

INVESTIGACIÓN EN INCENDIOS FORESTALES: QUEMAS EXPERIMENTALES EN AUSTRALIA

Alba Àgueda, Miquel Cubells, Elsa Pastor, Yolanda Pérez, Eulàlia Planas*

Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ETSEIB,
Diagonal 647, pabellón G, planta 2. 08028 Barcelona, Cataluña, España.

*e-mail: eulalia.planas@upc.edu

Boletín del CIDEU 10: 37-52 (2011)
ISSN 1885-5237

Resumen

En este trabajo se muestra un ejemplo de lo que se está haciendo actualmente desde el mundo de la investigación para contribuir en la mejora del conocimiento que se tiene del comportamiento de los incendios forestales. Se describen las quemaduras experimentales que se llevaron a cabo en bosques de eucalipto de Australia durante el mes de marzo de 2008 y en las cuales miembros del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), participaron activamente. Éstas son las quemaduras experimentales más grandes que hasta la fecha se han llevado a cabo a nivel mundial. Algunos resultados que se pueden extraer de este tipo de experimentación se ponen de relieve en este trabajo. Más específicamente, se describe una metodología que permite cuantificar la efectividad de las descargas de productos químicos (retardante a largo plazo, gel y espuma) a partir del análisis de imágenes infrarrojas captadas desde el aire.

Palabras clave: imágenes infrarrojas, efectividad, descargas aéreas, comportamiento del fuego

Summary

Research in wildland fires: experimental fires in Australia

This paper shows an example of the work that is currently being done by researchers to improve knowledge about wildfires behavior. Suppression experiments conducted in Australia in eucalyptus forests during March 2008 are described here. Members from the Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), from the Universitat Politècnica de Catalunya, took an active part in these experiments. These are the largest outdoor experimental burnings ever conducted in the world up to date. Some of the results that can be drawn from this type of experimental work are highlighted here. More specifically, this paper describes a quantitative methodology based on infrared (IR) monitoring for evaluating the effectiveness of aerial suppression tactics using different chemical additives (either long-term retardants or suppressants as foam surfactants and gels).

Keywords: infrared images, effectiveness, aerial drops, fire behavior

1 Introducción

Los incendios forestales representan actualmente una problemática de alcance mundial. Las estadísticas a nivel global sobre la superficie quemada y el número de igniciones (Figura 1) así lo indican.

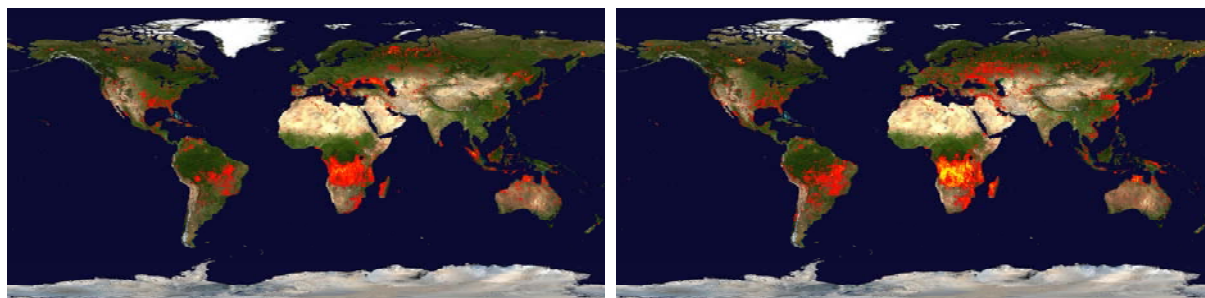


Figura 1. Ejemplos de la reciente actividad del fuego a nivel global para los periodos: 9–18 de julio de 2000 (izquierda) y 10-19 de julio de 2010 (derecha). En el mapa se acumulan las localizaciones en que se han detectado incendios a través del sistema MODIS durante un periodo de 10 días. Cada punto coloreado indica una localización donde MODIS ha detectado como mínimo un fuego durante el periodo de estudio. El color va del rojo, donde el número de fuegos cuantificados es bajo, hasta el amarillo, donde el número de fuegos es alto (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/?2010191-2010200>; última visita: 24 de noviembre de 2010).

El incremento de incendios en los bosques tropicales es la causa más importante de que el número global de hectáreas quemadas haya aumentado durante estas últimas décadas. El número y las dimensiones de los incendios que ocurren en los trópicos están creciendo debido a la deforestación y al desarrollo agrícola de Sur América y el Sur-Este Asiático. El área quemada está aumentando también en los bosques boreales circumpolares y en los del este de Estados Unidos, así como en toda la zona del Sur de Europa. Las causas son diversas; en el caso de EEUU, se atribuye al incremento de la carga de combustible debido a las anteriores políticas de extinción de incendios; en el caso de Rusia, a la disminución de los recursos destinados a la extinción; en el Sur de Europa, a cambios en las políticas agrícolas, los cuales han originado un éxodo de la población rural y la consiguiente aparición de bosques y matorrales en las zonas abandonadas. Por lo que se refiere a Australia, éste sigue siendo un país tremendamente amenazado por los incendios forestales, aunque el fuego en los

Además, estudios recientes apuntan que esta problemática tenderá muy probablemente a agravarse debido a la actual evolución del clima (Flannigan *et al.*, 2009).

bosques templados y en las sabanas se ha mantenido aproximadamente constante en estas últimas décadas (Flannigan *et al.*, 2009).

Australia es un país muy propenso a sufrir incendios forestales y tiene una interfaz urbano-forestal y una biodiversidad muy amenazadas. Los incendios se producen tanto en los bosques tropicales como en las zonas semiáridas, y el régimen de incendios y sus efectos presentan una gran variabilidad. En algunas áreas de la sabana y en la zona tropical del norte la frecuencia de ocurrencia media es de 1 a 2 años, mientras que en las selvas templadas del sur-este la frecuencia es del orden de 300 años o más (Gill and Moore, 2002). En algunas zonas del continente los incendios se producen durante todo el año y pueden alcanzar intensidades máximas del orden de $100 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-1}$ (Gill and Moore, 1990). A modo de ejemplo, se pueden recordar los hechos ocurridos en el estado de Victoria durante el llamado *Black Saturday*, en referencia al sábado 7 de febrero de 2009. Éste ha sido el peor episodio de incendios vivido en Australia desde que se tienen

registros sobre las pérdidas de vidas humanas. El día 7 de febrero hubo simultáneamente 400 incendios, los cuales causaron 173 muertos y más de 400 heridos, destruyeron 3.500 edificios y en total acabaron quemando 450.000 ha.

Antes del *Black Saturday*, Australia ya había sufrido episodios críticos relacionados con los incendios forestales. Durante 2000 y 2002 hubo numerosos incendios por todo el territorio después de un periodo húmedo que había favorecido mucho el crecimiento de la vegetación. El 8 de enero de 2003 se iniciaron en el Parque Nacional de Brindabella y Namadgi –al oeste de Canberra– cerca de 160 incendios debido a rayos (Figura 2). Estos incendios fueron creciendo y el 18 de enero llegaron a

la capital, Canberra, donde destruyeron más de 500 casas y murieron 4 personas. El 70% del territorio del estado ACT (*Australian Capital Territory*) quedó gravemente afectado. Este hecho fue el detonante para que administraciones, políticos y agentes involucrados en la lucha contra los incendios forestales se pusieran de acuerdo y constituyeran el *Bushfire Cooperative Research Centre* (CRC) en julio de 2003. El *Bushfire CRC* puso entonces en marcha 5 programas relacionados con los incendios forestales: (a) Prevención y extinción; (b) Gestión del fuego en el territorio; (c) Autoprotección de las comunidades frente al fuego; (d) Protección de la población y de los bienes; (e) Formación.

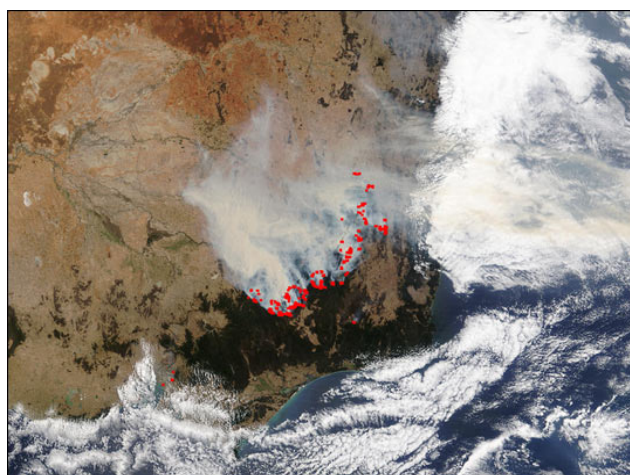


Figura 2 . Incendios en el sur-este de Australia el 22 de enero de 2003. Fuente: MODIS Rapid Response Team, NASA GSFC (<http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2003/0113austrfires.html>; última visita: 25 de noviembre de 2010).

En el marco del programa (a) se está llevando a cabo el proyecto FuSE (*Fuel dynamics and fire behaviour in mallee and heath vegetation*), que tiene como objetivo general estudiar el comportamiento del fuego en matorrales de eucalipto (*mallee-heath*) y en un área propensa a sufrir incendios forestales, el *Ngarkat Conservation Park*, en el estado del Sur de Australia. Los objetivos específicos de este proyecto son muy diversos, entre ellos:

recopilar datos sobre el comportamiento del fuego, incrementar el conocimiento sobre la contribución de los diferentes estratos de vegetación en la propagación del fuego, evaluar la efectividad de la extinción aérea, estudiar las condiciones de seguridad y salud de los bomberos (fatiga, exposición al humo, etc.), estudiar el efecto del viento en la propagación, etc.

En este trabajo se describen los experimentos que se llevaron a cabo en

2008 en el marco de este proyecto para evaluar la efectividad de la extinción aérea con productos químicos (retardantes a largo plazo, geles y espumas). En ellos, personal del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC) participó activamente. Así mismo, se presenta también el análisis que se ha hecho *a posteriori* de la información recopilada y se analiza en detalle la efectividad de las descargas aéreas utilizando como caso de estudio una de las quemadas que se realizaron.

2 Material y métodos

Ubicación de los experimentos y tipo de combustible

Las pruebas experimentales que se llevaron a cabo para evaluar la efectividad de las descargas aéreas tuvieron lugar en el *Ngarkat Conservation Park* (35° 45 S, 140° 51 E) los días 3, 4 y 5 de marzo de 2008. El

Ngarkat Conservation Park tiene un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos, y con inviernos húmedos y fríos, y es una zona propensa a experimentar incendios de elevada intensidad prácticamente durante todo el año. La zona en la que se situaron las parcelas experimentales está dentro de un sistema de dunas y cenagales, y abarca una gran área llana con dunas relativamente pequeñas y una elevación aproximada de 130 m por encima del nivel del mar.

Se prepararon tres parcelas específicamente para los experimentos, las cuales se identificaron con los nombres AS1, AS2 y AS3, y tenían un área total de 52, 49 y 93 ha, respectivamente. En la Figura 3 se muestra un esquema de la disposición de las tres parcelas y en la Figura 4 la estructura del combustible que conformaban las parcelas.

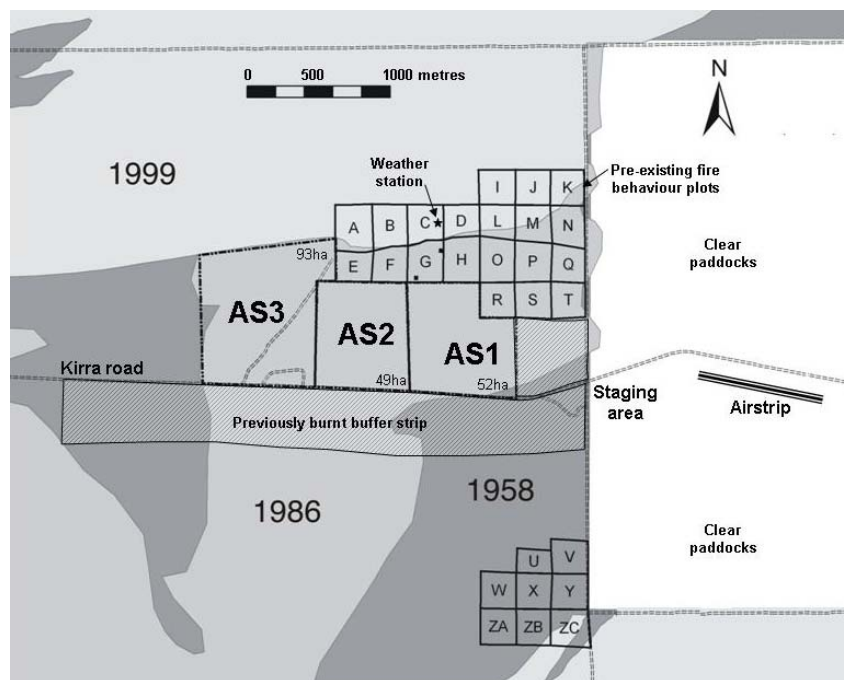


Figura 3. Esquema de la ubicación de las parcelas experimentales (AS1, AS2 y AS3). En las áreas grises se indica el año del último incendio.



Figura 4. Ejemplo del tipo de combustible presente en las parcelas.

Diseño de los experimentos

Los experimentos fueron diseñados para probar tres productos químicos, uno en cada parcela. Así, en la AS1 se planificó aplicar un gel súper-absorbente en ataque directo, mientras que en la AS2 se usó una espuma también en ataque directo. En la parcela AS3 se hicieron descargas de retardante a largo plazo 200 m por delante de la línea de ignición en ataque indirecto.

Al este de las parcelas, no muy lejos de las mismas, se estableció una base aérea con la infraestructura necesaria para el almacenaje de agua y la instrumentación requerida para mezclar los productos químicos con agua, así como una pista de aterrizaje para los aviones encargados de realizar las descargas (dos aviones bombarderos y un avión de control) (Figura 5).



Figura 5 . Infraestructura para la realización de las descargas de productos químicos (retardante a largo plazo, gel y espuma).

Cada fuego experimental tuvo lugar en días distintos debido a restricciones logísticas a la hora de llevar a cabo pruebas experimentales a gran escala y debido a limitaciones relacionadas con la hora de la quema; estaba programado hacerlas a primera hora de la tarde para trabajar con condiciones meteorológicas críticas. Estos experimentos se llevaron a cabo durante un periodo caluroso, con temperaturas del orden de los 35°C y humedades relativas inferiores al 15%. La ignición de los fuegos experimentales fue realizada por dos personas, las cuales usaron antorchas de goteo e hicieron una línea de 220-250 m de longitud orientada de manera que fuera perpendicular a la dirección del viento.

En los experimentos de ataque directo al fuego (AS1 y AS2), los aviones realizaron las descargas en el momento en que el equipo de investigadores lo consideró oportuno. Las descargas de retardante a largo plazo se aplicaron como ataque indirecto y se realizaron más de media hora antes de la ignición. Se realizaron en forma de L, con una de las líneas paralela a la línea de ignición y la otra perpendicular a ella en el sentido del viento. De esta manera quedaba asegurado que las descargas afectarían la cabeza del incendio y uno de sus flancos.

Los efectos de las descargas sobre el comportamiento del fuego fueron monitorizados a partir de observaciones hechas desde la superficie y desde el aire. Varios equipos de personas situadas por delante del frente de llamas hicieron observaciones de las descargas y de los efectos sobre el comportamiento del fuego. Esta tarea se llevó a cabo con la ayuda de cámaras de fotos y video. Cada fuego experimental se filmó desde un helicóptero

con una cámara de video convencional (la cual trabajaba en el espectro del visible) y con una cámara infraroja (IR). Ambas cámaras se posicionaron sobre un trípode fijo en el helicóptero y fueron controladas de manera manual para conseguir un buen enfoque de las parcelas. Las imágenes infrarrojas fueron capturadas con una cámara que opera en el rango que va de 7,5 a 13 μm y proporciona imágenes de 240 x 320 píxeles, en las que cada píxel representa un valor de temperatura. Las secuencias de imágenes generadas por la cámara IR se controlaron y almacenaron en un ordenador portátil (4 imágenes por segundo). El helicóptero se colocó de manera que la mayor parte de la parcela quedaba cubierta por el campo de visión de la cámara durante el tiempo que duraba cada fuego. Se colocaron referencias térmicas en diversos puntos del perímetro de las parcelas para poder rectificar *a posteriori* las imágenes IR, ya que en éstas, debido a la posición de la cámara, las dimensiones de las parcelas se veían en perspectiva, o sea, distorsionadas. Estas referencias se crearon a partir de pequeñas hogueras que se realizaron dentro de bidones con ramas y raíces secas.

Las condiciones meteorológicas se registraron desde una estación localizada en un área cercana a las parcelas (Figura 3). El contenido en humedad del combustible fino muerto se determinó a partir del secado de muestras tomadas en las parcelas. También se registraron datos GPS de la posición de los aviones, así como datos del flujo de calor y la temperatura del frente de llamas (Figura 6). Se puede obtener más información sobre el diseño y la metodología experimental en Plucinski *et al.* (2010).



Figura 6. A la izquierda: investigadores realizando observaciones *in situ*. A la derecha, arriba: torre con sensores de flujo de calor. A la derecha, abajo: cámara de video debidamente protegida y sensor de flujo de calor después del paso de las llamas.

3 Resultados

Durante la ejecución de los experimentos descritos se obtuvo un gran número de datos, tanto de caracterización del combustible como de comportamiento del fuego y del efecto de los productos químicos. Durante los años posteriores a las quemadas los grupos de investigación que participaron en ellas han ido procesando estos datos y los resultados obtenidos se han empezado a publicar (Cubells, 2009; Cruz *et al.*, 2010; Pastor *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2010; Plucinski *et al.*, 2010). Desde el CERTEC se ha desarrollado una metodología que permite cuantificar la efectividad de las descargas aéreas a partir del análisis de imágenes captadas con una cámara IR.

A continuación se presentan las características generales de la herramienta que se ha desarrollado para el análisis de las imágenes IR. Seguidamente se presentan

los resultados obtenidos para un caso de estudio concreto: la actuación que se hizo de la porción este de la parcela AS2 (AS2E).

Metodología para el análisis de imágenes IR

La metodología desarrollada para el análisis cuantitativo de la efectividad de las descargas aéreas comprende 4 pasos, los cuales se describen más abajo. Cabe hacer notar que los cálculos que se integraron en cada paso se implementaron como paquetes de aplicaciones en MATLAB®, a través de algoritmos e interfaces de fácil manejo. Las principales características de cada paso se detallan a continuación:

1. *Localización de la descarga:* Esta parte de la metodología fue diseñada para localizar y definir el área que ocupaba la descarga en el suelo. El primer paso consistió en seleccionar la imagen IR en que se iniciaba la descarga del producto

(t_{di}) y la imagen IR del instante en que la descarga completa había alcanzado el suelo (t_{df}). A continuación, las imágenes seleccionadas fueron corregidas (orto-rectificadas) usando una técnica de geometría proyectiva de visión múltiple (Hartley y Zisserman, 2003; Pastor *et al.* 2006). Esta técnica se basa en el cálculo de la matriz de homografía, la cual permite relacionar los píxeles de las imágenes IR con su posición en la superficie real. Una vez que las imágenes fueron orto-rectificadas, el contorno de la descarga fue delimitado tomando en consideración que el área de la descarga era aquella en que se podía observar una reducción significativa de la temperatura inmediatamente después de que el producto llegara al suelo. Información más detallada sobre el proceso de localización de la descarga se puede obtener en Pérez *et al.* (2010).

2. *Análisis del comportamiento del fuego:*

Este paso de la metodología fue diseñado para ofrecer información amplia sobre la evolución del perímetro del fuego y sobre su velocidad de propagación durante la operación de ataque aéreo. El primer paso consistió en seleccionar la frecuencia de imágenes IR necesaria para analizar con suficiente detalle la progresión del fuego. Esta frecuencia dependió mayormente del campo de visión capturado por la cámara IR y se fijó en 1 imagen cada 30 segundos. Las imágenes IR que se extrajeron después de haber fijado esta frecuencia se corrigieron tal y como se ha comentado anteriormente. Con la secuencia de imágenes orto-correctas se delimitó el contorno del fuego en cada imagen utilizando un determinado valor límite de temperatura. En este trabajo se tomó el valor de 600 K. Una vez detectadas todas las isócronas del perímetro del fuego, se obtuvo un mapa de las velocidades de propagación utilizando los siguientes pasos: (a) en primer lugar, se usó una interpolación lineal del tipo ‘spline’ para incrementar el número de puntos que

formaban cada isócrona; (b) después, se calcularon los vectores de trayectoria y velocidad media entre dos isócronas consecutivas; (c) finalmente, se interpoló un campo de velocidades de propagación para obtener valores de velocidad de propagación y dirección para cada píxel perteneciente al contorno del fuego.

3. *Efectividad de las descargas de ataque directo:*

Esta parte de la metodología fue desarrollada para analizar la efectividad de todas las descargas de ataque directo y no aplica para las descargas de ataque indirecto. Este paso incluye el análisis de la posición de la descarga en relación al perímetro del incendio, esto se llevó a cabo superponiendo el contorno de la zona de descarga con la isócrona en el instante t_{di} . Esta superposición puede usarse para determinar si la descarga alcanzó el objetivo deseado, i.e. el flanco, la cabeza del incendio, un foco secundario, etc. A partir de esto, la cobertura de la descarga fue evaluada analizando la posición de la misma en relación al frente de llamas. La forma y las dimensiones de la descarga (área, longitud principal, anchura y orientación) también fueron determinadas. Entonces, la idoneidad de la localización con respecto a otras descargas y a puntos de anclaje fue determinada comparando dos descargas consecutivas. El paso final tenía como objetivo determinar si en la zona de la descarga el incendio había quemado el combustible, si el fuego había superado la descarga o si el fuego se había parado. Este resultado se obtuvo a partir de la representación de la distribución de temperaturas en la zona de la descarga para toda la secuencia de imágenes seleccionadas.

4. *Efectividad global de la supresión:*

La parte final del procedimiento se dedicó a la evaluación del desempeño de la táctica de extinción en global. Esto se llevó a cabo comparando los resultados de las distintas descargas. Este paso se aplicó tanto a las descargas directas como a las indirectas. Primeramente, la conexión de

las descargas múltiples fue analizada a partir de la representación conjunta de todas las descargas en el suelo y a partir de la evaluación de la conexión existente entre las distintas líneas. Entonces, la disminución de la actividad del fuego fue analizada mediante la observación de los gradientes del mapa de velocidades de propagación en las áreas en que el ataque aéreo se había llevado a cabo.

Aplicación de la metodología a un caso de estudio: quema AS2E

La parcela AS2 se quemó en dos partes. Se prendió fuego en la mitad este de la parcela (AS2E) a las 15:00h desde una pista que atravesaba en diagonal la parcela, mientras que la quema de la parte sur-oeste de la parcela (AS2W) se inició a las 16:10h en el límite oeste de la parcela (Figura 7). Durante los experimentos las condiciones ambientales medias fueron de 36°C de temperatura, 13% de humedad relativa y vientos de oeste de 10 km·h⁻¹, con ráfagas de hasta 25 km·h⁻¹.

La primera quema (AS2E) se comenzó usando una línea de ignición de 250 m e inicialmente el fuego se propagó con alturas medias de llama de 4 m. En seguida, el fuego siguió por las copas, con focos

secundarios alcanzando distancias de hasta 10 m. Durante un corto periodo de calma (aproximadamente 5 minutos) de la velocidad del viento, la propagación del fuego aminoró y puso de manifiesto múltiples focos secundarios a lo largo del perímetro del fuego. Cuando la velocidad del viento aumentó de nuevo, el fuego hizo una carrera intensa por las copas, con alturas de llama de entre 8 y 10 m, y focos secundarios que se iniciaron a 40-60 m por delante del fuego.

Este fuego se propagó más rápido de lo esperado y había alcanzado prácticamente el límite este de la parcela cuando se hicieron las primeras descargas. Las dos primeras descargas de espuma estaban dirigidas al extremo final del flanco norte. Cuando se hizo la segunda descarga un foco secundario que había delante de la primera ya se había fusionado prácticamente con el fuego principal. El combustible que había alrededor de ambas descargas se quemó rápidamente, ya que el fuego se propagó a mucha velocidad. Las siguientes descargas efectuadas en la parcela (de la 3ª a la 7ª) se hicieron en los flancos. Éstas anclaron el fuego hasta que el mismo quemó sus alrededores.

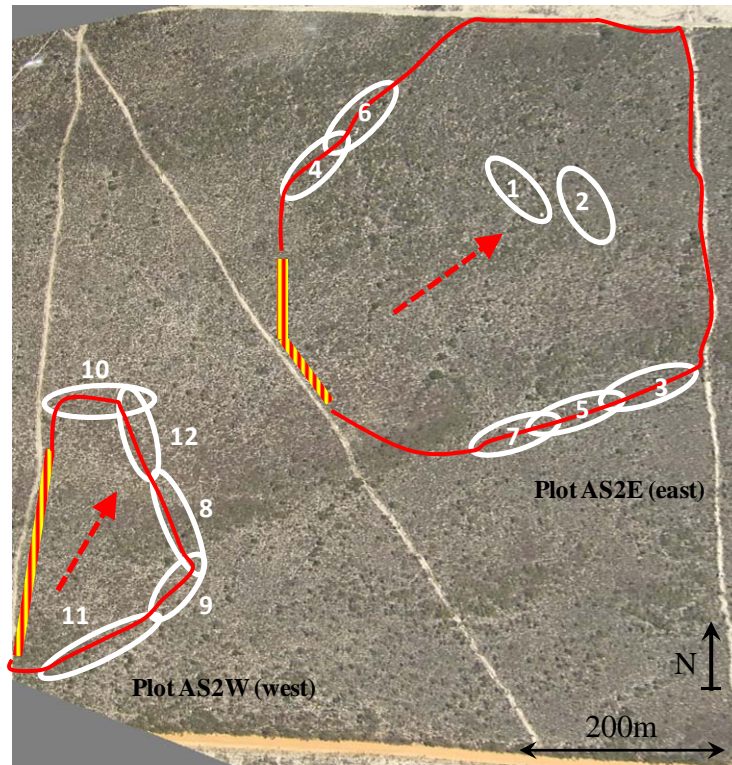


Figura 7. Ubicación de las descargas de espuma en la parcela AS2, superpuestas a una fotografía aérea georectificada tomada antes del fuego. Los óvalos numerados indican la localización y la orientación aproximada de las descargas directas efectuadas. Las flechas indican la dirección de las carreras principales del fuego. Las líneas rojas continuas indican el perímetro del fuego al final del experimento. Las líneas amarillas y rojas se refieren a las líneas de ignición.

La efectividad de la primera descarga efectuada en la parcela AS2E fue analizada utilizando el tercer componente de la metodología IR. Los resultados de las dos primeras partes de la metodología fueron usados directamente en este análisis. La Figura 8 presenta el contorno de la descarga superpuesto a un mapa de isócronas. En esta figura la última isócrona del perímetro del fuego corresponde al instante t_{di} de la

descarga. El objetivo de la descarga era el extremo este del flanco norte. Esta descarga estuvo mal ubicada porque no cubrió el contorno del fuego (Figura 9 – izquierda). Se determinó que un 82% de la superficie de la descarga estaba en un área activa, un 15% estaba en un área recién quemada y sólo un 4% de la superficie de descarga estaba situada sobre combustible no quemado (Figura 9 - derecha).

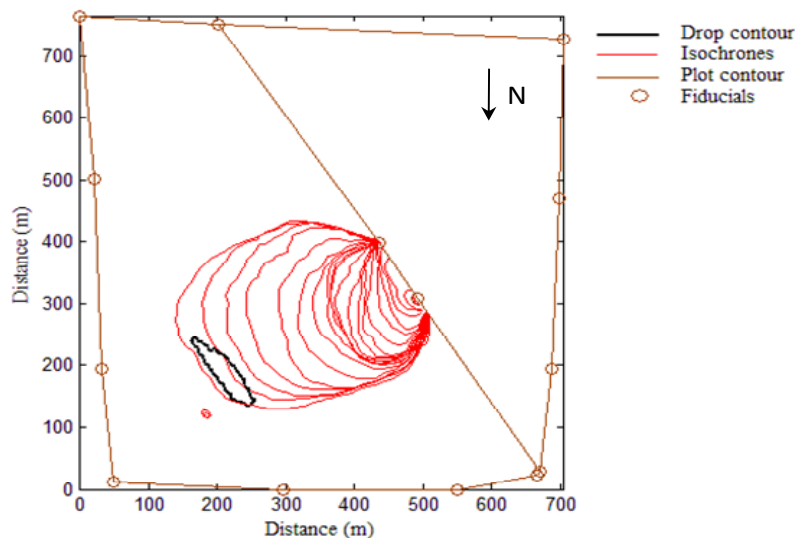


Figura 8. Contorno de la descarga nº 1 superpuesto a un mapa de isócronas (cada de 30 s) de la parcela AS2E.

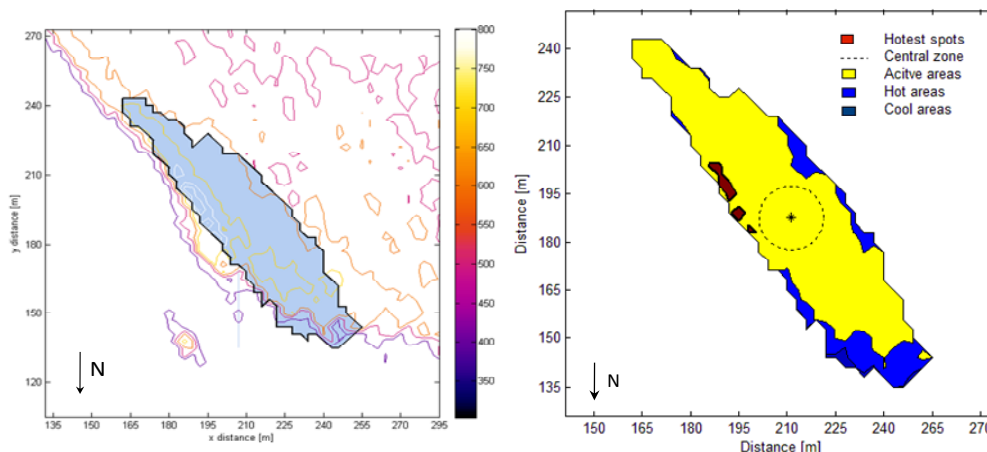


Figura 9. Izquierda: Localización de la descarga nº 1 (área azul) superpuesta a un mapa de contornos de temperatura de la zona de los alrededores en el momento de la descarga. La barra de colores asociada a los valores de temperatura está en unidades de °C. Derecha: Cobertura de la descarga nº 1 con respecto al fuego. Las áreas calientes están definidas como aquellas que tienen temperaturas 0.9 veces superiores a la máxima temperatura registrada. La zona central tiene un radio de 10 m.

La orientación de la descarga en relación al viento, al vector de velocidad de propagación del fuego y a las direcciones de vuelo se puede ver en la Figura 10. La longitud máxima de la descarga (L_{max}) se ha definido como la distancia máxima entre dos puntos del perímetro de la descarga, y la longitud central (L_c) como la longitud de la línea que pasa por el centroide de la descarga en la dirección del vuelo (determinada a partir del GPS del avión).

L_{max} y L_c fueron de 137 y 94 m, respectivamente, y no estaban alineadas debido al efecto del viento y de la columna de humo del fuego sobre la dispersión de la descarga. La anchura máxima de la descarga fue de 36 m (ancho medio a lo largo de L_{max} de 31,4 m, con una desviación estándar de 3,5 m). El área total donde se observó una reducción importante de la temperatura fue de 3.555 m².

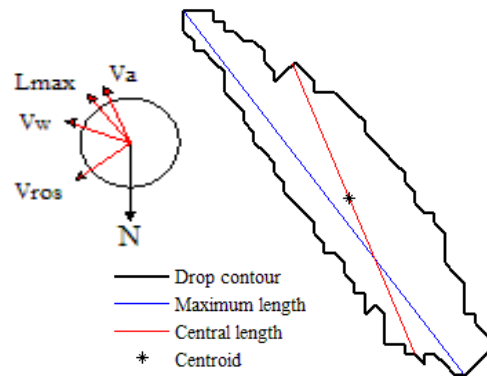


Figura 10. Orientación de la descarga nº 1 en relación a la dirección del viento, de propagación y de vuelo. V_a indica la dirección de vuelo, V_w la dirección del viento, V_{ros} la dirección de la velocidad de propagación y N se refiere a norte.

Los alrededores de esta descarga se quemaron rápidamente (Figura 11). El fuego rodeó la mayor parte del perímetro de la descarga en dos minutos y medio (cuando la segunda descarga ya había alcanzado el suelo). La cobertura de espuma sobre el combustible no quemado fue insuficiente para prevenir que el fuego quemara el combustible tratado cinco minutos y medio después de t_{di} .

La Figura 12 ilustra la localización de las siete descargas efectuadas sobre la parcela AS2E en superposición con el mapa de velocidades de propagación del fuego. Las dos primeras descargas que se hicieron no

anclaron el fuego y lo dejaron propagar hacia el nordeste. La velocidad de propagación de la cabeza del fuego era superior a los $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ cuando la segunda descarga alcanzó el suelo. La velocidad de propagación era de unos $80 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ cerca del límite norte. Se hicieron dos líneas de descargas conectadas entre ellas y ocuparon la mayor parte de los flancos (Figuras 7 y 12). Estas descargas anclaron la propagación del fuego hasta que el mismo quemó finalmente el combustible de los alrededores más de media hora después.

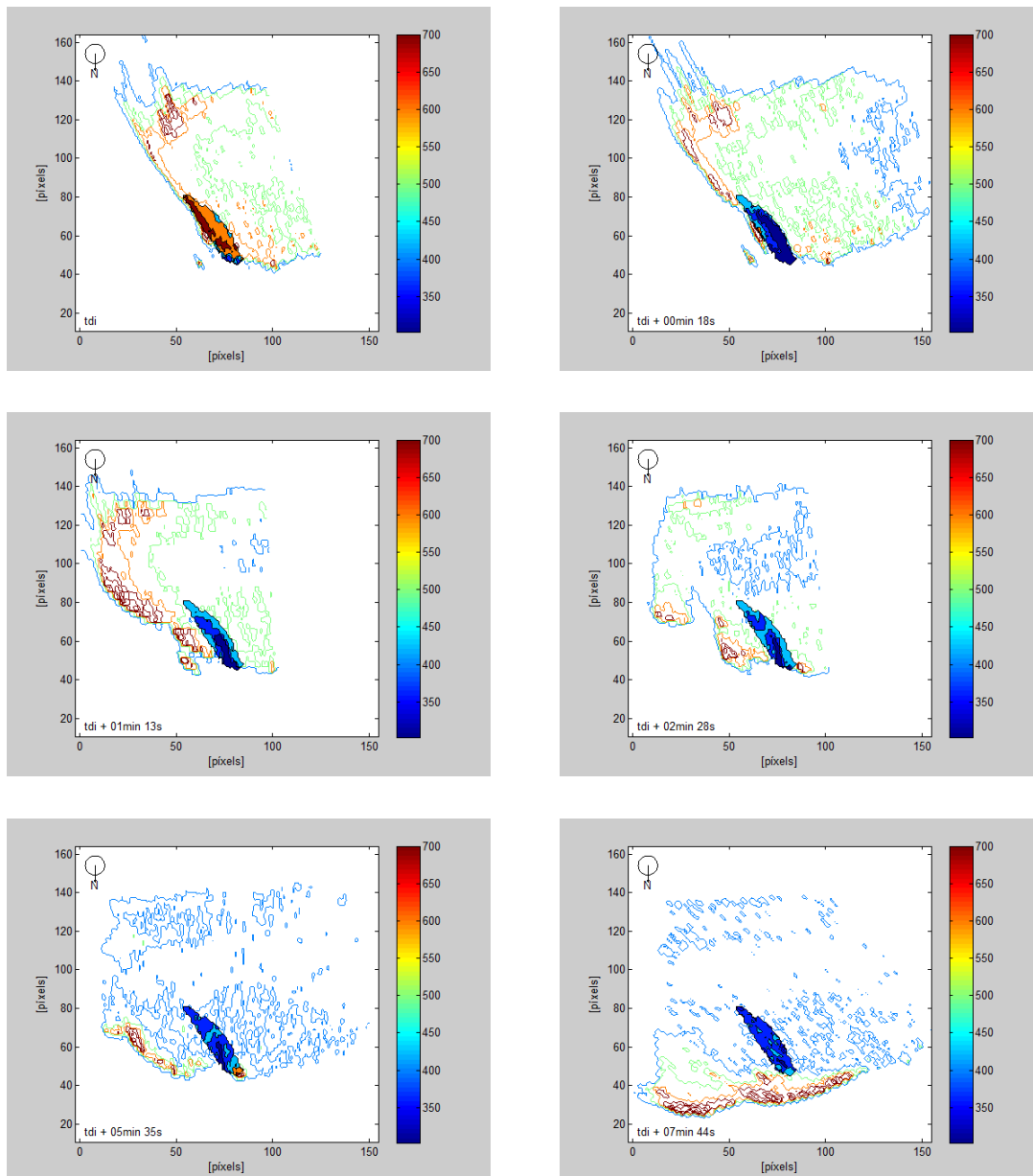


Figura 11. Evolución de la temperatura en el área de la descarga nº1 en superposición con el mapa de contornos de temperatura de la parcela AS2E. La barra de colores asociada a los valores de temperatura está en unidades de °C.

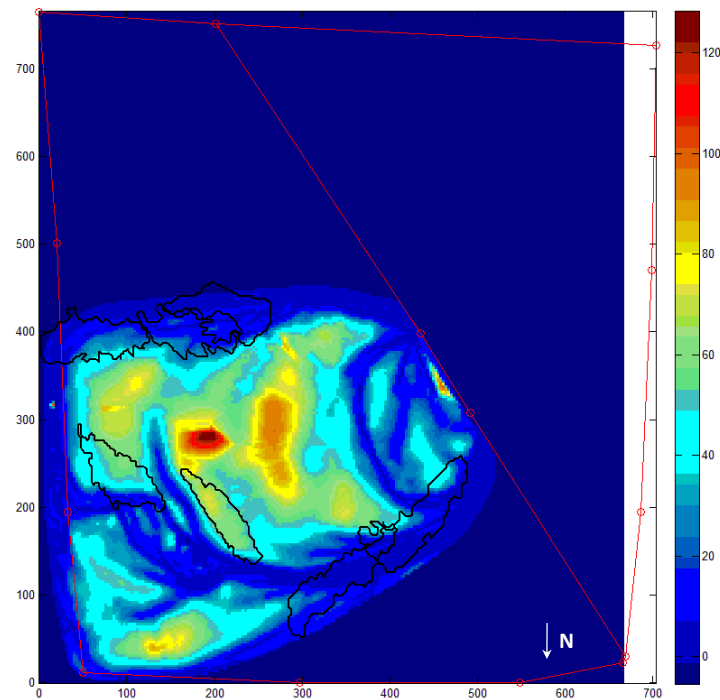


Figura 12. Descargas efectuadas en la parcela AS2E superpuestas al mapa de velocidades de propagación. La barra de colores asociada a los valores de velocidad de propagación está en unidades de $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

4 Discusión y conclusiones

Los resultados de estos experimentos indican que la ubicación táctica de las descargas es el requisito más importante para conseguir que las actuaciones de extinción aérea sean efectivas. Las descargas que no se ubiquen de manera apropiada no serán efectivas, independientemente del producto químico que se utilice.

Las metodologías usadas y probadas en este trabajo permiten hacer valiosas evaluaciones sobre la efectividad a nivel táctico de las actuaciones de ataque con medios aéreos. Se ha podido comprobar que las imágenes infrarrojas tomadas desde el aire son una herramienta efectiva para monitorizar las descargas y el comportamiento del fuego. El método desarrollado se podría utilizar para evaluar la efectividad de las descargas efectuadas con medios aéreos durante incendios forestales reales, siempre que se mejoren algunos de los pasos semiautomáticos incluidos en el proceso de cálculo. Nunca antes la tecnología de la termografía

infrarroja había sido utilizada para evaluar la efectividad de la extinción aérea de forma cuantitativa. Esta tecnología y las metodologías desarrolladas pueden aplicarse también para la obtención de mapas detallados de velocidades y direcciones de propagación. Estos mapas son una fuente de información muy valiosa en el estudio de la variabilidad del comportamiento de incendios (Planas *et al.*, 2011), que a su vez permite mejorar la seguridad de los bomberos durante la extinción, planificar y gestionar mejor las emergencias así como realizar estimaciones sobre las emisiones de CO_2 de forma más precisa.

La información recopilada en este tipo de experimentos es de gran valor, ya que puede ser utilizada como material para la capacitación de pilotos y bomberos. Los datos obtenidos destacan la importancia de la ubicación de la descarga con respecto al comportamiento del fuego y a su posición. También ilustran la importancia de tener niveles de cobertura adecuados dentro de las descargas para conseguir que la propagación del fuego se detenga.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por el Ministerio Español de Educación y Ciencia en el marco del proyecto AGL2008-01161. También ha recibido el apoyo del Fondo Social Europeo, de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y del Departamento de Universidades, Investigación y Sociedad de la Información (DURSI) de la Generalitat de Catalunya. Esta entidad también ha dado soporte a esta investigación a través del proyecto No.

2009SGR1118. Los propios experimentos fueron apoyados por el *South Australian Department for Environment and Heritage*, el *South Australian Country Fire Authority*, el *Victorian Department of Sustainability and Environment*, y el *Bushfire Cooperative Research Centre*. Los autores de este trabajo quieren agradecer también la ayuda recibida por parte de todos los bomberos e investigadores que asistieron durante el desarrollo de los experimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cruz, M.G.; Matthews, S.; Gould, J.; Ellis, P.; Henderson, M.; Knight, I.; Watters, J. 2010. Fire dynamics in mallee-heath. Fuel, weather and fire behaviour prediction in South Australian semi-arid shrublands. Bushfire Cooperative Research Centre Report No. A.10.01. Canberra, ACT, Australia.
- Cubells, M. 2009. Desenvolupament d'una metodologia basada en termografia infraroja per a l'anàlisi quantitativa de l'eficàcia de productes químics en l'extinció d'incendis forestals. Proyecto Final de Carrera, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Flannigan, M.D.; Krawchuk, M.A.; De Groot, W.J.; Wotton, B.M.; Gowman, L.M. 2009. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5):483–507.
- Gill, A.M.; Moore, P.H.R. 1990. Fire intensities in eucalypt forests of south-eastern Australia. *International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal. En: Libro de actas de la International Conference on Forest Fire Research (B.24, 1-12).
- Gill, A.M.; Moore, P.H.R. 2002. Fire situation in Australia (IFFN nº 26, pp. 2-8) [on line]. Disponible en: http://www.fire.uni-freiburg.de/iffn/country/au/au_8.htm [3 de Enero de 2011].
- Hartley, R.; Zisserman, A. 2003. *Multiple view geometry in computer vision* (2nd edition), Cambridge University Press, Cambridge. 657 p.
- Pastor, E.; Àgueda, A.; Andrade-Cetto, J.; Muñoz, M.; Pérez, Y.; Planas, E. (2006). Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing. *Fire Safety Journal* 41(8):569-579.
- Pastor, E.; Pérez, Y.; Cubells, M.; Planas, E. 2010. Quantifiable assessment of aerial suppression tactics in wildland fires using airborne infrared imagery. *International Conference on Forest Fire Research*, 15-18 Noviembre, Coimbra, Portugal. En: CD de actas de la 6th International Conference on Forest Fire Research.
- Pérez, Y.; Pastor, E.; Planas, E.; Plucinski, M.; Gould, J. 2010. Computing forest fires aerial suppression effectiveness by IR monitoring. *Fire Safety Journal*, doi:10.1016/j.firesaf.2010.06.004.
- Planas, E.; Pastor, E.; Cubells, M.; Cruz, M.G.; Greenfell, I.C. 2011. Fire behaviour variability in mallee-heath shrubland fires. 5th International Wildland Fire Conference, 9-13 Mayo, Sun City, South Africa.
- Plucinski, M.P.; Cruz, M.G.; Gould, J.S.; Pastor, E.; Planas, E.; Pérez, Y.; McCarthy, G. 2010. Project FuSE aerial suppression experiments, Ngarkat Conservation Park, South Australia, March 2008. Bushfire Cooperative Research Centre Report. Canberra, ACT, Australia.