sobre la red, que incluye a todos los sensores de la misma y cuya raíz es, precisamente, la estación base. Entonces, los datos captados por los sensores fluyen por las ramas de este árbol, desde las hojas hacia la raíz. El algoritmo *XMesh*, de Crossbow, funciona de esta manera. El inconveniente de estas técnicas es que reducen el tiempo de vida de la batería de los nodos más cercanos a la estación base.

Otros algoritmos de encaminamiento, denominados *cluster-based* o jerárquicos, crean grupos de nodos en la red y eligen un sensor (el *cluster head*) en cada uno de estos grupos. Dicho nodo será el responsable de encaminar la información captada por los miembros de su grupo hacia el *cluster head* en otro grupo vecino o directamente hacia la estación base. Estos algoritmos son más rápidos, escalables y eficientes que los anteriores, pero encierran una mayor complejidad, ya que deben contemplar mecanismos para crear y mantener los grupos. En nuestro caso, por simplicidad y flexibilidad, y asumiendo que la vida de las baterías no es un parámetro crítico en el sistema, haremos uso de un algoritmo de encaminamiento plano.

Simulación de incendios forestales

Modelos de fuego

Al conocer cómo funciona el fuego en los ecosistemas naturales, se pueden definir las condiciones en las cuales el fuego puede producir efectos positivos, tales como el mejoramiento de la regeneración de árboles, y la modificación de estructuras del hábitat de fauna silvestre (Kapler 1997). Por lo tanto es posible aplicar fuego, en un rodal dado, para lograr objetivos específicos (Van Lear 1991). No obstante, la aplicación exitosa del fuego requiere de un conocimiento avanzado del comportamiento potencial del fuego (p.e. el rango de dispersión y la intensidad). Los efectos potenciales del fuego pueden predecirse a través de la simulación del comportamiento del fuego. Actualmente, existen muchos sistemas para simular no solo el rango de dispersión e intensidad de un incendio forestal, sino también la longitud y profundidad de la llama y la intensidad de reacción. Debido a que estos sistemas requieren datos con una referencia espacial confiable, su uso ha sido limitado (Flores 2004).

Por ejemplo FARSITE (Finney 1998) requiere de cinco capas de datos (elevación, exposición, pendiente, combustibles superficiales y cobertura del dosel) para la predicción del crecimiento del fuego en incendios superficiales. Aunque la mayoría de estos mapas se pueden obtener fácilmente, el desarrollo del mapa de combustibles requiere de mucho mayor esfuerzo y análisis. Más aún, la caracterización de combustibles y su distribución espacial son factores críticos para simular el modelo de comportamiento del fuego.

Las técnicas de geomática (GIS, sensores remotos, GPS y geoestadística) han mostrado buenos resultados en la cartografía de suelos, vegetación, agua, hábitat de fauna silvestre, bosques, clima y contaminación (Hunner 2000, Metzger 1997), hoy

en día están siendo empleadas en la lucha contra los incendios forestales, recopilando geoinformación para ser usada en los modelos de predicción del fuego, proporcionando una lista de escenarios de comportamiento del fuego en medios naturales y, por escenario, una serie de subescenarios de los efectos del fuego sobre la masa forestal, planificando las tareas de selvicultura preventiva, incluso ayudando a la toma de decisiones de los expertos para el control de las patrullas de extinción de incendios.

Un modelo de fuego es, básicamente, una simulación numérica del comportamiento del fuego frente a las diversas características que varían su estado y propiedades. Al crear un modelo de fuego pretendemos describir mejor los mecanismos físicos de base y las propiedades del fuego. Al validar las predicciones con los resultados de ensayos de laboratorio y de fuegos experimentales en campo, se reajusta el modelo y sus variables, haciendo de éste una herramienta de gran valor en la lucha contra incendios.

Simuladores de incendios

A través del estudio de los incendios forestales (en ensayos de laboratorio y experimentos de campo) podemos extraer importante información que nos ayuda a comprender cómo éstos evolucionan y se desarrollan. Usando las variables que intervienen en el fuego (pendiente del terreno, humedad y tipo de combustible vegetal en la superficie, presencia de cortafuegos, dirección y velocidad del viento, entre otros), se han creado modelos virtuales de comportamiento del fuego para el área de estudio. Gracias a la investigación científica conjunta entre expertos en incendios forestales e investigadores informáticos, la comunidad científica ha hecho grandes avances en la generación de estos modelos. Así, hoy en día, programas informáticos como FARSITE o BehavePlus dan un paso adelante en la física del modelo de comportamiento del fuego. Dichas aplicaciones son capaces de ofrecernos, en tiempo real, una predicción de la evolución del incendio, incluyendo las reacciones a las acciones que lleven a cabo los equipos de extinción. De esta forma, el modelo de predicción se realimentará con las nuevas entradas de parámetros en el momento del incendio, como la descarga de un hidroavión, la creación de una faja cortafuegos, etc. El uso de estos programas informáticos, capaces de predecir el comportamiento del fuego en los grandes incendios forestales, contribuye de manera notable a la toma de decisiones y en la planificación y desarrollo de las tareas de extinción, disminuyendo costes en los recursos, y en la protección de la vida de los trabajadores que luchan en el frente de fuego.

FARSITE

El dispositivo INFOCA 2006 (Junta de Andalucía) emplea diversos simuladores entre los que se encuentra FARSITE (*Fire Area Simulator*), uno de los más avanzados, puesto que permite generar los contornos de propagación del fuego, expresar las variables de comportamiento del frente de llama, representar la existencia y crecimiento de focos secundarios e incluir las acciones contra el incendio por parte de los medios terrestres y aéreos. Otra de las aplicaciones del FARSITE, es la capacidad de poder estimar el tiempo de llegada del incendio a un determinado punto; así como analizar las velocidades de propagación, intensidades lineales, alturas de llama, actividad de copas, con el fin de predecir el desarrollo del incendio en función de las variables meteorológicas y topográficas (Sarriá 2006).

Algunas de sus características más importantes son:

- Incorpora modelos existentes para fuegos de superficie, fuegos de copa, combustión post-frontal, humedades de combustibles vivos y muertos y aceleración de fuego en modelos 2D y 3D.
- Los usuarios deben contar con el soporte de un software GIS, que haga frente a los requerimientos de FARSITE en cuanto a información espacial del territorio para crear los modelos.
- Puede simular acciones de extinción aéreas y terrestres, y su efecto inmediato sobre las llamas.

A pesar de su complejidad, y la necesidad por parte del usuario de conocer ampliamente el funcionamiento y comportamiento de los incendios y su terminología, FARSITE proporciona salidas gráficas compatibles con los sistemas operativos convencionales, y acepta datos de entrada en formato ráster de GRASS y ARC/INFO GIS.

Este simulador es usado desde hace tiempo por el *USDI National Park Service*, el *USDA Forest Service* y otras muchas instituciones con competencias en la lucha contra incendios.

BehavePlus

BehavePlus es una aplicación de Windows para predecir el comportamiento del fuego en incendios forestales con fines de gestión y organización. Diseñado para ser usado por profesionales entrenados en la planificación de incendios forestales, familiarizados con los combustibles, climatología, topografía y su terminología y conceptos asociados.

Reemplazando a la versión de 1984 para MS-DOS, usa una cantidad mínima de datos de entrada para predecir en comportamiento del fuego en un punto seleccionado del tiempo y el espacio.

Este sistema de modelado del fuego comprende una amplia colección de modelos que describen el fuego y su entorno. Es un programa flexible que produce tablas y gráficas como salida, para ser usadas en multitud de aplicaciones de gestión del fuego.

Algunas de sus características más importantes son:

- Incluye 14 nuevos modelos de combustible desarrollados (Scott 2005), con cargas dinámicas de herbáceas, y transferencia de carga de combustibles vivos y muertos.
- Las entradas de datos de vegetación ofrecen la posibilidad de clasificarlos según su altura del suelo, ya sean pastos, matorrales, arbolado...
- Con un sencillo diseño y una interfaz más amigable para el usuario, el nuevo BehavePlus ofrece una compatibilidad añadida con los sistemas operativos existentes, así como con los programas informáticos GIS más comunes. Además, los modelos creados pueden ser exportados a otros programas de modelización del fuego como FARSITE o FlamMap en su formato de archivo correspondiente.

Entrada de datos estáticos / dinámicos

La fiabilidad de un modelo de predicción de fuego viene regulada por la exactitud de los datos de entrada, y la perfección del modelo numérico de simulación.

La resolución espacial de la geoinformación usada como “inputs” nos acercará más o menos a la exactitud deseada para nuestros modelos. Una mayor resolución espacial de las geodatabases implica una información más pesada, y por lo tanto más lenta en el proceso de simulación. Esto nos lleva a tener que decidir entre una mayor precisión de datos o una mayor velocidad de ejecución de la simulación de la evolución del incendio, según estemos usando ordenadores personales con gran capacidad de cómputo, o pequeños dispositivos móviles, tales como un ordenador de bolsillo.

En un modelo básico de predicción del comportamiento del fuego influyen cinco variables principales:

- El modelo digital de elevación del terreno, o MDT. Es una capa en formato ráster que incluye una matriz de datos numéricos que se corresponden con la altura respecto al nivel del mar de esa parcela del suelo correspondiente al píxel de la matriz, que variará según su resolución espacial. Las más comunes suelen ser de 200x200 metros, 100x100 metros, y de hasta 20x20 metros.
- La exposición al sol. A partir del MDT, es posible crear un modelos de exposición solar, teniendo en cuenta la altura del sol para cada momento, el azimut del sol en cada día del año, y la irradiancia exoatmosférica, calculamos la cantidad de energía solar recibida por cada píxel de nuestra matriz, equivalente a una unidad de área en el terreno. La cantidad de sol recibida se hace evidente al comparar nuestro modelo con una imagen real de la zona de estudio, donde se observan las diferentes cargas de combustible dependiendo de si está en umbría o solana.
- La pendiente. Usando el MDT podemos crear un ráster de pendientes, que nos indica cuál es el grado de inclinación para cada celdilla del territorio. Esta información es de una gran importancia, dado lo mucho que la pendiente influye a la hora de la dispersión y evolución del frente de fuego y la intensidad de la llama.
- Combustibles. El desarrollo del mapa de combustibles para la predicción del crecimiento del fuego en incendios superficiales requiere de mucho esfuerzo y análisis. Más aún, la caracterización de combustibles y su distribución espacial son factores críticos para simular el comportamiento del fuego. Con el propósito de simplificar la caracterización de combustibles, se definió el concepto de modelo de combustible (Anderson 1982). Este concepto permite la categorización de áreas dentro de clases de comportamiento del fuego potencial. Las bases de datos que incluyan los modelos de combustible para la zona del incendio deben estar actualizadas y cotejadas en la medida de lo posible, ya que se trata de una de las variables de mayor influencia en el comportamiento del fuego.

Además de estas variables, que podemos considerar estáticas o controladas, teniendo en cuenta su escasa variación con respecto al tiempo, existen otras variables susceptibles de ser incluidas en nuestras entradas para el modelo de predicción del fuego, que se consideran dinámicas por su variabilidad tanto espacial como temporal. Algunas de estas variables, por ejemplo, el viento, poseen modelos ajustados

temporalmente, que a una escala general son fiables. Pero en este caso, el viento, influye de manera notable en la propagación y virulencia del incendio, anulando así esa generalidad de los modelos de vientos, y haciendo necesaria una mayor exactitud y fiabilidad en sus medidas de dirección y velocidad. De igual manera, existen otras variables que poseen modelos preestablecidos que podrían ser monitorizadas en tiempo real, aumentando así su eficacia y relevancia en el modelo de fuego. Este tipo de datos es llamado también variables no controladas, dado la imposibilidad de hacerles un seguimiento en tiempo real, ni de conocer sus variaciones.

Es aquí donde entra en juego el potencial ofrecido por la red de sensores. Al encontrarse los sensores esparcidos por toda el área del incendio y alrededores, tenemos acceso a una base de datos actualizada en tiempo real de cada una de esas variables dinámicas o no controladas. Dichas variables realimentan, de forma continua, el modelo de predicción del comportamiento del fuego, haciéndolo mucho más ajustado tanto temporal como espacialmente.

Unos datos de velocidad y dirección del viento precisos y en tiempo real de cada parcela del territorio del incendio proporcionan un flujo de datos para el reajuste del modelo de gran valor. Así como el viento, la red de sensores también nos proporciona datos en tiempo real de otras magnitudes, como son la cantidad de luz solar recibida por el sensor, la humedad relativa en ese punto y la temperatura del entorno que rodea al sensor.

Metodología

Fases del proyecto

El sistema descrito en las secciones previas será desarrollado en tres fases perfectamente diferenciadas. En la primera de ellas emplearemos un entorno completamente simulado que nos permitirá llevar a cabo una evaluación inicial de nuestras propuestas en el laboratorio. En esta fase trabajaremos con el simulador de red de sensores TOSSIM (TinyOS 2007). La principal ventaja de este programa, además de ser uno de los más populares en el ámbito académico, es que permite una depuración directa del código que luego será programado en los sensores reales.

En este entorno simulado, reproduciremos un incendio real haciendo uso de un simulador de incendios como FARSITE o BehavePlus. Este programa proporcionará a los sensores de nuestra WSN (simulada) los valores correspondientes a las magnitudes físicas de interés. El último elemento del entorno es el simulador de incendios que habrá sido convenientemente reprogramado para aceptar como entradas los valores enviados periódicamente por la WSN a la estación base.

En la segunda fase del proyecto realizaremos pruebas de campo mediante el despliegue de un prototipo completamente funcional del sistema. El incendio real puede seguir siendo simulado o no. En cualquier caso, habrá una red de sensores real que será desplegada manualmente sobre el terreno y que estará constituida por sensores comerciales, como los MicaZ o los Imote2 (Crossbow 2007), convenientemente programados. Asimismo, el simulador de incendios modificado correrá en un ordenador portátil estándar.

En la tercera y última fase del proyecto desarrollaremos el sistema definitivo. En concreto, nos planteamos el diseño de nodos sensores específicos para nuestra aplicación de lucha contra incendios. Además, habrá que dotar a estos dispositivos de

una carcasa ignífuga, resistente a golpes y, en la medida de lo posible, respetuosa con el medio ambiente. También habrá que incorporar al sistema el UAV o cualquier otro dispositivo que pueda servir para desplegar la red de sensores, ante una situación de incendio real.

Evaluación de las propuestas

La *figura 3* muestra la forma en la que evaluaremos nuestras propuestas. Independientemente de la fase de desarrollo del proyecto en la que nos encontremos, los modelos de fuego generados por el simulador de incendios modificado se comparan con el comportamiento real del incendio. El objetivo de esta comparación es comprobar hasta qué punto la información proporcionada por la WSN ha contribuido a realizar una predicción acertada.



Figura 3—Metodología de evaluación

Conclusiones

En este trabajo se propone un sistema de apoyo en tareas de lucha contra incendios forestales, en el cual una red inalámbrica de sensores es desplegada sobre la zona afectada una vez declarado el incendio. Los sensores tienen la finalidad de recoger información en tiempo real sobre lo que está ocurriendo en el entorno del fuego. Dicha información es enviada a través de la propia red a una estación base, donde se ejecuta un programa de simulación de incendios. El objetivo es que los datos proporcionados por los sensores contribuyan a que el simulador realice una predicción más acertada sobre el comportamiento futuro de los frentes de fuego.

Referencias bibliográficas

- Anderson, H. E. 1982. **Aids to determining fuel models for estimating fire behavior.** USDA, Forest Service. General Technical Report INT-122. 22 p.
- Corke, P.; Peterson, R.; Rus, D. 2004. **Coordinating aerial robots and sensor networks for localization and navigation.** En: Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS).
- Crossbow Technology. 2007. <http://www.xbow.com>
- Dirección General para la Biodiversidad. 2007. **Los incendios forestales en España. Decenio 1996-2005.** Ministerio de Medio Ambiente. http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/defensa_incendios/estadisticas_incendios/

- Doolin, D. M.; Sitar, N. 2005. **Wireless sensors for wildfire monitoring**. En: SPIE Symposium on Smart Structures & Materials/NDE.
- Finney, M. A. 1998. **FARSITE: Fire Area Simulator-Model development and evaluation**. USDA, Forest Service. Research Paper RMRS-GTR-4. 47 p.
- Flores Garnica J. G.; Omi P. N. 2004. **Mapeo de combustibles forestales para simulaciones del comportamiento espacial del fuego usando estrategias de geomática**. México.
- Gay, D.; Levis, P.; Culler, D.; Brewer, E. 2003. **nesC 1.1 Language Reference Manual**. www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/nesc/ref.pdf.
- Hartung, C.; Han, R.; Seielstad, C.; Holbrook, S. 2006. **FireWxNet: a multitiered portable wireless system for monitoring weather conditions in wildland fire environments**. En: Proceedings of MobiSys'06.
- Hunner, G. 2000. **Modeling forest stand structure using geostatistics, geographic information systems, and remote sensing**. Ph.D. Dissertation. Colorado State University. 217 p.
- Ilyas, M.; Mahgoub, I. 2005. **Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems**. ISBN 0-8493-1968-4. CRC Press.
- Kapler S. J.; Fischer, W.C. 1997. **Fire ecology of the forest habitat types of northern Idaho**. General Technical Report INT-GTR-363. USDA, Forest Service. 142 p.
- Li, Y.; Wang, Z.; Song, Y. 2006. **Wireless sensors network design for wildfire monitoring**. En: Proceedings of the 6th IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation.
- Mainwaring, A.; Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D.; Anderson, J. 2002. **Wireless sensor networks for habitat monitoring**. En: Proceedings of WSNA'02.
- Metzger, K. L. 1997. **Modeling forest structures to ten meter resolution using Landsat data**. Master of Science Thesis. Colorado State University. 123 p.
- Moteiv Corporation. 2007. <http://www.moteiv.com>
- Ruiz-Gallardo, J. R.; Castaño, S.; Calera, A. 2004. **Application of remote sensing and GIS to locate priority intervention areas after wildland fires in Mediterranean systems: a case study from south-eastern Spain**. International Journal of Wildland Fire, 13, pp. 241-252.
- Sarriá Sopeña, S. 2006 **Nuevas tecnologías e incendios**. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Boletín oficial nº 52/2006.
- Scott, Joe H.; Burgan, Robert E. 2005 **Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model**. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 p. GTR-RMRS-153.
- Sha, K.; Shi, W.; Szewczyk, R.; Watkins, O. 2006. **Using Wireless Sensor Networks for Fire Rescue Applications: Requirements and Challenges**. 6th IEEE International Conference on Electro/Information Technology.
- Simic, S. N.; Sastri, S. 2002. **A distributed algorithm for localization in random wireless networks**. Discrete Applied Mathematics.
- TinyOS. 2007. <http://www.tinyos.net>
- Van Lear, D. H.; Waldrop, T.A. 1991. **Prescribed burning for regeneration**. Forest regeneration manual. Edited by Duryea, M.L. and Dougherty, P.M. Klumer Academic Publishers. Netherlands. Pp. 235-249.