

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior en Ingeniería Agronómica y del
Medio Natural



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPLOSIVO DEL FUEGO EN INCENDIOS FORESTALES

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL Y
DEL MEDIO NATURAL, CURSO ACADÉMICO 2019/2020

ALUMNO: *Jorge Jiménez Alcaide*

TUTOR: *José Andrés Torrent Bravo*

Valencia, 2 de marzo de 2020

TÍTULO: ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPLOSIVO DEL FUEGO EN INCENDIOS FORESTALES

RESUMEN

En pleno siglo XXI, a pesar de los avances exponenciales en ciencia e investigación, aún existen fenómenos naturales que el ser humano no ha llegado a comprender. Uno de ellos es el comportamiento explosivo del fuego en incendios forestales. Este comportamiento es muy similar al que pueden tener los ya estudiados “*backdraft*” y “*flashover*”, y que ocurren en incendios de interior.

Según diversos estudios, cuando se dan determinadas condiciones en el medio natural (tanto climáticas, topográficas, modelo de combustible vegetal, etcétera), un frente de fuego puede llegar a avanzar a más de 120 kilómetros por hora. Son muchos los casos y testimonios, varios de ellos expuestos en este trabajo, los que evidencian la existencia de este tipo de fenómeno. Lamentablemente, tras él se esconde un número alarmante de víctimas mortales ya que este avance tan rápido y repentino de las llamas suele sorprender a los equipos de extinción. Son varias las corrientes de investigación que tratan de sentar bases en un tema tan delicado como este, pero sin llegar a las mismas conclusiones. Existen contradicciones entre las diferentes teorías, y la ciencia oficial está lejos de llegar a un consenso.

Por tanto, en el presente estudio se analizan los procesos que rigen el desarrollo de estos fenómenos deflagrantes, en base a las corrientes de investigación existentes y a diversos sucesos reales que se han documentado. Mediante el análisis de esta información se pretende llegar a una conclusión propia acerca del fenómeno, además de establecer mecanismos de prevención. Es evidente que estos sucesos no pueden ser erradicados, pero sí mitigar sus consecuencias y tratar de establecer las condiciones en las que ocurren para poder detectarlos a tiempo.

Palabras clave: comportamiento explosivo, fenómenos deflagrantes, extinción, incendios forestales, corrientes de investigación, prevención.

- **Autor del TFG:** Jorge Jiménez Alcaide
- **Tutor:** José Andrés Torrent Bravo
- **Localidad y fecha:** Valencia, 2 de marzo de 2020.

TITLE: RESEARCH ABOUT BLOW-UP FIRE BEHAVIOUR IN FORESTRY FIRES

ABSTRACT

In the 21st century, despite all exponential advances in science and research, there are still natural phenomena that human beings have not come to understand. One of them is the explosive behaviour of fire in wildfire. This behaviour is very similar to those already studied backdraft and flashover, that occur in indoor fires and which the activity teams are very prepared.

According to some studies and researches, when there are critical conditions (both climatic conditions, topography, fuel model of vegetation, etc.) a fire front can reach more than 120 kilometers per hour. There are many cases and testimonies, some of them exposed in this research, which shows the existence of this type of phenomenon. Unfortunately, behind him hides an alarming number of fatalities due to this rapid rate of speed and regretting the flames often surprise firefighters. There are several streams of research that try to lay the groundwork on a subject as sensitive as this deflagrant phenomenon, but without reaching the same conclusions. There are contradictions between different theories, and official science is far from reaching a consensus.

Therefore, the objective of the study is to evaluate currently existing theories and apply them to cases founded development of this blowup fires, based on established theories and some fatalities that have been documented. It's intended to evaluate the meaning of these theories is better focused on explain the phenomenon, in addition to establish bases for its prevention. It's evident that such a phenomenon cannot be eradicated, but it's possible mitigate his consequences and try to explain the conditions in which happen in order to prevent it on time.

Key words: blowup fires, deflagrant phenomenon, firefighters, fatalities, theories, prevention.

- **Author:** Jorge Jiménez Alcaide
- **Tutor:** José Andrés Torrent Bravo
- **Date and location:** Valencia, 2 de marzo de 2020.

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Introducción	1
2. Antecedentes.....	2
3. Objeto del estudio.....	4
4. Material y métodos.....	5
4.1. Teorías sobre el fenómeno	5
4.1.1. Generalized Blaze Flash	5
4.1.2. Fuegos eruptivos	7
4.1.3. Tormenta ígnea	8
4.2. Selección de casos	9
4.3. Material gráfico.....	10
5. Resultados y discusión	10
5.1. Casos de estudio	10
5.1.1. Mann Gulch Fire, 1949	11
5.1.2. Millares, 1994	13
5.1.3. Alájar, 1999	15
5.1.4. Riba de Saelices, 2005	17
5.1.5. Kornat, 2007.....	19
5.1.6. Horta de Sant Joan, 2009.....	22
5.1.7. Torremanzanas, 2012.....	24
5.1.8. Pedrógão Grande, 2017	26
5.1.9. Peshtigo, 1871.....	28
5.2. Discusión general	31
6. Conclusión	36
7. Bibliografía	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Backdraft captado (The slow mo guys, 2019)	3
Figura 2. Comportamiento del grupo y del fuego en el Mann Gulch Fire (Rothermel, 1993).	11
Figura 3. Ortofoto de la zona respecto a Millares (parte superior derecha) vista desde dirección este. En rojo, el lugar de la tragedia. En amarillo, el área comprendida por la deflagración.	14
Figura 4. Las cuatro fases del incendio, representadas sobre una fotografía del lugar tomada días después. En rojo, el lugar del atrapamiento (Rodríguez, 1999).	16
Figura 5. Fotografía tomada el día posterior a la tragedia. En rojo, el camión autobomba tras el cual se refugió Jesús Abad. En negro, el emplazamiento del resto de vehículos. En amarillo, el área comprendida por la deflagración.	18
Figura 6. Toma aérea del lugar. Se representa la deflagración (amarillo), la balsa de agua (azul), la ubicación de Frane Lucic (rojo) y la distribución de los fallecidos (cruces de piedra).	20
Figura 7. Imagen tomada días después de la tragedia. Se puede observar la posición de los bomberos GRAF (TV3, 2017).	23
Figura 8. Bomberos realizando el contrafuego en el Camí de les Covetes, instantes antes de la deflagración.	25
Figura 9. Isócronas del incendio. Se muestran los puntos donde fallecieron las víctimas durante la gran tormenta de fuego.	27
Figura 10. Representación gráfica de Peshtigo realizada con anterioridad al incendio.	29
Figura 11. Imagen de gases confinados por la formación de una inversión térmica. .	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores vinculados a la ignición del monóxido de carbono (CO), metano (CH ₄) e hidrógeno (H).....	2
Tabla 2. Casos de estudio seleccionados, junto a información básica.....	10
Tabla 3. Datos topográficos, climáticos y de combustible vegetal referentes a los casos estudiados.....	31

1. Introducción

Los incendios forestales son uno de los fenómenos más erráticos e imprevisibles que existen en la naturaleza. Es cierto que el comportamiento del fuego, sujeto a leyes físicas y químicas bien conocidas, ha sido estudiado por la ciencia oficial hasta llegar a un punto de conocimiento muy avanzado. Sin embargo, en el desarrollo de un incendio hay un factor casi tan importante como el propio fuego: el escenario en el que se produce. Durante siglos el ser humano ha tratado de combatir los incendios principalmente cuando éstos afectaban a sus hogares o cultivos. Esta tendencia de limitar al ámbito urbano los esfuerzos y conocimientos en extinción se mantuvo hasta los inicios del pasado siglo. Fue entonces cuando aparecieron los primeros cuerpos de bomberos forestales, concretamente el Servicio Forestal de los Estados Unidos en 1905. Hasta entonces, el único método empleado para combatir los incendios forestales era la protección de los núcleos de población y esperar a que las lluvias hicieran el trabajo.

Que históricamente se hayan destinado muchos más recursos y tiempo a investigar los incendios de interior explica el grado de desconocimiento existente acerca de los ocurridos en la naturaleza. Además, un escenario forestal es mucho más complejo que una habitación o edificio, y la disponibilidad de combustible que tienen las llamas es infinitamente mayor. No fue hasta finales del siglo pasado cuando muchos países afectados por los grandes incendios tomaron conciencia de la problemática y comenzaron a desarrollar mejores equipos y técnicas en extinción, siguiendo la estela de Estados Unidos y Canadá, los dos mayores referentes en este ámbito. Pese que se ha avanzado a grandes pasos, aún queda mucho por explicar.

Dentro de los incendios forestales, uno de los fenómenos que más controversia crea en la comunidad científica son los denominados *fuegos explosivos*, *fuegos eruptivos*, *blow-up fires*, *generalized blaze flash*, *efecto chimenea*, y un largo etcétera de acepciones, hecho que muestra la falta de acuerdo entre los investigadores. En resumen, todos estos términos tratan de explicar un fenómeno consistente en una combustión prácticamente instantánea de una determinada superficie forestal, cuyo poder calorífico y destructivo se traduce en velocidades de avance del frente que pueden superar los 100 km/h, y temperaturas superiores a los 1000°C. El frente de llamas, de manera prácticamente súbita, se acelera en velocidad e intensidad sorprendiendo a los equipos de extinción y cobrándose incontables vidas desde que se tienen registros. Pese a suponer un grave peligro para los que combaten el fuego en primera línea, son pocos los investigadores que se han aventurado a estudiar y dar explicación a este fenómeno. Es de vital importancia prevenir este tipo de fuegos para mitigar sus fatales consecuencias, sobre todo cuando están en juego vidas humanas. Sin embargo, el mundo de la extinción no parece haberlos tenido muy en cuenta. En España, este fenómeno apenas es nombrado en algunos manuales, siendo prácticamente obviado en la formación de personal y en la investigación y peritaje de incendios forestales.

El presente estudio pretende incidir en el peligro que suponen estas deflagraciones para los bomberos y en la necesidad de establecer métodos que ayuden a prevenirlo, tratando de conocer las condiciones bajo las cuales se produce. Para ello se evaluarán diversos casos reales y se aplicarán a las diversas teorías existentes en la actualidad, tratando de establecer un enfoque lo más cercano posible a la realidad y de poner en común los puntos más fuertes de cada corriente. De ahora en adelante, a este tipo de fenómenos se les denominará **DEFLAGRACIONES FORESTALES (DF)**, considerándose un término más descriptivo y adecuado que los ya acuñados por otros autores.

2. Antecedentes

Para entender el proceso por el cual se produce una *deflagración forestal (DF)* se deben estudiar los conceptos básicos del comportamiento del fuego en un incendio forestal. Cuando se aplica una fuente de calor continuada a determinado material, éste entrará en estado pirólisis, que se puede definir como la ruptura o descomposición de la materia por efecto del fuego o de una fuente de calor. Aparecen entonces nuevos compuestos más simples, los cuales formaban el material de partida. Algunos de estos compuestos son los gases inflamables que darán lugar a la combustión, pero este efecto es posterior ya que en la pirólisis no interviene el oxígeno. La madera está compuesta principalmente de carbono (50%), oxígeno (42%), hidrógeno (6%) y pequeñas proporciones de componentes que suelen convertirse en ceniza. El gas inflamable que en mayor proporción emite la pirólisis de la madera es el monóxido de carbono (CO), seguido del hidrógeno (H) y el metano (CH₄). Estos gases son los que entran en proceso de combustión.

Para que se produzca una combustión se precisan los tres elementos del denominado *triángulo del fuego*, que deben estar presentes en una proporción adecuada. Éstos son: combustible (gases inflamables), comburente (generalmente oxígeno) y un punto de calor o ignición. Además, es necesaria una reacción en cadena para que un incendio se desarrolle. Cuando los gases inflamables entran en contacto con el oxígeno ambiental se produce una reacción de reducción-oxidación (comúnmente conocida como RedOx) y con la aplicación de un punto de ignición tiene lugar la inflamación de estos gases. Se trata de un proceso exotérmico en el cual se libera energía (calor) y luz (llama). En el caso de la madera, la cantidad media de energía liberada en el proceso de combustión es de unos 1200 KJ/kg.

Para que un gas inflamable entre en proceso de combustión no sólo hace falta oxígeno y un punto de ignición, sino que además es preciso que este gas tenga la concentración adecuada. La concentración mínima necesaria para que ocurra la combustión se conoce como *límite inferior de inflamabilidad (LII)*, y el máximo a partir del cual no arderá el gas (por falta de oxígeno) es el *límite superior de inflamabilidad (LSI)*. Por tanto, al intervalo de concentración comprendido entre ambos límites es denominado *rango de inflamabilidad*. Otro concepto interesante es la *mezcla estequiométrica (ideal)*, que es la proporción exacta en la cual todo el oxígeno y combustible presente habrá ardido, liberando las mayores cantidades de energía.

En el transcurso de un incendio forestal se producen gases inflamables, que pueden disiparse en la atmósfera o pueden acumularse en la superficie ocupando espacios en el monte de mayor o menor extensión, y con concentraciones variables. Esto se debe a que la energía por convección y radiación que emite el propio incendio va precalentando y haciendo entrar en estado de pirólisis el combustible circundante. Cuando se alcanza la concentración suficiente de gases (LII), con la energía desprendida del propio incendio, entran en ignición. La intensidad del fuego variará según la cantidad de estos gases y la proximidad de su concentración a la *mezcla estequiométrica*. También se inflaman si alcanzan el *punto de autoignición*, que es la temperatura mínima a partir de la cual un material combustiona sin la necesidad de aplicar una fuente de ignición. A continuación se muestran los valores más importantes de los principales gases inflamables procedentes de la pirólisis de la madera:

Tabla 1. Valores vinculados a la ignición del monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrógeno (H).

Gas Inflamable	LII	LSI	Mezcla ideal	Punto de autoignición
CO	12%	74%	28.8%	605°C
CH ₄	5%	15%	9%	537°C
H	4%	76%	28.8%	500°C

En incendios de interior, estos procesos pueden dar lugar a fenómenos en los que el fuego se intensifica de manera súbita liberando enormes cantidades de energía. Principalmente existen dos de ellos, y se conocen en la literatura anglosajona como *flashover* y *backdraft*.

La asociación estadounidense NFPA (National Fire Protection Assotiation) define *flashover* como “la fase transitoria en el desarrollo de un incendio de interior en el que las superficies expuestas a la radiación térmica alcanzan su temperatura de autoinflamación de una manera casi simultánea y el incendio se extiende rápidamente por todo el espacio disponible generalizándose en todo el recinto” (NFPA, 2017). Este fenómeno es muy habitual en fuegos de interior, y suele ser el paso entre la etapa inicial y un incendio completamente desarrollado. Los gases calientes confinados en el techo tienen una temperatura más o menos uniforme, y la radiación que emiten calienta el recinto por igual. Es por ello que la mayoría de los elementos alcanzan de manera prácticamente simultánea su punto de autoignición y se produce una combustión generalizada en cuestión de pocos segundos.

Por otro lado, “el *backdraft* es una explosión que ocurre cuando se introduce oxígeno en un recinto cerrado lleno de gases calientes. Cuando el incendio consume todo el oxígeno de la habitación, las llamas visibles desaparecen. Los materiales entran en una combustión latente, y gases inflamables se acumulan por toda la habitación. La temperatura y la presión aumentan, y los gases se expanden presionando puertas y ventanas (...). Si se abre una vía de entrada de oxígeno, el combustible vaporizado arde en llamas, y los gases de presión explotan por esa vía de entrada, resultando una gran bola de fuego” (NFPA, 2019).

Tras esta explosión, todos los gases inflamables se han consumido y ya no existen apenas llamas ni combustible, por lo que el incendio se puede dar prácticamente por extinguido. Se muestra a continuación una imagen del fenómeno (ver Vídeo 2, Anejo IV):



Figura 1. Backdraft captado (The slow mo guys, 2019)

Semejantes al *backdraft* son las denominadas *explosiones de gases de incendio*. Se trata de acumulaciones de gases de incendio mezclados idealmente con comburente, que esperan un punto de ignición para inflamarse. Cuando este punto aparece en el rango de la masa de gas, ésta explota, y su efecto es muy similar al del *backdraft*.

3. Objeto del estudio

Cuesta imaginar fenómenos explosivos en un incendio forestal. En espacios cerrados se producen acumulaciones de gases, pero parece ser más difícil en espacios abiertos a la libre circulación de aire, como lo son las superficies forestales. Lo cierto es que se han documentado multitud de casos en los que, según testigos o peritajes posteriores, se ha tenido constancia de grandes deflagraciones prácticamente súbitas de varias hectáreas. El primer caso que marcó un punto de inflexión en el estudio de estos fenómenos fue el conocido como Mann Gulch Fire, ocurrido en Montana (EEUU) en 1949, donde perdieron la vida 13 bomberos paracaidistas. Tras cuatro meses de investigación, la comisión encargada dilucidó que la causa de la muerte de estos hombres fue “*the fire blow up*”, lo que se podría traducir como una “explosión de fuego”. Fue la primera vez que se habló de un concepto como este.

Las décadas posteriores se sucedieron más casos como el del barranco de Mann. Los cuerpos de bomberos americanos documentaban estos sucesos y eran conscientes de su existencia, pero los esfuerzos estaban acumulándose en otros ámbitos. Estados Unidos siempre ha tenido mucha ambición en ser el país más puntero en innovación tecnológica, y las mayores inversiones en materia de incendios forestales eran destinadas a perfeccionar la extinción. Se desarrollaban más y mejores hidroaviones y vehículos terrestres, bombas más potentes, equipos de protección más resistentes, nuevas instalaciones y personal, pero poco se destinaba a prevención e investigación. Era objeto de la ciencia estudiar estas explosiones y darles explicación para ayudar a prevenirlas. Poco a poco fueron apareciendo diversas corrientes y teorías, pero hasta hoy en día no existe un consenso teórico ni han aparecido modelos preventivos.

Toda la información recabada por los norteamericanos ha llegado a España con cuentagotas y de manera incompleta. Uno de los pocos investigadores europeos que se ha aventurado a estudiar este fenómeno es el portugués Xavier Viegas, con diversas publicaciones y conferencias acerca de lo que él mismo denomina *fuegos eruptivos*. En próximos apartados del presente estudio se hablará de sus teorías, pero cabe poner en valor su trabajo, prácticamente pionero en nuestro continente. Pocos más son los que han dado explicaciones acerca de una problemática de tal calibre.

Según algunos autores, en los últimos cien años (en suelo europeo) han fallecido casi 800 bomberos forestales en primera línea de extinción, de los cuales, alrededor de 700 se pueden asociar a *fuegos explosivos o eruptivos* (Pons, 2007). En España, en el periodo 1980-2010, perdieron la vida 187 personas pertenecientes a equipos de extinción forestales, 88 de ellas lo hicieron por atrapamientos (EGIF, 2011). De todos estos casos fatales, solo dos fueron relacionados con fenómenos explosivos del fuego: el de Alájar (1999) y el de Riba de Saelices (2005), ambos desarrollados en el presente estudio. Parece haber otros muchos casos asociados a las *deflagraciones forestales* en territorio español, pero que han sido obviados mediante otras explicaciones o apelando al infortunio y a la imprevisibilidad. Hay que tener en cuenta es que apenas existen informes publicados en relación con casos de víctimas mortales en atrapamientos forestales, que se cuentan por decenas en los últimos años. La administración solo ha sacado a la luz el informe de tres incidentes: Alájar (1999), Horta de Sant Joan (2009) y Molinaferra (2011).

Pese a ser evidente la gravedad del fenómeno y el riesgo que supone para los equipos de extinción, apenas es nombrado en la formación e instrucción del personal. Se han consultado diversos manuales formativos de bomberos, guías técnicas oficiales y bases docentes, y las referencias a las *deflagraciones forestales (DF)* en todos sus términos (*fuego explosivo, eruptivo, efecto chimenea*, etc) son prácticamente inexistentes. Se mencionan en pequeños apartados sin profundizar en ello, y en otros casos ni siquiera son nombrados.

El siguiente extracto pertenece a la “Guía técnica para la investigación de accidentes en la extinción de incendios forestales”, realizada por la sociedad Limfor para el Ministerio de Medio Ambiente y publicada por el mismo, y resume a la perfección la situación: “*En los casos de Riba de Saelices y Alájar, los informes indican la presencia de un fenómeno sorprendente de comportamiento del fuego. Los análisis iniciales de la situación que efectuaron los combatientes parece que fueron erróneos u omitieron algunos factores casuales. La mayoría de los informes existentes de accidentes de este tipo, se limitan a efectuar una descripción de los hechos y en el mejor de los casos a realizar un análisis del comportamiento del fuego y las distintas variables que en él pudieron intervenir. Todos dejan de lado el factor humano (...) Excepto en el incendio de Alájar, los informes no se hacen públicos. En la mayoría de las situaciones de atrapamiento se repiten los mismos errores, y estos errores han de ser evitados antes de que ocurran nuevas desgracias (...) Por ello es preciso analizar sistemáticamente los accidentes para aprender de las lecciones que la propia realidad nos da*”.

Dada esta situación, el objeto del presente estudio es alertar de la gran problemática que suponen las *deflagraciones forestales (DF)* para la integridad física de los equipos de extinción, mediante el análisis de casos en los que se han producido un alto número de víctimas mortales y que reflejan el alto poder destructivo de este fenómeno. Se considera de vital importancia expandir el conocimiento en este tema para lograr establecer mecanismos de prevención en un futuro, ya que estas deflagraciones se rigen por procesos que pueden ser detectados o evitados a tiempo. Para la comprensión y análisis de estos procesos se deben estudiar las bases del comportamiento del fuego y las teorías más asentadas actualmente en la comunidad forestal. Estas corrientes, pese a tener puntos comunes, presentan disparidades en cuanto a la explicación del proceso y al peso que se le otorga a cada una de las variables. El presente estudio pretende esclarecer cuál es la línea de investigación mejor encauzada, viendo las fortalezas y debilidades de cada una cuando son aplicadas a los casos estudiados. Se cree necesaria una puesta en común que recoja las distintas interpretaciones, ya sea del fenómeno en general o de sucesos particulares. Se tratará de llegar a una conclusión propia acerca de los mecanismos que desencadenan las *deflagraciones forestales (DF)*, y de cuál tiene que ser el enfoque para lograr su prevención.

4. Material y métodos

4.1. Teorías sobre el fenómeno

Desde que algunos investigadores comenzaron a analizar los *blow-up fires*, principalmente estadounidenses y canadienses, las múltiples corrientes han ido reduciéndose progresivamente a dos. La primera de ellas se enfoca en procesos químicos y de acumulación de gases, y recibe el nombre de *Generalized Blaze Flash*. Por otro lado, la teoría de los *fuegos eruptivos* se basa en las características físicas del escenario y las condiciones atmosféricas del entorno inmediato.

4.1.1. Generalized Blaze Flash

Esta teoría es la más aceptada entre los investigadores norteamericanos. A finales del pasado siglo comenzaron a sentarse sus bases entorno a las acumulaciones de gases inflamables que producía un frente de fuego a su alrededor. Dichas acumulaciones se relacionaron con los Compuestos Orgánicos Volátiles (de ahora en adelante, COV) que emiten los organismos vegetales cuando están sometidos a estrés hídrico, y cuya inflamabilidad es muy alta.

“Según la mayoría de los bomberos norteamericanos, un *Generalized Blaze Flash* (GBF) consiste en la ignición prácticamente instantánea de un área forestal, desde la vegetación baja hasta el dosel” (Chatelon et al., 2014). La definición puede ser comparada con la que aporta Butler et al. (1998) acerca de los *blow-up fires*, definiéndolos como “una rápida transición de un fuego de superficie de intensidad relativamente baja, a un fuego en el que arde toda la vegetación presente, desde la superficie hasta el dosel. Demuestra grandes lenguas de fuego, altos niveles de energía liberada y altas cifras de velocidad”.

Chatelon et al. (2014) afirma que en un GFB el frente de un incendio puede alcanzar velocidades de avance cercanas a los 40 m/s y provocar temperaturas superiores a los 1500°C. Cuando la atmósfera es inestable, los gases calientes producidos por la combustión atraen fácilmente el aire al nivel del suelo y mejorando así el proceso de combustión. Esto crea una corriente ascendente extremadamente poderosa, que puede causar grandes depresiones. En caso de regiones con sequías, como podrían ser los bosques mediterráneos, la evapotranspiración de las plantas se complementa con la vaporización de COV. Cuando las temperaturas aumentan drásticamente con la llegada del fuego, también lo hacen las emisiones de COV, produciéndose en grandes cantidades como demostró experimentalmente Barboni (2006). El rol de estos compuestos puede ser importante en el comportamiento de un incendio forestal.

Para el inicio de una deflagración se requiere de una baja energía de activación, de hecho, incluso una chispa podría desencadenar el fenómeno. La llama se propaga por transferencia de calor y difusión de los radicales libres. No existe onda de choque (como en una explosión), y la velocidad alcanza varios metros por segundo. La sobrepresión producida depende de la velocidad de avance del frente, y se sitúa en varios milibares (Chatelon et al., 2014). Para evaluar estas deflagraciones son importantes dos características de los gases: el punto de ignición y la temperatura de autoignición, ambos descritos al inicio del presente estudio.

Según las conclusiones de Courty (2012), los COV son productos que no han combustionado en la pirólisis inicial o emitidos por la vegetación cercana a las llamas. Según las características topográficas del escenario, estos compuestos pueden acumularse cerca del fuego e inflamarse a su llegada. La densidad de los COV es mayor que la de los gases, por tanto se acumulan bajo la vegetación o en zonas inferiores, en fondos de barranco o bajo altas pendientes. Según Chatelon et al. (2014) los GBF pueden ser debidos a esta alfombra de gases.

En pinares mediterráneos, el COV emitido en mayor proporción es el *α -pineno*. Los ensayos realizados por Barboni (2006) muestran que la inflamabilidad de este compuesto es muy alta: límite inferior del 0,7%, punto de ignición a 33°C y temperatura máxima de emisión de 175°C, un valor fácilmente alcanzable durante un incendio. Por tanto, se puede afirmar que una baja concentración de *α -pineno* es suficiente para inflamar una nube de gases.

Según las definiciones de Carbonell et al. (2004) y Barboni (2006) se establecen las configuraciones principales que propician los GBF, y son las siguientes:

- Que en el fondo de valle o barranco se pueden acumular COV, generalmente en cauces secos.
- Que en pequeñas cuencas, zonas llanas o rodeadas de formaciones rocosas, se puede producir una burbuja térmica o nube de gases que se mueve erráticamente y a gran velocidad por la zona del incendio, hasta que deflagra al entrar en contacto con una llama.
- Que en una fuerte pendiente positiva se pueden acumular COV en la superficie, y por flujos de aire convectivos, son empujados en dirección ascendente. Al llegar las llamas se crea una especie de “alfombra de fuego”.

- Que en valles o barrancos muy escarpados con poca vegetación (arbustiva en su mayoría), donde ambas laderas están muy cerca, el fuego puede recorrer lentamente una de ellas. Por cercanía, se va transmitiendo calor por radiación y se van generando nubes de gas y COV. Cuando llega el incendio, deflagra la ladera opuesta entera.
- Que una capa de aire frío que se sitúe por encima del incendio y que se mueva a gran velocidad puede actuar como techo confinando los gases calientes bajo suya. Se suele deber a una bajada considerable de las temperaturas, y cuando esta acumulación gaseosa alcanza el LII, se produce el consumo total del combustible (explosión de humo).

4.1.2. Fuegos eruptivos

Este concepto es acuñado por Viegas (2007), y es definido de la siguiente manera: *“Un fenómeno que se observa de vez en cuando en los incendios forestales consiste en el desarrollo rápido de un frente de llamas, cuya velocidad de propagación aumenta de forma súbita. Este aumento de intensidad se acompaña por corrientes de aire muy fuertes (...) y ha sido la causa de muchos accidentes fatales en todo el mundo. Este fenómeno, que ocurre particularmente en desfiladeros o laderas de acusadas pendientes, es conocido comúnmente por efecto chimenea, debido a la aspiración del aire que es inducida por el propio fuego, tal y como ocurre en una chimenea. En la literatura anglosajona es conocido por blow-up, término que corresponde a una especie de explosión y que parece verificarse en el comportamiento del fuego en estas circunstancias”*.

Según establecieron Dold y Zinoviev (2009), el comportamiento presente de un fuego forestal depende de su comportamiento pasado. Argumentan que los encajonamientos y pendientes ascendentes son factores clave para el desarrollo de estas erupciones. Según sus estudios y observaciones, parece ser claro que las condiciones atmosféricas locales generadas por el propio incendio son las que dan lugar a las deflagraciones, siendo prácticamente nula la influencia del clima exterior. Se muestra una clara correlación entre este fenómeno y los flujos de aire que crea a su alrededor el frente de llamas.

Si el viento exterior no aporta suficiente cantidad de oxígeno a la llama, el fuego crea vientos inducidos (corrientes de convección) que permiten las condiciones para que se produzca la inflamación de los gases de pirólisis. En algunos casos se produce una retroalimentación acelerada de este proceso. El viento inducido inclina la llama (más probable en altas pendientes) y aumenta la radiación de esta. En consecuencia aumenta la propagación y por tanto la profundidad de llama y los gases emitidos en pirólisis. Se crea un círculo vicioso de retroalimentación que aumenta el poder del incendio pudiendo desencadenar un fuego eruptivo (Chatelon et al, 2014).

Esta corriente de investigación trata de establecer explicaciones físicas sobre el fenómeno, principalmente mediante la creación de modelos matemáticos predictivos:

- Xavier Viegas realizó diversos experimentos en laboratorio y en parcelas forestales para tratar de llegar a conclusiones físicas acerca del fenómeno. En uno de ellos (Viegas et al., 2002) una parcela ardió en 32 minutos, produciéndose la combustión del 30% de su superficie en menos de 3 minutos. A raíz de las medidas tomadas en estos ensayos realizó un modelo matemático predictivo (Viegas, 2004), el cual relaciona la tasa de avance de las llamas (R) con el viento registrado en sus inmediaciones (R') e incluye cuatro parámetros (a_1 , a_2 , b_1 , b_2) medidos en laboratorio para describir las condiciones del escenario:

$$dR'/dt = a_1^{(1/b_1)} b_1 a_2 (R' - 1)^{(1-1/b_1)} R'^{(b_2)}$$

- Según el modelo propuesto por Dold et al. (2011) se establece una estrecha relación entre el número de Byram (Byram, 1954) y la tasa de propagación de un incendio. Cuando este número tiende a infinito según el producto de las variables de energía de combustión (Q), cantidad de combustible (m), velocidad de avance (R) e intensidad del frente (I_B), es muy probable que tenga lugar un *fuego eruptivo*.

$$B = QmR/I_B$$

- A raíz de los modelos de Viegas (2004) y Dold et al. (2011) se desarrolla el de Chatelon et al. (2011), que trata de establecer numéricamente el peligro de erupción de un incendio. Esta fórmula incluye diversas variables: densidad de combustible, temperatura ambiente, temperatura de llama, contenido en humedad de combustible, coeficiente de absorción, temperatura de inflamación de los gases de pirólisis, longitud de llama y ancho de frente, entre otros. Si la formulación numérica de estos factores supera el valor de la unidad, existe un peligro potencial de que se produzca un *fuego eruptivo*.

$$\rho_v / (\tau_0 \cdot B \cdot T_a \cdot T^3 (Y/4(C_p \Delta T + m \Delta h) - 1/(2 \cdot v \cdot x_0 \cdot \Delta h))) < 1$$

En base a la información consultada, el concepto de *fuego eruptivo* no parece haber sido aceptado entre los cuerpos de extinción españoles.

4.1.3. Tormenta ígnea

Cabe mencionar un concepto que recientemente ha entrado en el vocabulario de los técnicos y equipos de extinción europeos. Se trata de las *tormentas ígneas*, y es lo que se conoce en la literatura de incendios norteamericana como *firestorm* (tormenta de fuego). El primer caso registrado en nuestro continente fue el de Pedrógão Grande 2017, en Portugal, donde murieron 67 personas y ardieron más de 100.000 hectáreas en el intervalo de un día. Meses más tarde se produjo otra *tormenta ígnea* en el incendio de Las Máquinas 2017, en Chile, durante el cual ardieron 115.000 hectáreas en sólo 14 horas (Castellnou et al., 2017). Ambos casos fueron investigados por reconocidos técnicos europeos que han puesto este fenómeno en el punto de mira de los analistas de incendios. A día de hoy se siguen estudiando los mecanismos que rigen el comportamiento de estas tormentas de fuego, pero en líneas generales se ha avanzado mucho en su comprensión.

Se trata de un concepto que implica procesos complejos de difícil explicación. Se puede resumir de la siguiente manera: cuando la columna de convección de gases calientes creada por el incendio adquiere grandes proporciones, asciende en la atmósfera. En caso de que en su ascenso se tope con una masa de aire mucho más fría, la columna colapsará. Ese colapso puede derivar en fuertes corrientes descendentes de aire (lo que se conoce como *downburst*) que al llegar a la superficie terrestre se adaptan a la topografía. Se extienden paralelas al relieve acelerando el frente del incendio a grandes velocidades, dado que estos vientos son prácticamente huracanados.

Según se puede leer en el informe publicado sobre el incendio de Las Máquinas (Castellnou et al., 2017), “*la tormenta de fuego estira y ensancha el incendio totalmente fuera de capacidad de extinción, creando torbellinos y alterando las condiciones meteorológicas del entorno, creando una atmósfera envolvente que se denomina “ambiente de fuego” (Countryman, 1972). Como se puede observar, estas intensidades ya no dependen de la ayuda del factor pendiente.*

Son claramente condiciones dentro de lo que denominamos la atmósfera alterada por el propio incendio. Estas serían las carreras que aprovechan la alineación de efectos que se han dado en este episodio (...) cabe destacar que existe una carrera que las supera a todas; tiene casi 6 km de anchura y se proyecta a lo largo de 11 km de distancia (...) a un ritmo de 8.200 ha/h”

4.2. Selección de casos

Tras una consulta inicial de decenas de casos asociados o asociables a las *deflagraciones forestales*, se han seleccionado nueve para su estudio y profundización. Los criterios seguidos para realizar esta selección han sido los siguientes:

- Que sean casos con víctimas mortales, para mostrar el poder del fenómeno y contar con informes y estudios más completos. Siempre que se producen pérdidas humanas se trata de esclarecer con más precisión lo ocurrido, y la información disponible (tanto analítica como gráfica) es mayor.
- Otro aspecto clave son las condiciones del escenario de cada caso. Por lo general, en la propagación del fuego influyen tres factores: topografía, condiciones atmosféricas (viento y humedad) y combustible vegetal. Se ha tratado de escoger casos que presenten diferentes escenarios y que pongan en tela de juicio las condiciones que se creen estandarizadas en estas deflagraciones.
- Los casos, en su mayoría, cuentan con supervivientes que pudieron narrar lo ocurrido. Deben de ponerse en valor estos testimonios, dado que contienen información muy valiosa para entender un fenómeno errático y de difícil recreación.
- Por otro lado, se ha dado mayor prioridad a los sucesos ocurridos en suelo español o europeo, junto con sucesos norteamericanos con masas vegetales muy similares a las que se pueden hallar en la zona mediterránea.
- Se ha considerado elegir, en una proporción similar, sucesos que han sido catalogados oficialmente como *deflagración forestal (DF)* en cualquiera de sus términos junto con otros que son susceptibles de ello, pero cuya explicación oficial se aleja de este fenómeno. Se pretende mostrar que estas deflagraciones ocurren con mayor frecuencia de la estimada, siendo omitidas en muchas ocasiones.
- Por último, se ha tratado de que los casos sean actuales. En su mayoría tuvieron lugar en estas dos últimas décadas, salvo dos de ellos. Son más antiguos pero, como se mostrará con posterioridad, contienen información muy valiosa.

Debido a estas consideraciones, los casos elegidos se muestran en la siguiente tabla, junto a su fecha y balance de víctimas:

Tabla 2. Casos de estudio seleccionados, junto a información básica.

Caso	Región	Año	Víctimas mortales	Hectáreas
Mann Gulch Fire	Montana, EEUU	1949	13	484
Millares	Valencia, España	1994	8	25.430
Alájar	Huelva, España	1999	4	320
Riba de Saelices	Guadalajara, España	2005	11	12.874
Kornat	Kornat, Croacia	2007	12	300
Horta de Sant Joan	Tarragona, España	2009	5	1.140
Torremanzanas	Alicante, España	2012	2	684
Pedrógão Grande	Leiria, Portugal	2017	58	28.914
Peshtigo	Wisconsin, EEUU	1871	>1200	490.000

4.3. Material gráfico

Se ha considerado necesario realizar un aporte gráfico de los casos estudiados y del fenómeno en sí, buscando una mejor comprensión e interpretación. En el “Anejo III: Imágenes adicionales”, se muestran imágenes que han ayudado a analizar su comportamiento. Por otro lado, el “Anejo IV: Multimedia” muestra diversos vídeos publicados en internet que ofrecen imágenes sobre el fenómeno y sus consecuencias, además de testimonios de supervivientes. Dado que las *deflagraciones forestales* son desconocidos para la sociedad y parte de los cuerpos de extinción, algunas veces estos fenómenos son captados por las cámaras pero pasan desapercibidos como tales. Además de los encontrados debe de haber mucho más material en la red a la espera de ser correctamente interpretado.

5. Resultados y discusión

5.1. Casos de estudio

Se procede a exponer los nueve casos seleccionados para la realización del estudio. Se ha analizado a fondo la información disponible sobre ellos y se entrega a continuación un pequeño resumen de cada uno, resaltando los aspectos más importantes y que más relación guardan con el fenómeno estudiado. Se exponen de manera cronológica, siendo los primeros siete los relacionados con las *deflagraciones forestales (DF)*. Los dos últimos se refieren a *tormentas ígneas*, y posteriormente se explicará la posible relación que guardan ambos fenómenos entre sí.

Cabe apuntar que los datos climáticos, topográficos y de modelo de combustible vegetal relacionados con cada caso se recogen en el “Anejo I: Información complementaria de los casos estudiados” para una posterior valoración conjunta de todos ellos. Además, el “Anejo II: Testimonios” es una recopilación de todos los testimonios de los supervivientes. Se recomienda consultar estos anejos para una mejor interpretación de los casos.

5.1.1. Mann Gulch Fire, 1949

El 5 de agosto de 1949 un incendio forestal arrasó con un grupo de 16 bomberos paracaidistas en el barranco de Mann, Montana (EE. UU.), de los cuales sólo tres sobrevivieron. El comportamiento que tuvo el fuego supuso algo nunca visto para los cuerpos de extinción de la época. Se creó una comisión de investigación en la que los informes concluyeron que lo sucedido en el barranco de Mann fue una *fire blowup* (explosión de fuego) que pasó por encima de los bomberos, con fatídicas consecuencias.

El fuego se inició alrededor de las 12:25 durante un día muy ventoso y caluroso (las temperaturas rondaban los 35°C) en una cresta entre el Mann Gulch y un barranco paralelo, en su zona más meridional. Se muestra el escenario en la Imagen 1 (ver Anejo III). Entorno a las 16:00 aterrizan los 16 bomberos paracaidistas en la parte alta de la cuenca con el objetivo de frenar el avance de las llamas, cuyo desarrollo inicial era lento. Los movimientos del grupo y el avance fuego a lo largo del Mann Gulch se representa en el siguiente mapa:

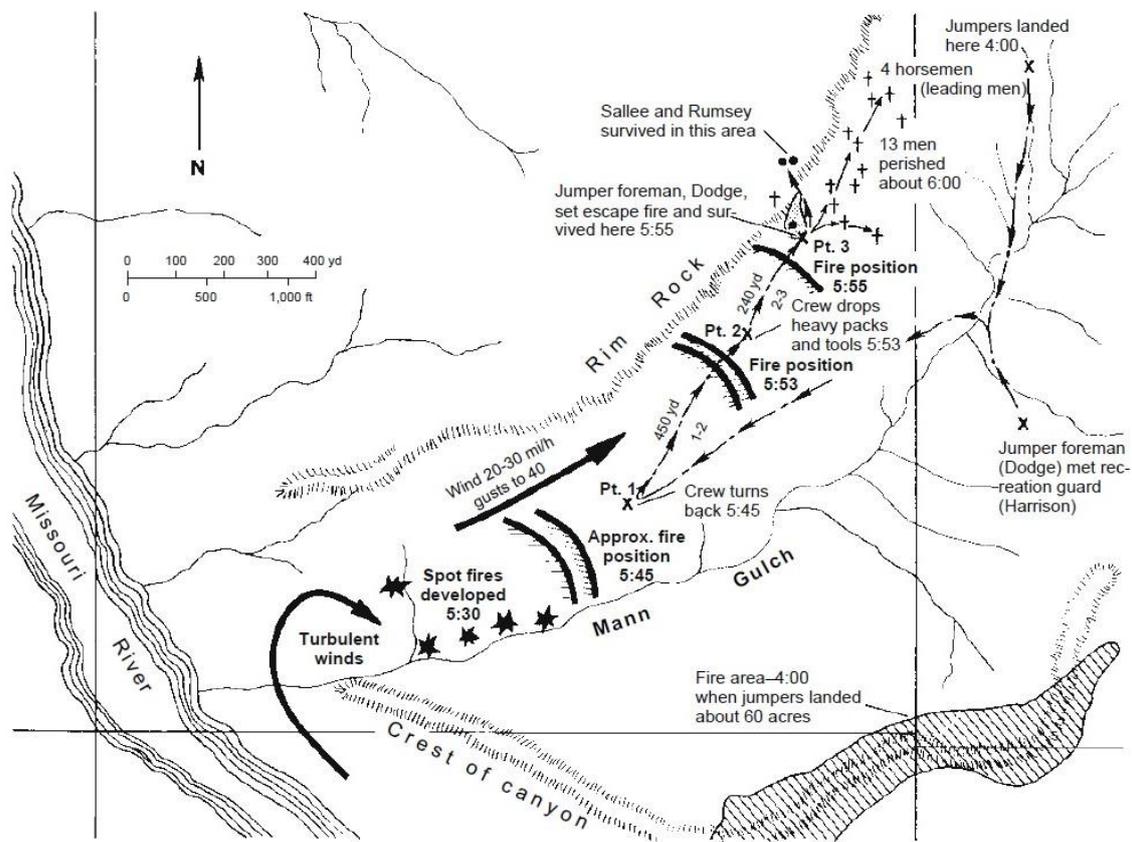


Figura 2. Comportamiento del grupo y del fuego en el Mann Gulch Fire (Rothermel, 1993).

Ante la baja intensidad de las llamas, los bomberos comienzan a montar los equipos de extinción y se proponen crear una línea de defensa en la parte sur. Las llamas estaban descendiendo por la ladera a un ritmo lento, pero comenzaban a internarse en la zona con más carga de combustible vegetal debido a diversos focos secundarios que se estaban generando en la parte inferior. El fondo del barranco estaba cubierto por un denso arbolado adulto de *Pinus ponderosa*, con presencia de *Pseudotsuga Menziesii* en menor proporción y un sotobosque dominado por *Juniperus communis*. A medida que se iba ganando altura en las laderas la densidad y tamaño de los árboles se reducía, así como el matorral, que dejaba paso a herbáceas como *Festuca idahoensis* (Butler et. al, 2000). La vegetación original se puede observar en la Imagen 2 (ver Anejo III).

Tras organizarse, el equipo se dispuso a descender y realizar un ataque directo desde la zona más baja, próxima al río Missouri, aprovechando que el día se acababa y por tanto se esperaba que las condiciones fuesen aún más favorables para el ataque. Los vientos se situaban entorno a los 30 y 40 km/h, con picos de mayor intensidad. Entre los miembros del equipo se respiraba un ambiente tranquilo y seguro, y nada hacía presagiar lo que sucedió a continuación (ver testimonio en Anejo II). Entorno a las 17:40 las llamas se intensificaron y cinco minutos después el grupo tuvo que dar media vuelta, dado que les habían cortado el paso. La intensidad del incendio fue creciendo de forma exponencial (ver Imagen 3, Anejo III) y el grupo emprendió una huida precipitada hacia la zona superior de la cresta occidental del barranco por una ladera cuya pendiente media ronda el 50%. Mientras que el capataz del grupo (Wagner Dodge) realizó una quema de ensanche o “fuego de fuga” improvisado, el resto intentaron pasar al otro lado de la cresta. Sólo dos lo consiguieron y junto a W. Dodge fueron los únicos supervivientes.

Al parecer, fuertes corrientes descendentes de aire provocadas por una pequeña tormenta local dirigieron el incendio desde la cresta oriental hacia el fondo del barranco, con mayor carga vegetal. Según se extrae del informe de Rothermel (1993), existían altas densidades de combustible muerto con muy bajos contenidos en humedad. Aunque los vientos eran superiores a los 40 km/h, se estimó que su intensidad bajaba de los 10 km/h a la altura media de llama. Cuando el incendio se situaba en el fondo del barranco, las velocidades de avance fueron lentas y no superaban los 3 km/h en las copas (velocidad 5 veces mayor que la de superficie). El incendio se intensificó al llegar a la zona herbácea de mayor pendiente, alcanzando velocidades en su fase inicial de unos 8 km/h mientras el grupo se encontraba en plena huida. Tuvieron que deshacerse de sus equipos para poder correr más rápido, pero las llamas se aceleraron y tuvieron una media de 15 km/h en los minutos del atrapamiento, además de alcanzar los 1000°C (Rothermel, 1993). De este conjunto de datos se puede deducir que un frente de aproximadamente 500 metros de ancho calcinó más de 100 hectáreas en menos de 10 minutos.

DISCUSIÓN

En el caso del Mann Gulch Fire se puede observar un comportamiento sorpresivo del fuego difícil de prever, incluso con el nivel de conocimientos de este fenómeno en la actualidad. Los bomberos paracaidistas eran uno de los cuerpos con mejor formación en el combate de incendios forestales, y aun así no detectaron el peligro hasta que estuvo prácticamente encima suyo, debido a que el fuego tuvo un comportamiento calmado (velocidades máximas de avance en copas de 3 km/h) instantes antes del fenómeno. Esta calma pudo evitar que se disipasen los gases emitidos por el incendio y se acumulasen en el barranco.

Por otro lado, la gran aceleración que tuvieron las llamas se pretende explicar por el cambio de modelo de combustible: de un bosque denso y con matorral a una zona herbácea con algunos pies dispersos. La primera zona pudo intensificar el fuego debido a las altas cargas de vegetación, y estas llamas más poderosas encontraron un fácil camino de propagación debido a la alta combustibilidad de las herbáceas y a las pronunciadas pendientes de la ladera. Sin embargo, quizás estos elementos no sean suficientes para describir un frente que avanza a más de 15 km/h de media. Debido a que el fuego tiene un comportamiento errático sujeto a multitud de factores, no se puede afirmar que esta velocidad fuese homogénea a lo largo de un kilómetro y medio. Debió sufrir aceleraciones y desaceleraciones que en su conjunto den lugar a esa media. Esta conclusión se puede relacionar con el testimonio de W. Dodge (ver Anejo II), quien afirma que en su huida percibían fuertes rachas de viento combinadas con momentos de calma absoluta. Quizás estas aceleraciones y grandes oscilaciones de viento se expliquen mediante diversas deflagraciones de acumulaciones de gases inflamables, que se sucedieron de forma encadenada a lo largo del barranco.

Finalmente, resaltar los aspectos meteorológicos. En el momento en que se produjo el fenómeno (última hora de la tarde), las condiciones de humedad (aumento) y temperatura (descenso) habían mejorado considerablemente, lo cual es un tanto contradictorio si se pretende relacionar la aceleración del frente con las condiciones meteorológicas presentes. Sin embargo, sí se puede explicar este comportamiento extremo de las llamas mediante acumulaciones de gases inflamables que deflagran al contacto con el fuego. En cuanto al viento, las velocidades detectadas en el barranco de Mann durante el suceso fueron de mayor intensidad que las medidas en sus alrededores. Además, es muy destacable la formación de una pequeña tormenta local en el periodo de máximo desarrollo de las llamas, la cual se puede relacionar con el propio incendio. Esta tormenta pudo tener gran relevancia a la hora de confinar los gases inflamables en el barranco y de acelerar los vientos locales de valle.

5.1.2. *Millares, 1994*

El verano de 1994 siempre será recordado en la Comunidad Valenciana y, en general, en todo el país por ser el peor de la historia reciente en cuanto a incendios forestales se refiere. Uno de los más trágicos fue el declarado en Millares el 4 de julio. La causa directa, según fuentes oficiales, fue un rayo que cayó durante una de las muchas “tormentas secas” que tuvieron lugar en esas fechas. A finales de ese día, las llamas se aceleraron y el peligro comenzó a acechar a la pequeña localidad valenciana. La intensidad fue creciendo a lo largo de la mañana siguiente, pero las fatales noticias llegaron por la tarde. Se había perdido el contacto con grupo de brigadistas que había acudido a combatir las llamas, y los peores presagios se confirmaron por la noche: cinco brigadistas y un concejal habían fallecido debido a un atrapamiento. Otros dos se encontraban gravemente heridos, y lamentablemente perdieron la vida los días posteriores en el hospital.

A mediodía del día 5 se decidió emplear parte de los pocos recursos disponibles en frenar el avance de las llamas hacia la CV-580 y un grupo de efectivos fue enviado a la zona. Se adentraron por la pista forestal que se desvía de la carretera para atacar las llamas hasta una zona a unos 5 kilómetros del desvío, donde perecieron. Los datos de lo allí sucedido son muy escasos. No existen informes oficiales disponibles ni declaraciones públicas de los supervivientes, y no se creó una comisión de investigación a raíz de los sucesos. Las únicas evidencias de lo ocurrido fueron los restos que allí quedaron. Los dos vehículos a bordo de los cuales viajaba el grupo (un camión motobomba y un Land Rover) estaban completamente calcinados, distaban entre sí no más de 300 metros y estaban ubicados en dirección Millares (ver Imagen 4, Anejo III), lo que hace suponer que su intención era de abandonar la posición que habían tomado y retirarse.

Se muestra a continuación una ortofoto del lugar y, sobre ella, una pequeña representación del fenómeno:



Figura 3. Ortofoto de la zona respecto a Millares (parte superior derecha) vista desde dirección este. En rojo, el lugar de la tragedia. En amarillo, el área comprendida por la deflagración.

Según relatan los medios de comunicación, el fuego se encontraba en el fondo del valle hasta que se produjo un giro inesperado en la dirección del viento que lo hizo ascender por la ladera. Debido a una pendiente muy pronunciada (un 40% de media y un último tramo rocoso prácticamente vertical) y a la sequedad del combustible vegetal las llamas ascendieron a una velocidad vertiginosa y en pocos instantes coronaron la cadena montañosa, sorprendiendo al grupo que allí se encontraba. Todo sucedió tan rápido que, pese a ambos vehículos contar con emisora, ningún miembro del grupo advirtió de lo que allí estaba sucediendo. En primera instancia, seis murieron por asfixia y tres sufrieron graves heridas. Los cuerpos sin vida se encontraban desperdigados alrededor de los vehículos, cada uno indicando una dirección diferente de una huida que no pudieron completar.

DISCUSIÓN

Hay diversas evidencias de que el fenómeno que allí tuvo lugar fue una **deflagración forestal (DF)**. En primer lugar, el tiempo de reacción del que dispuso el equipo para huir fue realmente corto. Prueba de ello es la ubicación de los coches (ver imagen 4, Anejo III) y la disposición de los cuerpos. Además, ambos vehículos contaban con emisora pero ninguno de ellos dio la voz de alarma, seguramente porque tuvieron pocos segundos para reaccionar y buscar una zona segura.

Por otro lado, el Land Rover (ver Imagen 5, Anejo III) muestra la parte delantera mucho más calcinada que la trasera, donde aún se conservan los neumáticos. Este hecho refleja dos realidades: la primera, el sentido que tuvo la deflagración. Afectó al vehículo de delante hacia atrás corroborando que las llamas provinieron desde la ladera antes mencionada, ya que como se ve apunta en esa dirección. La segunda que el Land Rover estuvo sometido a altas temperaturas, pero en un breve periodo de tiempo. El caucho es un material que se deshace con facilidad cuando está sometido a un foco continuo de fuego, aunque este sea de baja intensidad.

Estos factores, unidos a una topografía y carga de combustible propensos para estos fenómenos, denotan un fuego extremadamente rápido y de gran intensidad, por lo que se puede deducir que se produjo una **deflagración forestal (DF)** en toda la ladera que alcanzó a las víctimas.

Por último, cabe mencionar un aspecto relevante del suceso. Como se menciona en el análisis topográfico (ver Anejo I), antes de alcanzar a las víctimas el fuego superó un escollo rocoso

prácticamente vertical situado en la parte más superior de la ladera por la que ascendió la deflagración. Sus medidas son de 40 metros de altura y una pendiente media del 200%, aproximadamente. Por otro lado, la distancia entre el final de esta pared vertical y el Land Rover afectado es de unos 60 metros, con una carga de combustible baja y discontinua. Teniendo en cuenta estos datos cabe preguntarse: ¿Cómo pudo el fuego salvar estos importantes escollos y adaptarse a un ángulo de 90 grados en el terreno, en lugar de continuar con la ascensión vertical propia de la inercia de la pendiente y la deflagración? Este hecho puede explicarse con la deflagración de una acumulación de gases que han llegado al LII. Otra explicación es que pudo ser un remolino propio de las turbulencias que se generan cuando un fuego corona una cresta, pero teniendo en cuenta lo sorpresivo e intenso que fue el fuego, no se explica suficientemente un fenómeno tan extremo. y otras explicaciones se ajusten más a lo sucedido. Dicha acumulación pudo formarse a raíz de una inversión térmica o una cizalladura del viento a una altura semejante a la del collado, y el aire al no poder ascender viró paralelo al terreno, atrapando a los brigadistas.

5.1.3. Alájar, 1999

El municipio de Alájar se sitúa en la provincia de Huelva, en una zona montañosa a 574 metros sobre el nivel del mar. En junio de 1999 se declaró un incendio en este término municipal que tuvo fatídicas consecuencias: cuatro bomberos fallecieron al ser alcanzados por el fuego. Junto al de Riba de Saelices, son los dos incidentes mortales sucedidos en España cuya causa ha sido determinada como un *fuego eruptivo*. El informe oficial se puede encontrar en la página del Ministerio de Medio Ambiente.

Entorno a las 13:10 horas del miércoles 30 de junio se declara un incendio de baja intensidad en el paraje de “los Madroñeros”, al oeste de Alájar. En primera instancia, una brigada de ocho bomberos del INFOCA son enviados para atacar el fuego. Según afirma Rodríguez (1999), quien suscribe el informe oficial, el fuego en su primera fase es de poca intensidad y su velocidad de propagación no supera los 2 metros por minuto. El avance se reduce sólo a la cabeza del incendio y no se extiende por los flancos o la cola. Esta situación se mantiene una media hora hasta llegar a la zona de transición con el modelo Mr de combustible, resultante de la combinación del 4 y el 7 (modelos de Rothermel). A continuación se muestra una imagen del lugar junto a la representación de las fases del incendio:

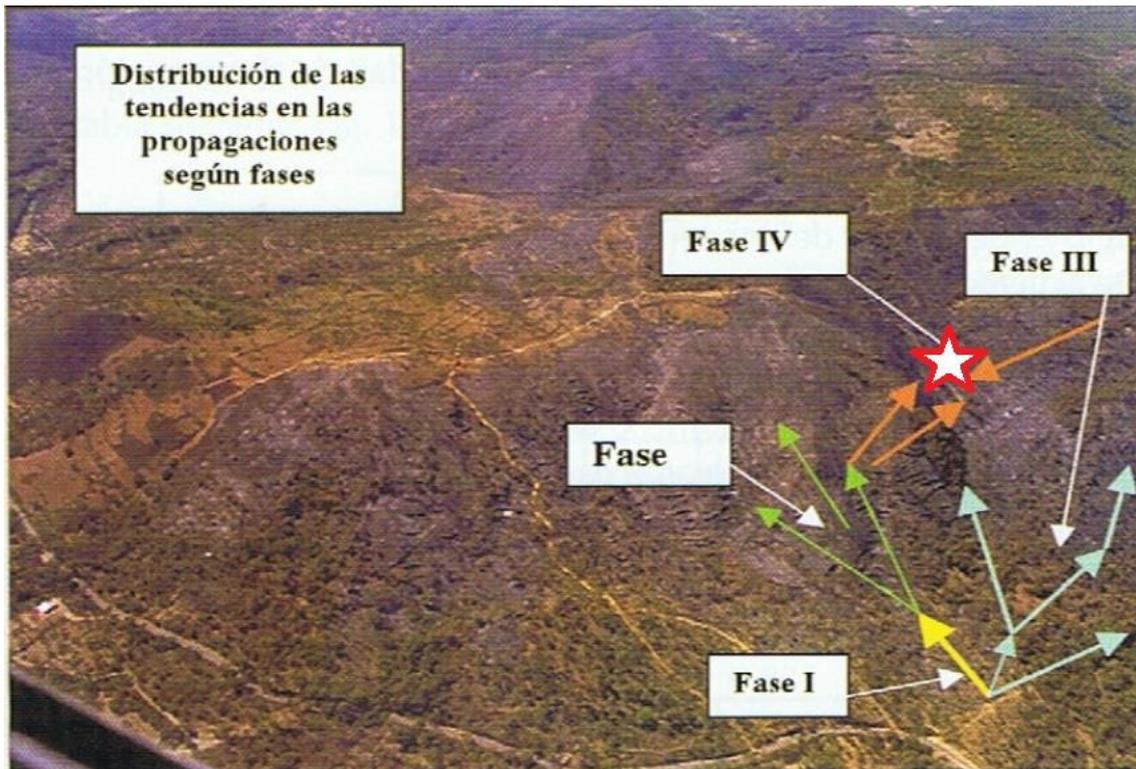


Figura 4. Las cuatro fases del incendio, representadas sobre una fotografía del lugar tomada días después. En rojo, el lugar del atrapamiento (Rodríguez, 1999).

Entorno a las 13:35 la cabeza del incendio penetra en esta zona, siendo el comienzo de la segunda fase. El cambio a un modelo de combustible con mayor carga y el aumento considerable de la pendiente (alrededor del 40%) provoca una intensificación y aceleración del frente, que comienza a ascender por el flanco izquierdo del barranco en el que se produjo el siniestro. Aquí se alcanzan velocidades de propagación de hasta 13.8 m/min y longitudes de llama de unos 5 metros, provocando que el fuego ascendiese a las copas y se propagase principalmente por ellas (Rodríguez, 1999). Es entonces cuando los brigadistas se dividen en dos cuadrillas de cuatro hombres, con el objetivo de ascender al cortafuegos superior y realizar un ataque directo desde allí. El primer grupo ascendió por la parte izquierda del frente, y el segundo, por el barranco donde posteriormente sufriría el atrapamiento.

Se fija como hora de inicio de la tercera fase las 13:47 horas. “En la etapa inicial de esta fase se produce el detonante de la conflagración responsable de la propagación de carácter explosivo. De una parte se produce la descompensación de la inversión térmica (...) que produce una reorganización de las capas existentes sobre el fuego, motivando ello una recarga de oxígeno en la combustión, facilitando una propagación súbita y acelerada” (Rodríguez, 1999). Según el informe, la cuarta y última fase tuvo una duración de 3 minutos (13:57 – 14:00). Los dos frentes situados a ambos lados del barranco, al ser centros de bajas presiones, creaban corrientes de succión que hicieron que se aproximasen, para finalmente unirse en el barranco conformando un único frente. Las llamas ascendieron rápidamente, alcanzaron fatídicamente a los bomberos y coronaron las zonas superiores. Se perdió la comunicación por radio y, tras dos horas de búsqueda, se encontraron los cuatro cuerpos sin vida, completamente calcinados, en un refugio forestal del cual sólo quedaban en pie las paredes

DISCUSIÓN

El caso de Alájar cuenta con todos los elementos que pueden dar lugar a una **deflagración forestal (DF)**: un barranco encajonado y de fuertes pendientes donde se pueden acumular gases

del incendio, con vientos recorriéndolo en dirección ascendente y altas cargas de combustible vegetal. Sin embargo, el informe oficial no muestra datos (velocidades de avance, temperatura, energía liberada, etc.) acerca del comportamiento del fuego en la cuarta fase. Quizás pudo ser un comportamiento previsible debido a la complejidad del escenario, en cuyo caso su velocidad de avance también superaría la velocidad de huida de los brigadistas. En contraposición a esto, Rodríguez (1999) concluye en diversas ocasiones que el fuego tuvo comportamientos *explosivos* o *deflagrativos*. Del informe se puede extraer, a medida macroscópica, que una superficie cercana a las 10 hectáreas ardió en cuestión de 3 minutos, con una velocidad media de avance que ronda los 10 km/h. Este hecho sólo puede explicarse si existe en el barranco una acumulación de gases inflamables (CO, H, CH₄) que combustionen de manera súbita cuando alcanzan concentraciones superiores al LII.

Por otro lado, la posición de los bomberos era muy desfavorable, exponiéndose a un riesgo elevado e innecesario. Puede considerarse que el plan de combatir el incendio desde el cortafuegos superior es adecuado, pero ascender hasta él por el fondo de un barranco con fuertes pendientes, gran carga de combustible vegetal y las llamas creciendo en intensidad próximas al lugar, fue sin duda un gravísimo error. Los cuatro bomberos debieron ascender por el flanco izquierdo del incendio al igual que la otra brigada presente, siguiendo un trayecto mucho más seguro y con mejor visibilidad. El factor humano tuvo gran influencia en los hechos sucedidos, y por ello los errores cometidos en este caso deben de servir de enseñanza para evitar que se repitan.

5.1.4. Riba de Saelices, 2005

El término municipal de Riba de Saelices se encuentra prácticamente en el centro de la península Ibérica, en la provincia de Guadalajara, enclavado en la Sierra del Ducado. En estos parajes, el 16 de julio del año 2005 se inició un incendio forestal que según datos oficiales arrasó con 12.874 hectáreas y que acabó trágicamente con la vida de 11 brigadistas medioambientales, debido supuestamente a una *deflagración forestal (DF)* que los sorprendió. Al caer la tarde del domingo 17, además de dos grandes frentes de fuego, un tercero se había generado cerca de Santa María del Espino. El retén de Cogolludo (formado por 11 miembros) y un camión autobomba son movilizados para atacar este nuevo frente. El objetivo del equipo consistía en frenar el avance del fuego aprovechando que éste iba a coronar un cerro y, por tanto, a disminuir considerablemente su velocidad por el cambio de pendiente y por la reducida vegetación presente en las partes altas (ver Imagen 6, Anejo III).

Sin que se percatasen de ello, el frente se había dividido en dos: el primero lo combatían a escasos metros delante de ellos y, el segundo, los estaba rodeando como se puede ver inicialmente en la parte derecha de la Imagen 7 (ver Anejo III). Cuando detectaron el peligro, entorno a las 17:20 horas, se dio la orden de retirada y todos montaron en sus respectivos vehículos tratando de huir del lugar lo más rápido posible. Jesús Abad (conductor de la autobomba y único superviviente) tuvo la suerte de que su camión se precipitó por el barranco. Consiguió saltar en marcha y correr a refugiarse tras la motobomba que había quedado estacionada en el lugar donde segundos antes estaban realizando las labores de extinción. El hecho de que se retrasase su huida unos cuantos segundos evitó que se posicionase en plena deflagración, quedando en un flanco de esta, a diferencia del resto de sus compañeros. Éstos consiguieron recorrer apenas unos cientos de metros hasta que el fuego los arrasó por completo. El testimonio de Jesús Abad refleja lo sorpresivo e intenso del fenómeno: “*Vino a por nosotros. Porque estaba muy lejos, muy lejos (...) Y la siguiente vez que volvimos la cabeza asomaban ya las llamas (...) y ya no nos dio tiempo, ya nos enganchó, era un... una especie, como si fuera una ola gigante, pero en fuego, muy grande*” (ver testimonio completo en Anejo II). En la siguiente fotografía, tomada el día posterior a los hechos, se muestran estas ubicaciones:



Figura 5. Fotografía tomada el día posterior a la tragedia. En rojo, el camión autobomba tras el cual se refugió Jesús Abad. En negro, el emplazamiento del resto de vehículos. En amarillo, el área comprendida por la deflagración.

Tras el suceso, la Junta de Castilla la Mancha creó una comisión de investigación para esclarecer las causas. Vicent Pons, reconocido perito en incendios, fue el encargado de realizar el informe oficial y sus pesquisas se encuentran publicadas en su libro “*L’explosió de la muntanya*”. A partir de la ubicación de los vehículos respecto al lugar donde comenzaron la huida (y donde consiguió sobrevivir J. Abad), y de la distancia que recorrió el fuego desde que lo detectaron, el equipo de Pons (2007) trató de reconstruir lo sucedido y establecer la velocidad de avance de las llamas. Su razonamiento, aparentemente acertado, es el siguiente: según el testimonio in situ del único superviviente detectaron que el fuego comenzaba a ascender por la ladera a una distancia menor a un kilómetro. Suponiendo el caso más desfavorable, el fuego se encontraba a 564 metros de la pista forestal. Por otro lado, de nuevo tomando los casos más desfavorables y según las simulaciones, la distancia que recorrieron los vehículos hasta sufrir el impacto de las llamas no pudo ser en más de 19 segundos. Hay que tener en cuenta que el material de extinción que portaban seguía en el lugar donde plantearon la defensa, con las mangueras sin recoger. Este hecho, sumado a que ni siquiera dieron aviso por radio y al testimonio de J. Abad, dan a entender que abandonaron el puesto lo más rápido que les fue posible una vez detectaron el peligro.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se estableció que la velocidad de avance de las llamas había tenido una media de 113 km/h a lo largo de toda la ladera, hasta alcanzarlos. Tras el análisis de diversas piezas de los vehículos en la Universitat Politècnica de València, se descubrió que se habían alcanzado temperaturas de entre 850°C y 1060°C (Pons, 2007).

Otro de los datos relevantes que se puede extraer del libro de Pons (2007) es el estado de uno de los todoterrenos (ver Imagen 8). Las mochilas extintoras presentes en el techo están prácticamente intactas, lo que es extraño, debido a las altas temperaturas registradas en las piezas metálicas. La única explicación posible es que el tiempo de exposición a estas altas temperaturas fuese muy corto, siendo de mayor intensidad en las partes bajas de los vehículos.

DISCUSIÓN

La única explicación posible al suceso de Riba de Saelices parece ser la de un fuego que avance a tal intensidad y velocidad que supere cualquier protocolo: una *deflagración forestal (DF)*. Y son varias las evidencias empíricas y lógicas que lo demuestran:

- En primer lugar, el testimonio directo de Jesús Abad, de gran valor ya que es una de las pocas personas que ha conseguido sobrevivir a un fenómeno de este calibre y relatar lo ocurrido. Asegura que el fuego estaba a gran distancia y que todo sucedió tan rápido que fue imposible evitarlo. Lo describe como “*una ola gigante, pero en fuego*”, dejando claro que era de grandes proporciones y que se trataba de algo que no había visto jamás, no era algo reconocible. Si se plantea que una alfombra de gases de incendio se acumuló en la ladera hasta alcanzar el LII, el fenómeno queda claramente explicado. También, existe una gran cantidad de factores que demuestran la espontaneidad del suceso (no se comunicaron por radio, abandonaron los equipos de extinción, etc.), además del testimonio del único superviviente.

- En segundo lugar, está el trabajo realizado por Pons y su equipo, apoyándose en la declaración de Jesús Abad. Indicó la ubicación del fuego cuando se dio la orden de huida y, mediante unos sencillos cálculos, se estimó que su velocidad de avance tuvo una media de 113 km/h a lo largo de la ladera. La velocidad de esta deflagración se sale por completo de los límites que estudian los bomberos y basados en los cuales realizan sus planes de actuación. También lo apoyan las pruebas realizadas a las piezas de los vehículos, que determinaron que alcanzaron temperaturas muy altas y que el tiempo de exposición a las mismas fue muy reducido.

- Como se puede observar, la vegetación de ambos flancos de la ladera no ardió (ver Imagen 9, Anejo III). Tampoco lo hizo el camión tras el que se refugió Jesús Abad, sólo la cabina. Esto se puede traducir en que el fenómeno tuvo unos claros límites definidos, dentro de los cuales se produjo la deflagración. Este parece ser un patrón común con otros casos analizados, y se puede relacionar directamente con las características del fenómeno.

Cabe apuntar que el personal allí presente, y que perdió la vida, contaba con una gran cualificación y años de experiencia. Esto plantea varias cuestiones: ¿Cómo pudo verse encerrado por las llamas un grupo de grandes profesionales de manera tan rápida y fortuita? ¿Cómo es posible que no detectaran el peligro con la suficiente antelación como para poder huir con vida del lugar? ¿Por qué no avisaron por radio de lo que allí estaba ocurriendo y solicitaron ayuda? La respuesta es sencilla, no estaban preparados y formados ante un fenómeno de acumulación de gases y combustión súbita de los mismos, con intensidades extremas. De ser así, nunca se habrían enfrentado a las llamas desde esa posición, la cual resulta inexplicable. Los propios miembros del equipo eran conscientes de que se encontraban en una situación desfavorable la cual les superaba (ver testimonio en Anejo II). Una vez más, el factor humano y el desconocimiento jugó un papel clave.

5.1.5. Kornat, 2007

Las islas de Kornati, pertenecientes a Croacia, se encuentran en el mar Adriático. La isla más grande del archipiélago es la de Kornat. Ocupa un área de más de 32 kilómetros cuadrados y cuenta con algún pequeño núcleo de varias casas con pequeñas zonas de amarre. Fue en esta isla donde en 2007 se produjo el incendio forestal que acabó con la vida de 12 bomberos.

Hasta 40 bomberos fueron desplazados en helicóptero a la zona para tratar de extinguir los diversos frentes que se declararon a media mañana en el este de la isla, y se dividieron en varias localizaciones. El último grupo que desembarcó estaba formado por 13 miembros y se situó en la

parte más occidental. Su objetivo era proteger de las llamas un reducido número de viviendas al noroeste y para ello debían combatir el frente de fuego (que se acercaba desde el sur) desde la zona más elevada.

El gran problema de este grupo de bomberos es que no disponían del elemento más importante en la extinción: el agua. Portaban mochilas extintoras vacías que debían rellenar de una “balsa” de 2000 litros de capacidad que un helicóptero había depositado en la ladera sur del monte Veli (ver Imagen 10, Anejo III). Según narra Frane Lucic, único superviviente de la tragedia, el piloto del helicóptero trató de aterrizar varias veces en esta zona y debido a los fuertes vientos no pudo completar la maniobra (ver testimonio en Anejo II). Poco después, lo consiguió con éxito en la vertiente opuesta del barranco de Sipnate. Cabe destacar que la vegetación del lugar es realmente pobre. Se trata de un terreno rocoso cubierto por herbáceas de bajo porte, en su mayoría *Stipa bromoides* y *Stipa pennata* (Skracic, 2003). La cobertura vegetal estaba entre el 45% y el 55%, y se trataba de un enclave de pendientes acusadas que rondaban el 30% de media, con un 45% como valor máximo (Stipanicev, 2008).

En este lugar se produjo el despliegue en tierra entorno a las 14:45 horas, a una distancia de la balsa de agua de poco más de un kilómetro. Las condiciones del escenario no hacían presagiar lo que iba a suceder poco después. Después de descargar el equipo del helicóptero y distribuir mangueras, bombas y demás elementos, el grupo se preparó para marchar hacia la ubicación del agua. El fuego era de muy baja intensidad (ver Imagen 11, Anejo III) y decidieron ir paralelos a las curvas de nivel, cruzando el barranco de lado a lado. El grupo de 13 bomberos sobrepasó la zona más convexa y cambió de vertiente. Fue unos instantes después cuando deflagró gran parte del barranco, en torno a las 15:20 horas. Lucic lo describe de la siguiente manera: *“el fuego y el humo comenzaron de repente a tal velocidad que no pudimos escapar, a pesar de que intentamos correr. Nos invadió un calor terrible y simplemente nos quemó (...) El fuego y el estallido de calor duraron unos 15 segundos y simplemente nos pasó por encima. No hubo tiempo para reaccionar (...) El fuego provino del barranco situado al sur. El sonido que emitía era muy parecido al de un tren en movimiento”* (Nacional.hr, 2007). Los hechos se pueden ver representados en la siguiente imagen:

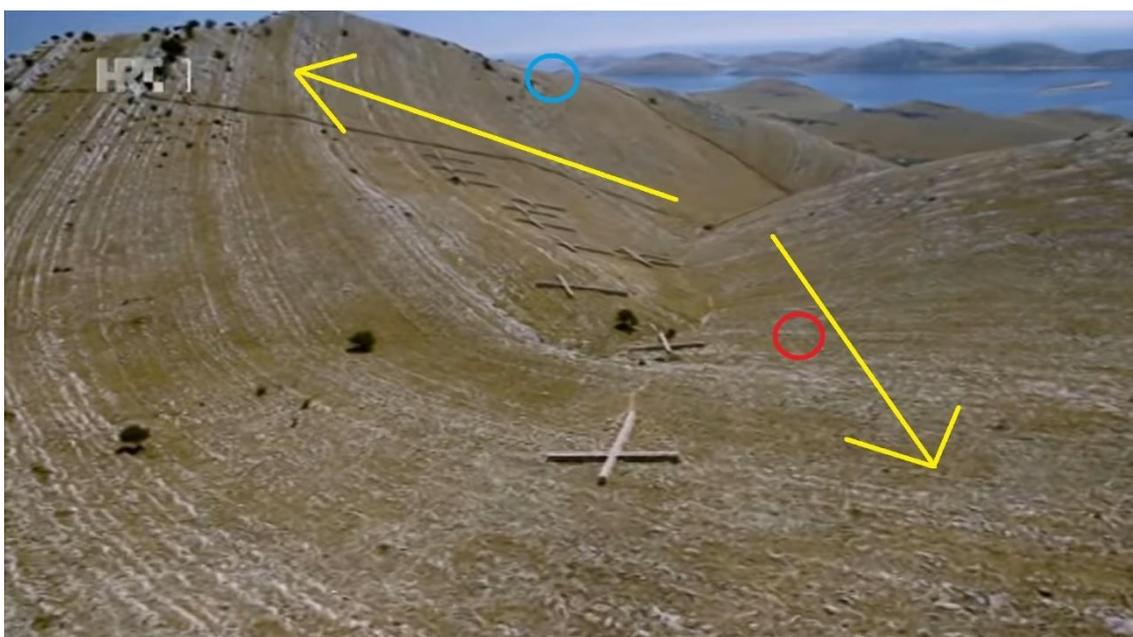


Figura 6. Toma aérea del lugar. Se representa la deflagración (amarillo), la balsa de agua (azul), la ubicación de Frane Lucic (rojo) y la distribución de los fallecidos (cruces de piedra).

Desde el momento del incidente pasaron tres largas horas hasta que llegaron los equipos de rescate. A su llegada, el balance fue el siguiente: 6 bomberos muertos y 7 gravemente heridos. Lamentablemente, sólo Frane Lucic consiguió sobrevivir a las graves quemaduras en el hospital. Aun a día de hoy existen tres teorías que tratan de explicar lo sucedido en el barranco de Sipnate: la primera es la teoría del *fuego eruptivo*, la cual fue la versión oficial. En segundo lugar, se habla de una supuesta fuga de combustible del helicóptero sobre el barranco, el cual se inflamó a la llegada de las llamas y atrapó al equipo. Por último, cabe destacar la teoría de una supuesta explosión de una bomba de gran potencia, ya que las islas de Kornati fueron objeto de ensayos militares durante la guerra de Kosovo en 1999 (Net.hr, 2008).

Dos hallazgos de los investigadores en el escenario de la tragedia pueden ser relevantes a la hora de explicar el fenómeno que tuvo lugar. El primero es que los tres pequeños árboles que hay en el barranco muestran que su parte aérea está sin arder, únicamente disecadas por el calor (Ver Imagen 12, Anejo III). Esto marca la altura que tuvo la deflagración, cercana a los dos metros. Por otro lado, una de las laderas no había ardido y mantenía toda su vegetación, zona muy próxima a donde fueron alcanzados los bomberos (ver Imagen 13, Anejo III).

DISCUSIÓN

La tragedia de Kornat es uno de los más claros casos registrados de una ***deflagración forestal (DF)***. Sin embargo, arroja una gran cantidad de dudas y cuestiones acerca del desarrollo del fenómeno, el comportamiento de éste y las condiciones bajo las cuales se produce. Es un caso singular entre los analizados en el presente estudio dado que sus características, principalmente de combustible vegetal, nada tienen que ver con el resto de los expuestos.

La situación se puede resumir de la siguiente forma: un frente de fuego que avanza por una superficie con una cobertura vegetal del 50%, y cuyas especies se componen de herbáceas cuya altura no supera los 50 centímetros, arrasa con un grupo de 13 bomberos, acabando con seis vidas en el acto y otras tantas los días posteriores. Resulta difícil de creer que con estas condiciones de combustible vegetal se produjese tal tragedia. En todas las corrientes se menciona la necesidad de altas densidades de combustible para que se produzcan estas deflagraciones. Según las simulaciones realizadas por Stipanicev (2008) y su equipo, las variaciones locales de presión atmosférica causadas por la diferencia de temperatura entre las masas de aire, provocaron que en las capas más bajas se produjese una estratificación que evitaba corrientes ascendentes. Este efecto pudo provocar la acumulación de gases inflamables en la superficie del barranco, y cuando se alcanzó la concentración necesaria (LII), el calor emitido por las llamas provocó la deflagración. La topografía también debe valorarse como un factor clave a la hora de entender cómo se acumuló esa nube de gases, pero por sí sola no puede explicar el fenómeno en su totalidad dado que se trataba de una superficie abierta a la circulación de los vientos. Se considera que este caso demuestra, más que ningún otro, el papel clave que juegan los movimientos de aire a diferentes temperaturas que crea el incendio, aunque sea de baja intensidad. Estos movimientos crean turbulencias, que pueden desembocar en estratificaciones y evitar corrientes de aire ascendentes (Stipanicev, 2008). Es entonces cuando se confinan los gases inflamables, y si se llega a las concentraciones adecuadas (LII), se producen estas deflagraciones.

Por otro lado, el testimonio del único superviviente, Frane Lucic, es esencial para comprender el comportamiento del fenómeno que allí ocurrió. Según él, el equipo no advirtió problema alguno y recalca la espontaneidad del suceso. No fue una situación en la que el fuego los rodease poco a poco, o que comenzasen a percibir una intensificación progresiva. Tampoco menciona que la nube de humo los asfixiase parcialmente y les hiciese perder el sentido, sino que afirma que sufrieron un gran calor repentino de forma espontánea. Una de las frases más interesantes de su declaración es la siguiente: *“El fuego y el estallido de calor duraron unos 15 segundos y simplemente nos pasó por encima. No hubo tiempo para reaccionar”*. Es obvio que

el fenómeno fue de gran intensidad y en un espacio corto de tiempo. Las teorías alternativas (fuga de queroseno y bomba de la OTAN) reflejan que lo allí ocurrido tuvo grandes proporciones.

Además, el comportamiento del incendio en esa zona tiene varias características interesantes. El hecho de que la ladera este del Glavica no ardiese (ver Anejo I), teniendo una gran pendiente, resulta un tanto extraño. Este hecho muestra que el fuego se dirigió a gran velocidad hacia una ubicación concreta (donde se habían acumulado los gases), en la cual se encontraban los bomberos en ese momento. Además, las llamas no debieron tener una altura mayor a los dos metros dado el análisis del único árbol presente en la zona (ver Anejo 1). Por último, hay que destacar que el fuego en el barranco de Sipnate fue de mucha más intensidad que, por ejemplo, en la ladera del monte Veli situada a menos de un kilómetro al este y con pendientes más acusadas (ver Imagen 10, Anejo III). La balsa de agua está sin arder y en la parte superior existe vegetación que prácticamente no fue afectada. En el documental de HRTV1 (2015) se muestran diversas imágenes y filmaciones del incendio de ese día. Se observa una intensidad muy baja de las llamas en todas ellas, incluso cuando recorren escenarios que topográficamente son más propensos a producir fuegos intensos. Esto apoya que el suceso del barranco de Sipnate fue algo fuera de lo común y de grandes proporciones.

5.1.6. *Horta de Sant Joan, 2009*

En la noche del 20 de julio se declara un incendio en el macizo de Els Ports, concretamente en Horta de Sant Joan (Tarragona). Se produce un gran despliegue de medios y a primera hora de la mañana la situación parecía controlada. Sin embargo, durante el avance de la mañana las condiciones meteorológicas comenzaban a empeorar. Había gran cantidad de puntos calientes (ver Imagen 14, Anejo III), y al no poder avanzar bien a las zonas de matorral, se decidió proteger los flancos y apagar los puntos calientes presentes en el perímetro. En el flanco izquierdo se posicionan GRAF Lleida (grupo afectado por la deflagración) y GRAF Barcelona, además de las BRIF. En torno a las 14:00 horas, fuertes rachas de viento (con picos de incluso 65 km/h) inciden en el lugar y provocan diversos puntos de reactivación simultánea, que en pocos instantes adquieren grandes dimensiones. La situación vivida en ese momento se registra como una de las más peligrosas en la historia de los bomberos catalanes. Hasta 70 personas quedan atrapadas en zonas de vegetación densa y altas pendientes (ver Anejo I), con varias vías de escape cortadas. Los medios aéreos deben retirarse momentáneamente debido a las fuertes turbulencias que se habían generado sobre el incendio.

Ante la imposibilidad de ser evacuados, como lo fueron las BRIF, los bomberos de GRAF Barcelona (unos 20 efectivos) y GRAF Lleida (6 efectivos) quedaron atrapados en una zona muy peligrosa, bajo una alta pared de piedra (ver Imagen 15, Anejo III). Ambos grupos distaban unos 80 metros en línea recta, y decidieron realizar un apeo de árboles y obtener así un claro en el que protegerse en caso de la llegada del fuego. Se puede observar la situación, además de los efectos del fuego, en la siguiente imagen:

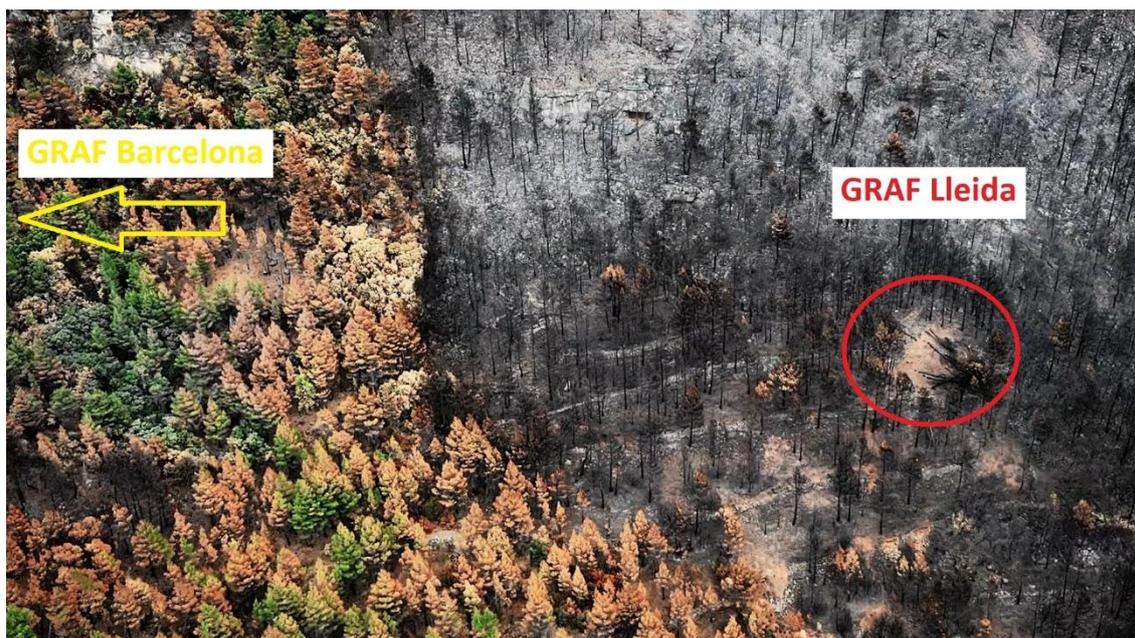


Figura 7. Imagen tomada días después de la tragedia. Se puede observar la posición de los bomberos GRAF (TV3, 2017).

La zona se quemó de manera incompleta durante la noche, pero aún quedaba carga vegetal a su alrededor. Un foco se había reactivado bajo ellos e iba ganando intensidad, mientras que por el oeste también se acercaba un nuevo frente de fuego. El lugar comenzó a llenarse de gases y humo ante el aproximamiento de las llamas (ver Imagen 16, Anejo III) y minutos después, alrededor de las 15:20 horas, se produjo una **deflagración forestal (DF)** que arrasó con el grupo de GRAF Lleida. De los 6 miembros solo logró sobrevivir Josep Pallás, con un 70% de su cuerpo quemado y graves secuelas. Narra así lo sucedido (ver testimonio completo en Anejo II): “*Si evidentemente hubiésemos sabido que venía aquello... no éramos conscientes de lo que venía, no... tan bestial no (...)* La sensación de este ruido de fatalidad, de tren descarrilado, de algo brutal que viene sobre ti como a destruirte. Lo escuchamos cuando estábamos dentro de la *fireshelter (...)* porque lo que se oía era bestial (...) me puse de pie, vi una pared de fuego inmensa a mi derecha (mirando a las rocas) y obviamente salí disparado hacia el otro costado” (TV3, 2017). Según las reconstrucciones, el foco que se había generado bajo los GRAF fue succionado por el contraviento formado a raíz de la topografía del lugar, principalmente por la presencia de la gran pared rocosa. Este fuego avanzó en contra de la dirección del viento y del incendio general, debido a esta succión, y se dirigió hacia la posición de las víctimas con gran intensidad (GRAF, 2010).

DISCUSIÓN

Son varias las evidencias de que lo sucedido en Horta de Sant Joan fue una **deflagración forestal (DF)**. Por un lado, los testimonios recogidos reflejan que fue un fenómeno de grandes proporciones y que se desarrolló en un corto espacio de tiempo. Los bomberos se metieron dentro de las *fireshelter*, que aguantan temperaturas de hasta 930°C con contacto de llama, y ni aun así consiguieron sobrevivir. Es una clara muestra de la gran intensidad del incendio, y más aun teniendo en cuenta que difícilmente pudo haber contacto directo del fuego con los bomberos debido al clareo que habían realizado. Se puede afirmar que la temperatura superó los 930°C (quizás más) en un pequeño claro sin combustible, y esto solo se puede explicar mediante una gran deflagración de gases que abarcara la zona. Además, que un foco secundario tan pequeño se convierta en una gran lengua de fuego de forma tan rápida se debe relacionar con una continua y prolongada acumulación de gases, provocada por la succión de los contravientos hacia esa ladera.

Prueba de ello es la Imagen 16 (ver Anejo III) y las diversas filmaciones recogidas (ver Anejo IV). Junto a la topografía del terreno, otros factores debieron contribuir al confinamiento de los gases inflamables. La inestabilidad atmosférica que existía en el lugar pudo provocar que altas presiones confinasen los gases del incendio en la ladera. Además, existía un dosel arbóreo denso en altura que también pudo jugar un papel clave a la hora de producir este confinamiento.

Junto a estas consideraciones, cabe analizar la información que arrojan las pruebas gráficas del lugar. En la Figura 7 se puede observar claramente el límite de la deflagración. Mientras que donde perecieron los bomberos se alcanzaron temperaturas superiores 930°C, sólo unos metros más hacia la izquierda los árboles conservan su follaje, algunos verdes y otros desecados por el calor. Al respecto, también cabe mencionar que Josep Pallás consiguió sobrevivir fuera de la *fireshelter* a pocos metros donde perecieron sus compañeros, lo que confirma el marcado gradiente de temperatura en la zona. Estas características son propias de una gran deflagración de gases con claros límites definidos, y es un hecho común en la mayoría de los casos analizados. Por otro lado, hay dos imágenes que pueden confirmar esta teoría. La primera (ver Imagen 17, Anejo III), por su posición en el escenario, parece ser una captura de parte de la deflagración que acabó con la vida de los 5 bomberos. La segunda (ver Imagen 18, Anejo III) fue tomada en el mismo incendio, pero en otra ubicación diferente. Muestra una deflagración de forma clara, donde un área entera está ardiendo de manera uniforme a altas intensidades, sin un gradiente de fuego que indique una dirección de avance.

Por último, cabe mencionar que de nuevo el factor humano tuvo relevancia, aunque menor que en otros casos. La posición en la que se situaron GRAF Lleida y GRAF Barcelona era demasiado peligrosa y susceptible de albergar una *deflagración forestal (DF)*, pero al quedar atrapados tampoco tuvieron demasiadas opciones. Se debe tener presente, en casos como este, que en cualquier momento se puede dar un fenómeno de estas características y hacer inútil cualquier defensa planteada por un equipo terrestre.

5.1.7. Torremanzanas, 2012

El municipio de Torremanzanas (o Torre de les Maçanes) se ubica en el interior de la provincia de Alicante, a casi 800 metros de altitud. El domingo 12 de agosto de 2012, antes de las 13:00 del mediodía, se declara un incendio un kilómetro al este del municipio. El fuego avanzó lentamente por una zona agrícola hasta llegar al inicio de una larga y pronunciada ladera, entorno a las 15:30 horas. Ante estos hechos se movilizan diversos efectivos tanto aéreos como terrestres. Se toma la decisión de enviar un convoy a realizar labores de defensa al cortafuegos de la Hedrera, situado en el flanco derecho del incendio. El convoy estaba conformando por un total de 20 personas. Para acceder a dicho cortafuegos debían recorrer el Camí de les Covetes, un estrecho camino asfaltado que cruzaba de manera perpendicular la ladera en la que tuvo lugar el incidente. Este grupo partió del puesto de mando avanzado (PMA) a las 16:20 horas de la tarde.

Las llamas, pese apenas avanzar, estaban generando gran cantidad de gases y calor que se iban acumulando en la ladera y precalentando las altas densidades de combustible. A la llegada del convoy al Camí de les Covetes, el fuego ya se había intensificado y alcanzaba alturas de llama de hasta 50 metros (ver Vídeo 4, Anejo IV). De repente, cuando el equipo se encontraba a mitad de trayecto, el vehículo de mando que iba en cabeza se detuvo en una peligrosa posición. Es entonces cuando los dos hombres al mando ordenan realizar un contrafuego en ese lugar, sin previa comunicación con el PMA, abandonando el plan inicial. Se observa esta situación en la siguiente imagen:



Figura 8. Bomberos realizando el contrafuego en el Camí de les Covetes, instantes antes de la deflagración.

Además de lo peligroso de la situación, la topografía del lugar aun lo era más: fuertes pendientes (entorno al 40% de media) y altas densidades de combustible (modelos 4 y 7 de Rothermel). Se detuvieron entorno a las 16:40 y sólo unos cinco minutos después se produjeron los fatídicos hechos. Uno de los brigadistas presentes describe que vieron pasar una espiral de llamas, como si fuera un “espíritu”, que se desplazó a toda velocidad paralela y horizontalmente por debajo de las copas de los pinos. Vieron una especie de bola de fuego o “pared de fuego” que envolvió todo produciendo un gran ruido, similar al de una explosión.

Al parecer, el tiempo de reacción fue muy rápido y la mayoría del equipo consiguió escapar prácticamente ileso. Dos bomberos murieron y otros tres resultaron gravemente heridos. Según fuentes oficiales, el fuego arrasó con toda la ladera en menos de seis minutos. Tomando la longitud de esta, la posición del fuego en el instante de la aceleración y el tiempo transcurrido se advierte que el incendio avanzó a más de 150 m/min de media. Pero seguramente en el lugar del suceso se dieron velocidades mucho mayores, al producirse una **deflagración forestal (DF)**. Las simulaciones realizadas por los investigadores arrojaron resultados de 75 m/min (4 km/h) en los casos más desfavorables, valores muy por debajo de los registrados. Según se puede extraer de las isócronas del incendio, más de 50 hectáreas ardieron en cuestión de 5 minutos. Otro dato de relevancia es que el avance del fuego en la ladera muestra una forma cónica, con velocidades mucho más altas en el centro del frente.

DISCUSIÓN

En el caso de Torremanzanas 2012 se reunía una gran cantidad de factores que podían desencadenar una **deflagración forestal (DF)**: pendientes pronunciadas con inclinación sur (solana), altas densidades de combustible (modelos 4 y 7 de Rothermel), bajas humedades relativas, vientos moderados a favor de la ladera y altas temperaturas en horas centrales del día en un mes de agosto. Además cabe destacar que la situación previa fue otro agravante más: durante casi una hora, el frente estuvo parado a pie de ladera emitiendo gran cantidad de gases inflamables a lo largo de ésta.

Cuando la cabeza de un incendio se topa con estas condiciones, el resultado siempre será el mismo: una aceleración del frente. No siempre que se da este escenario se produce una

deflagración forestal (DF), sin embargo, los siguientes motivos demuestran que este fenómeno tuvo lugar y fue el causante de las muertes: la velocidad de avance media registrada (10 km/h) resultó ser más del doble de la máxima calculada por el simulador. Por tanto, debió de existir una deflagración en un tramo que aumentase la media total hasta los 150 m/min. Por otro lado, como en otros casos evaluados en el presente estudio, el testimonio de los supervivientes es de gran valor. En este caso, se relata como una enorme espiral de llamas avanzó a gran velocidad paralela al suelo y una enorme bola o pared de fuego lo envolvió todo, generando una sonora explosión. De nuevo, se constatan fuertes sonidos durante el fenómeno, patrón común en la mayoría de los testimonios recogidos, además de las grandes proporciones que parece tener. Por último, cabe destacar la espontaneidad del suceso. Según narra uno de los supervivientes (ver testimonio en Anejo II), alguno de los presentes consiguió huir agarrándose o dejándose arrastrar por elementos de los vehículos, en un intento desesperado por salvar la vida.

La tragedia de Torremanzanas no se puede atribuir únicamente a la imprevisibilidad del fenómeno. Resulta difícil comprender por qué las dos personas al mando tomaron la decisión de estacionar en ese lugar y ese preciso momento, resultando extremadamente peligroso por varios motivos: lo peligroso del escenario (ver Anejo I), la reciente intensificación de las llamas con alturas que llegaban a los 40 metros y que superaban con creces el límite de capacidad de extinción (ver Vídeo 3, Anejo IV); no se cumplían los tres primeros puntos del protocolo OACEL (de obligado cumplimiento) y, además, el contrafuego realizado carecía de sentido: se puede ver en la Figura 8 cómo las llamas se inclinan a favor de la pendiente y del sentido de avance del fuego. En ese momento, no existían corrientes de succión contrarias al frente que propiciasen esta actuación. Muchos errores se cometieron en esos minutos y la tragedia pudo ser mucho mayor, demostrando de nuevo la gran importancia del factor humano en este tipo de fenómenos.

5.1.8. *Pedrógão Grande, 2017*

La villa portuguesa de Pedrógão Grande se encuentra en el distrito de Leiria, en el interior de la zona central del país. Lamentablemente, el incendio que se produjo en este lugar en junio de 2017 acabó con la vida de 67 personas. Se considera una de las tragedias relacionadas con los incendios forestales más graves ocurridas en suelo europeo. Según la versión oficial, una *tormenta ígnea* fue la causante de tales consecuencias.

El incendio se declaró el día 17 de junio, entorno a las 14:30 horas. A la hora de esclarecer la causa del inicio del fuego, las autoridades apuntan a un rayo provocado por una tormenta seca, las cuales son habituales en esta zona del país en los meses de verano. Las condiciones climáticas eran críticas: temperaturas de 40°C, humedades relativas menores al 20% y vientos crecientes de unos 20 km/h. El incendio fue intensificándose hasta superar las 3000 hectáreas a la entrada de la noche, y se desarrollaba sobre una masa boscosa mixta de eucalipto y pino con alternancia de zonas de cultivo. La topografía del lugar era suave, con pendientes poco pronunciadas que no superaban el 15%.

Alrededor de las 20:00 horas la temperatura había descendido hasta los 28°C, el viento tenía una intensidad de unos 10 km/h y la humedad relativa alcanzaba valores próximos al 40%. Contra todo pronóstico se produjo una intensificación nunca registrada en suelo europeo, en la que un frente de fuego de unos 4 kilómetros arrasó con casi 2000 hectáreas en aproximadamente 10 minutos (Castellnou et al., 2017). Se muestran a continuación las isócronas del suceso:

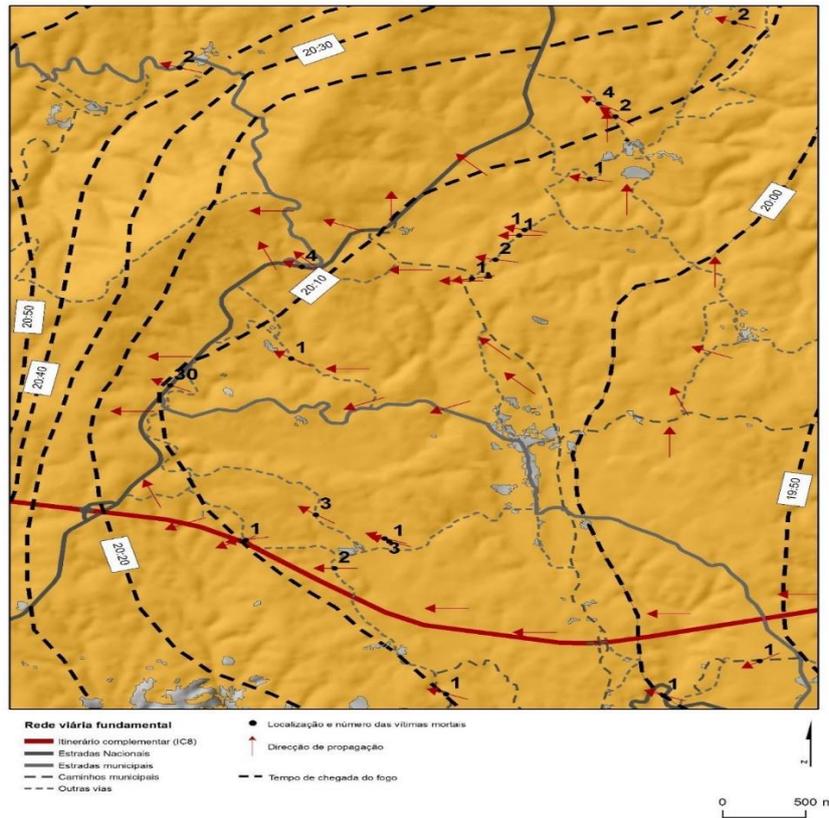


Figura 9. Isócronas del incendio. Se muestran los puntos donde fallecieron las víctimas durante la gran tormenta de fuego.

Este poderoso frente de fuego pasó por encima de dos carreteras por las cuales estaban huyendo los vecinos de las poblaciones y pedanías cercanas. Muchos de ellos perecieron en el interior de los vehículos (ver Imagen 19, Anejo III). La cifra de víctimas mortales fue de 67, además de decenas de heridos. Tras meses de investigación, se dilucidó que lo sucedido fue lo siguiente: el pirocumulonimbo creado por el incendio, en su ascenso en la atmósfera, se topó con una masa de aire muy frío. Fue entonces cuando colapsó, y fuertes corrientes descendentes de aire (con rachas casi huracanadas) aceleraron las llamas, que tuvieron un avance medio de 15.3 km/h durante esos 10 minutos. A este fenómeno se le denominó *tormenta ígnea*, y a día de hoy siguen estudiándose sus mecanismos. Cabe apuntar que fue un fuego de superficie, algo que desconcertó a los investigadores. Se puede observar (ver Vídeo 5, Anejo IV) que la gran mayoría de árboles conservaban su copa, algunos verde y otros desecada.

DISCUSIÓN

La relación de esta *tormenta ígnea* con las **deflagraciones forestales (DF)** parece ser clara. Por un lado, está la elevada velocidad de avance que tuvo el fenómeno: 15.3 km/h de media. Al igual que en otros casos, no se puede presuponer que este valor fuese una constante a lo largo de más de 3 kilómetros de recorrido. Debieron existir diversas aceleraciones y desaceleraciones, pudiendo tratarse de una consecución de varias **deflagraciones forestales (DF)** encadenadas a lo largo de la superficie, con velocidades de avance mucho superiores. La fase de tiempo transcurrida entre cada deflagración reduciría la velocidad media hasta los valores establecidos. Otra evidencia es el estado de los vehículos afectados en la denominada “carretera de la muerte”. Según se observa en el Vídeo 6 (ver Anejo IV), hay vehículos que están mucho más afectados que otros. Por ejemplo, uno de ellos (ver Imagen 20, Anejo III) presenta las puertas

completamente fundidas, las cuales están hechas a base de aleaciones de acero y aluminio. El aluminio tiene la temperatura mínima de fusión más baja de los dos (660°C). Estas piezas se encuentran completamente pulverizadas, de lo que se puede deducir que las temperaturas alcanzadas fueron mucho mayores a esa cifra.

Otro hecho destacable es que, pese a conservar su follaje, la totalidad de los árboles no sobrevivió (ver Imagen 21, Anejo III). Esto indica que debieron existir temperaturas muy elevadas bajo las copas que mataron los meristemas y el resto de los tejidos de los fustes. Además, muy probablemente estas copas actuaron de “techo” bajo el cual se confinaron grandes bolsas de gases inflamables, y se propagaron multitud de *deflagraciones forestales (DF)* debido también a la potencia y fuertes vientos generados por el *downburst*, procedente del colapso del pirocumulonimbo. La existencia de zonas mucho más devastadas que otras en el área de la deflagración, y claramente delimitadas, apoyaría esta teoría. Este mosaico (ver vídeos adjuntos) muestra la forma en la que avanzó el fuego: por medio de grandes carreras o deflagraciones. Como se ha visto en otros casos estos fenómenos tienen límites claramente definidos, y además de lo mencionado, un testimonio recogido parece corroborarlo: “*Acabo de sacar mi coche de una zanja en la que cayó ayer. Increíblemente, no está afectado por el fuego, mientras que otro coche a 10 metros del mío está completamente destruido*”.

Un último matiz es el siguiente: el final temporal de la deflagración coincide con una cadena montañosa situada perpendicularmente al avance del fuego, y también a la NE 236-1, la cual se encuentra en su parte inferior. Quizás esta elevación sirvió para que los vientos ascendieran de manera casi vertical, mitigando en gran medida el avance descontrolado del fuego en la otra vertiente de estas elevaciones.

5.1.9. Peshtigo, 1871

La localidad de Peshtigo se encuentra en el condado de Marinette, perteneciente al estado de Wisconsin. Lamentablemente, el 8 de octubre de 1871 este lugar fue el escenario del incendio más mortífero en la historia de los Estados Unidos, con casi 2000 vidas sesgadas y 490.000 hectáreas arrasadas. La gran mayoría de víctimas, unas 1200, eran residentes en Peshtigo, que vio reducida su población a la mitad. La cobertura mediática fue prácticamente nula dado que todos los focos se centraron en el famoso incendio de Chicago, que tuvo lugar ese mismo día. Son muy pocos los libros escritos sobre el caso, y junto a algunos artículos de prensa son la poca información que existe al respecto. Sin embargo, días después de la tragedia, un corresponsal del New York Tribune visitó la zona y realizó numerosas entrevistas a los supervivientes, en las que se detallan a la perfección los dramáticos momentos allí vividos y que son recogidas por Sewel (1871).

Peshtigo, en esa época, se situaba en un claro rodeado por un frondoso bosque de coníferas. Un frío y caudaloso río con idéntico nombre dividía la ciudad en dos mitades de forma equitativa. Se muestra a continuación una representación del lugar realizada en esa época:

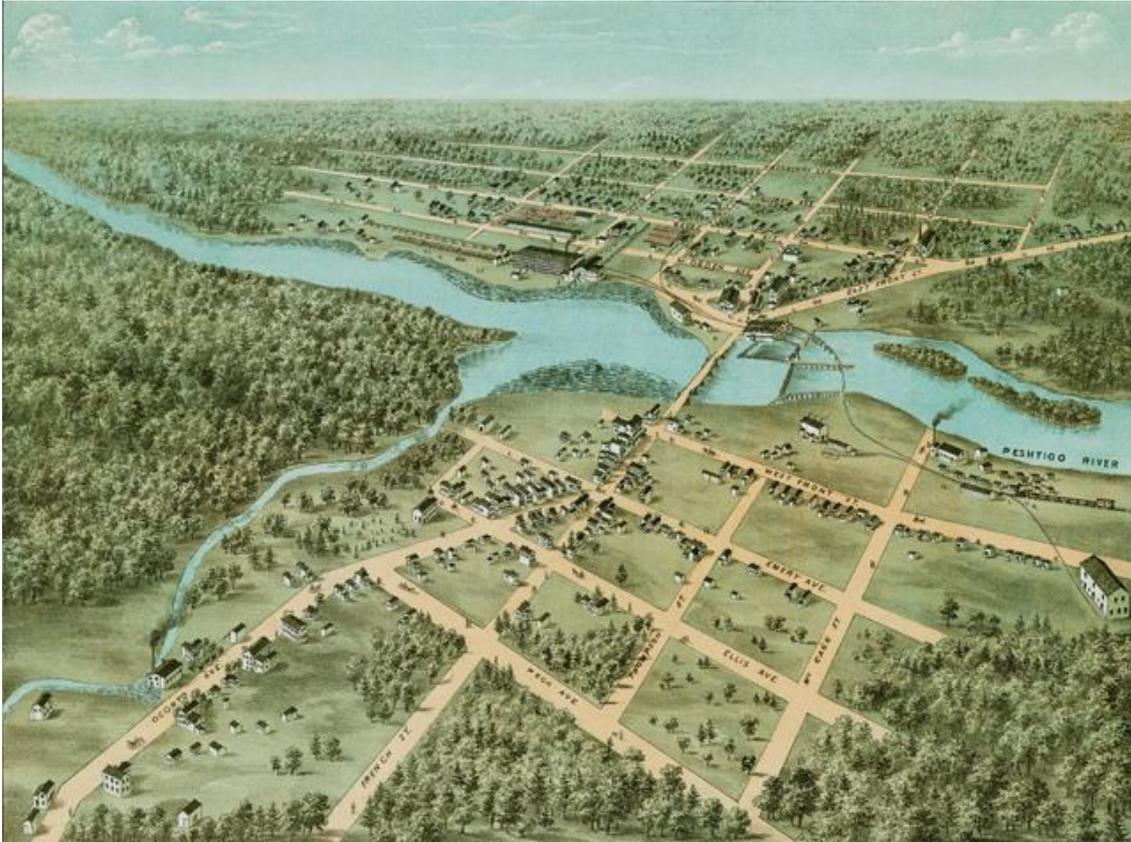


Figura 10. Representación gráfica de Peshtigo realizada con anterioridad al incendio.

Se trata de una zona prácticamente llana, rodeada por densas masas boscosas compuestas principalmente de pino y roble. Existe una considerable separación entre el núcleo de población y el límite del bosque. Lo único que se menciona al respecto de las condiciones climáticas es que fueron unos días con fuertes vientos provocados por un frente frío situado sobre la zona, y que el verano previo había sido muy seco y caluroso.

Se expone a continuación un pequeño extracto de los testimonios recogidos (se recomienda ver testimonio completo en el Anejo II) mostrando las partes que más pueden ayudar a entender el fenómeno: *“En esta tarde de verano, contemplo el claro más espantoso que jamás haya tenido ante los ojos cualquiera de los mortales (...) durante la tarde de ese domingo, se empezó a percibir un gran ruido y bullicio que se acercaba desde el oeste. El ruido creció en volumen, y se acercaba cada vez más, con crujidos y grandes detonaciones (...) El bosque se sacudió y una gran alarma invadió el pueblo, porque ahora imponentes ráfagas de viento y remolinos provenían de todas direcciones. En un horrible instante, antes de que la expectativa pudiera dar forma al horror, una gran llama se disparó en los cielos occidentales, e innumerables leguas de fuego ardiente penetraron hacia abajo en la aldea, perforando cada objeto que se encontraba a su paso, como un rayo al rojo vivo. Un rugido ensordecedor, mezclado con explosiones de llamas eléctricas que se producían por todo el ambiente, paralizó todas las almas del lugar.*

No hay disparidad en los testimonios, todos escucharon el primer rugido inexplicable (...) Unas trescientas personas se sumergieron en las aguas del río, donde se asaron por el cálido aliento de llamas que se cernía sobre ellos. Ardió el cabello de cada cabeza expuesta momentáneamente sobre el agua. (...) No todos pudieron llegar al río; incluso los grupos que cayeron en la poco profunda orilla sufrieron una agonía insostenible. El fuego feroz, sumido en fuertes corrientes en todas direcciones, era lo suficientemente fuerte como para incendiar la ropa.

La arena voladora, calentada como por un horno, ampollaba la carne allá por donde pasaba. (...) Sólo se podía percibir las siluetas en medio de un gran resplandor rojo (...) Los bomberos intentaron salvar alguno de los edificios importantes, conduciendo la manguera desde el río. El calor detuvo instantáneamente el intento, pero no antes de que la manguera, llena de agua, se hubiera quemado en cien partes (...) Parecían lancetas de acero al rojo vivo, penetrando en la cubierta más gruesa. La evidencia ahora queda para atestiguar la increíble fuerza de las lancetas en llamas. Todavía quedan mangos de arado de duro hierro, perforados como por bolas muy pequeñas, y en su mayor parte sin quemar (...) la similitud perfecta de cada testimonio e incidente confirma cada episodio de esta tragedia” (Sewel, 1871).

DISCUSIÓN

Los testimonios recogidos no dejan lugar a la duda: una *tormenta ígnea* arrasó con la mitad de la población de Peshtigo. Se describen grandes explosiones de llamas acompañadas de estruendos ensordecedores que dejan claro el comportamiento explosivo que puede llegar a tener un incendio, y mucho más si cabe en un ambiente de fuego como el descrito. Además, se debe hacer hincapié en las devastadoras características del fenómeno, como la gran explosión inicial que derivó en inmensas lenguas de fuego movidas por fuertes rachas de viento en todas direcciones. Pero sin duda, uno de los hechos más impactantes es que en el río ardiesen súbitamente los cabellos de la gente que estaba expuesta al ambiente. El río que pasa por Peshtigo mide más de 100 metros de ancho, y la distancia a cualquier combustible o llama era demasiada como para que pudiese suceder este hecho. Teniendo en cuenta que los cabellos, compuestos de queratina, alcanzaron su punto de autoignición se puede afirmar que la temperatura ambiental en el río superaba los 200°C. Por último cabe mencionar los mangos metálicos de arado atravesados por las mencionadas lancetas, lo que muestra vientos que debieron ser huracanados.

Todos estos elementos demuestran un fenómeno que guarda muchas similitudes con el suceso de Pedrógão Grande. Días después de la tragedia portuguesa en 2017 se recogió el siguiente testimonio: “*El cielo se abrió en un gran destello y cayeron potentes lenguas de fuego en todas direcciones. Fueron estas lenguas de fuego las que arrasaron con mi pueblo y con los de alrededor*”. De nuevo, se vuelve a mencionar esa primera gran explosión que precede a las lenguas de fuego en todas direcciones, movidas por vientos huracanados.

Los casos de Peshtigo y Pedrógão Grande se suceden a una hora similar, en la misma latitud, con una topografía muy suave y bosques mixtos dominados por pinos, con cargas de combustible similares. El único hecho diferenciable son los casi 150 años de separación entre sí. Parece obvio que las denominadas *tormentas ígneas* han existido, existen y existirán. Sin embargo, en España, este fenómeno se relaciona en gran medida con la irrupción del cambio climático, que parece haber traído a nuestro territorio este tipo de tormentas de fuego. Es cierto que un aumento general de las temperaturas se traduce en un mayor número de periodos secos, pero éste no es el factor más determinante, ni mucho menos. El gran problema es que nuestros bosques se asemejan cada vez más a los de Winsconsin, donde tuvo lugar la tragedia de Peshtigo. El exponencial abandono rural ha propiciado masas boscosas con gran continuidad y altas cargas de combustible, donde un fuego encuentra un escenario perfecto para convertirse en un gran incendio, aumentando la probabilidad de que se suceda una *tormenta ígnea*. No se debe adoptar una postura de inacción y buscar soluciones en la mitigación del cambio climático, dado que si en un futuro se consiguiera revertir, estas *tormentas ígneas* continuarían sucediéndose si nuestros bosques no son gestionados.

5.2. Discusión general

Se considera necesario realizar una puesta en común de los datos recogidos en los casos, sobre todo en relación a las características del escenario y las condiciones climáticas presentes en los momentos de las deflagraciones. Se expone a continuación una tabla con datos más relevantes para un posterior análisis conjunto:

Tabla 3. Datos topográficos, climáticos y de combustible vegetal referentes a los casos estudiados.

Caso	Pendiente media	Modelo de combustible	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento
<i>Mann Gulch Fire, 1949</i>	50%	Modelo 2	< 35°C	-	30 km/h
<i>Millares, 1994</i>	40%	Modelo 4	~35°C	-	~25 km/h
<i>Alájar, 1999</i>	45%	Modelo 4 y 7	34°C	25%	5 km/h
<i>Riba de Saelices, 2005</i>	23%	Modelo 5	29°C	15%	15 km/h
<i>Kornat, 2007</i>	29%	Modelo 1	27°C	61%	20-28 km/h
<i>Horta de Sant Joan, 2009</i>	50%	Modelo 4	29°C	40%	20 km/h
<i>Torremanzanas, 2012</i>	40%	Modelo 4 y 7	32°C	20%	25 km/h
<i>Pedrógão Grande, 2017</i>	< 10%	Modelo 7	29°C	32%	15 km/h
<i>Peshtigo, 1871</i>	< 10%	Zona urbana	-	-	-

En referencia a los datos climáticos se puede observar que los valores de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, en su conjunto, no se pueden considerar como críticos para el desarrollo de un incendio forestal. En la ciencia de la extinción existe la conocida *regla del 30-30-30*, la cual indica que las condiciones para la extinción son desfavorables cuando se superan los 30°C, el viento es superior a 30 km/h y la humedad relativa desciende por debajo del 30%. En el caso de las temperaturas recogidas, tienen una media aproximada de 30°C, siendo el valor máximo de 35°C y el mínimo de 27°C (valores que en ningún caso son excepcionales o críticos durante la época estival). En cuanto a la humedad relativa, se observa una alta variabilidad en los registros: un mínimo del 15% y un máximo del 61%. Además, un hecho significativo es que los vientos en ningún caso superan los 30 km/h, estando varios casos por debajo de los 15 km/h. Un comportamiento extremo del fuego, como lo son las **deflagraciones forestales (DF)**, se suele relacionar con altas temperaturas, bajas humedades y fuertes rachas de viento. Sin embargo, en vista de los datos, se puede afirmar que las condiciones climáticas tradicionales externas al incendio no tienen una relación directa con el desarrollo de una **deflagración forestal (DF)**.

Por otro lado, los modelos de combustible presentes en el escenario (siempre siguiendo la clasificación de Rothermel) tampoco arrojan luz a la hora de estrechar una relación directa entre la vegetación y el fenómeno. Los modelos presentes en los casos son el 1, 2, 4, 5 y 7, siendo el 4 y el 7 los más habituales. Esto parece lógico dado que son los modelos con mayor presencia en el arco mediterráneo, donde principalmente se concentran los casos analizados. Según la mayoría de los autores que han estudiado las **deflagraciones forestales (DF)** en todos sus términos, son necesarias elevadas densidades de combustible para que estos sucesos tengan lugar. Casos como el de Mann (modelo 2, de 1-2 tn/ha) pueden discutir la necesidad de altas cargas como las que se pueden encontrar en los modelos 4 y 5 (25-35 tn/ha) o el 7 (10-15 tn/ha). Pero sin lugar a dudas, el caso de Kornat pone en tela de juicio cualquier razonamiento acerca de las condiciones

vegetales necesarias para el desarrollo de una gran deflagración. El modelo presente era el 1, con una cobertura vegetal del 50% (el resto eran formaciones rocosas) y una carga media de 0,075 tn/ha (ver Anejo I), la cual es casi 40 veces menor a la media de los modelos 4 y 5. Que se produzca un suceso tan virulento (12 muertos) sobre un escenario tan pobre en cuanto a vegetación, debe replantear las afirmaciones de los autores que fijan las elevadas densidades de combustible como condición necesaria para el desarrollo de estas deflagraciones. Obviamente, a mayor carga, aumentará la energía liberada por el fuego y en consecuencia la emisión de gases combustibles y la posibilidad de grandes deflagraciones. Por tanto, se puede afirmar que un lugar con altas densidades de combustible es más propenso a albergar una **deflagración forestal (DF)**, pero ésta se puede desarrollar prácticamente en cualquier escenario, como en el caso de Kornat.

En cuanto a la topografía, la mayoría de los casos se suceden en barrancos o laderas de pendientes pronunciadas, cuya media se sitúa entre el 23% y el 50%. Este escenario favorece la acumulación de gases del incendio y máxime en situaciones de altas presiones que los confinan. Existen casos (ver Anejo I) en los que, a lo largo de la ladera, se hallan tramos de inclinación muy pronunciada, como el de Torremanzanas (próximos al 100%) o el de Millares (escollo rocoso del 200%). Es bien sabido que cuando un fuego discurre por una pendiente ascendente, su velocidad aumenta debido a la inclinación y acoplamiento de las llamas a la superficie, ayudadas por las corrientes de convección y vientos de ladera o valle que se general. C. Packham y J. Boura, en su análisis sobre los incendios de Canberra en 2003, trataron de demostrar que la velocidad de un frente de fuego se duplica por cada 10° que aumenta la pendiente en su análisis sobre los incendios de Canberra en 2003 (Pons, 2007). Sin embargo, este razonamiento no se puede aplicar a la mayoría de los casos, dado que las velocidades de avance fueron muy superiores a las que se podrían estimar con el modelo de Packham y Boura (113 km/h en Riba de Saelices). En el resto de los sucesos no se ha recogido la tasa de velocidad de avance de las deflagraciones, mostrando únicamente valores medios a lo largo de grandes distancias, con lo que resulta imposible realizar una estimación numérica.

Evaluando los casos de estudio, parece mostrarse una relación entre pendientes pronunciadas y el desarrollo de una **deflagración forestal (DF)**. Sin embargo cabe preguntarse si este fenómeno puede darse en superficies llanas o de suaves pendientes. Conforme se ha estudiado, en las *tormentas ígneas* de Peshtigo y Pedrógão Grande (principalmente en la de Portugal) parecen registrarse varias de estas grandes deflagraciones sobre terrenos prácticamente llanos. Lo cierto es que en estos casos los vientos huracanados procedentes del *downburst* tienen una gran influencia en el avance del fuego y, por tanto, no se pueden relacionar directamente con los otros siete casos estudiados. Sin embargo, se recogen dos filmaciones que dejan patente que el fenómeno estudiado se puede suceder en planicies. El Vídeo 7 (ver Anejo IV), captado por los bomberos americanos en el incendio de Barnegat (New Jersey) en 2007, muestra como en una extensa masa boscosa situada sobre un terreno llano deflagra en su totalidad en cuestión de segundos, provocando la retirada del convoy. Si el personal hubiese estado más cerca del lugar, teniendo en cuenta que hacia allí se dirigían, las consecuencias humanas hubiesen sido terribles. Por otro lado, el Vídeo 8 (ver Anejo IV) fue captado por los bomberos australianos durante los incendios de Nueva Gales del Sur, en diciembre de 2019. Se encontraban conteniendo las llamas en el límite de un pinar adulto, cuando de repente se observa una gran deflagración súbita desde la superficie hasta el dosel, pese a que existía un gran tramo en altura en ausencia de combustible (únicamente los fustes). Afortunadamente, los bomberos consiguieron salvar sus vidas debido a que no existía una continuidad de combustible y los gases pudieron dispersarse. Teniendo en cuenta los hechos, se puede asegurar que estos sucesos se pueden dar en escenarios llanos o de suaves pendientes, en contraposición las teorías más asentadas en Europa.

Los modelos matemáticos expuestos por Viegas (2004), Dold et. al (2011) y Chatelon (2014) pueden ser de gran interés para comprender el fenómeno, pero no para predecirlo o

evitarlo. Estos modelos se componen de gran cantidad de variables que están en constante oscilación durante el desarrollo de un incendio (topografía, combustible, propiedades de la llama, condiciones atmosféricas, etcétera). Estas variables no se pueden medir con exactitud en el fervor de un incendio, por tanto, se pueden emplear para un análisis posterior pero no para su detección preventiva. Otro inconveniente de estas formulaciones es que no son modelizadas para **deflagraciones forestales (DF)** ocurridas en llano, ya que no contemplan dicha posibilidad. Por último, resulta destacable que ninguno de estos autores incluya variables relacionadas con la concentración de gases inflamables y comburente, que es de gran importancia a la hora de que se desencadene el fenómeno. Únicamente se incluyen parámetros físicos, relacionados con escenario y las características de las llamas. Si estos parámetros fuesen los únicos implicados en el fenómeno, este se daría con una frecuencia alarmante. Explicarlo mediante leyes (formulación matemática) implica que dadas unas condiciones estándar, estas deflagraciones ocurrirían siempre, pero en la mayoría de las ocasiones no es así. Multitud de pruebas físicas y gráficas muestran que, dado un escenario de fuertes pendientes, altas cargas de combustible y vientos ascendentes que se acoplen al terreno (por ejemplo, vientos de valle); el fuego tiene un comportamiento mucho menos intenso y más pausado que el constatado en las **deflagraciones forestales (DF)**. En España, país que sufre cientos de incendios anuales, la combinación de esta topografía, vegetación y vientos de valle es algo muy habitual, pero en la mayoría de las ocasiones no se suceden tales deflagraciones. Queda patente que el fenómeno tiene lugar en multitud de escenarios diferentes, bajo un amplio abanico de condiciones atmosféricas, por tanto hay otras variables que determinan su desarrollo.

Como se expone al inicio del presente estudio, en incendios en edificaciones o de interior, existen dos fenómenos que suponen un comportamiento extremo del fuego: los *flashover* y los *backdraft*. Su explicación radica en acumulaciones de gases inflamables y en la concentración que alcancen, la cual debe de estar dentro del *rango de inflamabilidad*. El fuego es el mismo elemento en interiores que en espacios naturales, y su comportamiento está sujeto a las mismas leyes. Por tanto, cabe esperar que si se produce un confinamiento de gases inflamables el fuego pueda tener un comportamiento deflagrante o explosivo. La gran cuestión es la siguiente: ¿Se pueden confinar grandes acumulaciones de gases inflamables en la naturaleza? La respuesta es afirmativa. La ciencia meteorológica ha explicado multitud de fenómenos en los que una masa de aire frío impide el ascenso de otra masa de aire caliente, debido a la diferencia de densidad entre ambas. Uno de estos fenómenos es la denominada **inversión térmica**, que por motivos generalmente topográficos, puede confinar masas de aire caliente durante las horas de puesta y salida del sol (cuando las temperaturas varían y las capas de aire se enfrían o calientan). Se puede observar en la siguiente imagen cómo la formación de una inversión térmica a varios metros de la superficie impide el ascenso de los gases calientes:



Figura 11. Imagen de gases confinados por la formación de una inversión térmica.

Otro fenómeno de relevancia en este aspecto es la denominada **subsistencia atmosférica**. Se puede definir como el descenso de masas de aire frío hacia niveles atmosféricos inferiores como respuesta a distintos mecanismos que lo fuerzan a ir en dirección descendente. Es el fenómeno contrario a la *convección*, y generalmente causa altas presiones a medida que más aire se desplaza en el mismo espacio. La *subsistencia* causa muchos fenómenos a pequeña escala (como la niebla matutina), pero también a gran escala. Una forma extrema de *subsistencia* es el ya mencionado **downburst**, que comprime y expande horizontalmente el aire situado en las capas inferiores. Por otro lado, ráfagas verticales de menor intensidad (**downdraft**) simplemente comprimen este aire, sin expandirlo. Estos mismos razonamientos se pueden aplicar para explicar los conocidos “mares de nubes” que se forman en lugares montañosos. Por último, cabe mencionar las denominadas **cizalladuras**, que consisten en cambios repentinos en la velocidad y dirección del viento en las capas superficiales de la atmósfera. A cierta altura, estas cizalladuras crean un ambiente tranquilo bajo ellas, dado que existe una masa de aire confinado que no está en movimiento, siendo más habitual en orografías accidentadas.

Como se puede observar, existen multitud de fenómenos atmosféricos que provocan un confinamiento de una masa gaseosa, ya sea a nivel local o de grandes proporciones, como lo son las *inversiones térmicas*, los movimientos de *convección*, los de *subsistencia* (**downburst** y **downdraft**) o las *cizalladuras* del viento. La explicación a todos estos fenómenos tiene un patrón común: el movimiento de masas de aire, que es provocado por los gradientes de temperatura en la atmósfera. En relación, los incendios forestales crean a su alrededor una gran inestabilidad atmosférica debido al continuo movimiento de masas de aire a altas temperaturas. Este hecho propicia que se puedan suceder los fenómenos descritos a nivel local, probablemente con mayor asiduidad que en la amplia atmósfera terrestre, confinando los gases inflamables a nivel superficial. Cuando estas acumulaciones alcanzan determinada concentración y superan el LII, se produce una gran deflagración de estas al contacto con una fuente de ignición. Sin embargo, que lleguen a confinarse gases inflamables de tal forma que alcancen concentraciones superiores al LII es un hecho un tanto complicado. En el caótico ambiente gaseoso de un incendio, cualquier

racha de viento, cizalladura, cambio en las características vegetales o en la topografía provocan que estas acumulaciones se dispersen y no lleguen a alcanzar concentraciones inflamables. Por otro lado, cabe apuntar que si estas concentraciones son próximas a la *mezcla estequiométrica* de los principales gases inflamables, la deflagración será de mayor intensidad debido a que la práctica totalidad del combustible habrá consumido.

Al respecto de estas consideraciones, el análisis climático realizado por Stipanicev (2008) en el caso de Kornat (ver Anejo I) se debe considerar de gran relevancia para la comprensión de estos confinamientos gaseosos. Las simulaciones realizadas en la estructura vertical de la atmósfera arrojaron algunos resultados importantes: “*Debido a que la mayor cantidad de aire húmedo se encontraba en los primeros 500 metros de la troposfera (y a que los niveles de humedad relativa eran altos) no se formó una nube convectiva (o piro cumulonimbo). Según los análisis aerodinámicos es posible que en el fondo del barranco de Sipnate se formara una capa de unos 2,5 metros de altura, en la cual se produjo la deflagración, donde se superaron los 300°C durante varios minutos*” (Stipanicev, 2008).

A partir de toda la información recabada en la presente discusión, se constata el importantísimo papel que juegan las altas presiones en la atmósfera del incendio, equiparable al conjunto de topografía y vegetación. En este aspecto está muy bien enfocada la corriente norteamericana (*Generalized blaze flash*), la cual plantea diversos escenarios en los que se pueden producir confinamientos de gases inflamables, incluidas las zonas llanas. Además, también contempla la posibilidad de que estos gases calientes se acumulen bajo capas de aire frío, aunque las menciones al respecto son escasas y no parece que se hayan enfocado esfuerzos en investigar esa línea. La teoría se centra en los COVs y en cómo estos pueden suponer el inicio de una **deflagración forestal (DF)**, lo cual es un avance para la ciencia de los incendios. Sin embargo, esta información de poco sirve a la hora de prevenir y detectar el fenómeno. Según demostró Barboni (2006), en incendios de pinares mediterráneos se emiten gran cantidad de estos terpenos, por lo que su presencia no implica que se vaya a producir una gran deflagración. Actúan de mecha, pero el foco se ha de centrar en los propios gases inflamables (CO, H₂, CH₄), causantes de los mayores daños.

Por último, cabe mencionar que según los registros, las **deflagraciones forestales (DF)** tienen un gran poder destructivo y se han cobrado multitud de vidas entre los equipos de extinción. Por lo general se concibe dicho fenómeno como algo imprevisible e inevitable, y que rara vez sucede en el desarrollo de un incendio. En muchas ocasiones, como en los casos de Horta de Sant Joan o Torremanzanas, se atribuye la desgracia a infortunios imposibles de prevenir, sin dar explicaciones concretas y catalogando las víctimas como “fallecidos por atrapamiento” desde fuentes oficiales. En los momentos previos a la **deflagración forestal (DF)** se vive una situación calmada entre los bomberos presentes, dado que los frentes de los incendios se mantienen relativamente estáticos reducidas velocidades de avance. Es durante estos momentos cuando se acumulan progresivamente los gases en la zona de la deflagración. Una vez ocurre, los testigos lo describen como algo inaudito que jamás han visto, realizando similitudes con *paredes, olas y espirales de fuego*, y fuertes sonidos correspondientes con explosiones de gases. Por los testimonios reunidos, se puede deducir que los equipos de extinción no eran conocedores de que el fuego podía alcanzar tales intensidades en tan corto espacio de tiempo, y no estaban preparados ante ello.

6. Conclusiones

1. Teniendo en cuenta todos los elementos analizados en el presente estudio, se define una *deflagración forestal (DF)* como la combustión súbita, violenta y generalizada de una amplia área. Este fenómeno ocurre cuando los gases inflamables procedentes de la pirólisis se confinan en algún punto concreto del escenario y alcanzan concentraciones dentro del *rango de inflamabilidad*.

2. Si sobre un incendio desarrollado se sitúan masas de aire frío, las altas presiones que ejercen pueden confinar los gases calientes a nivel de superficie. Esta situación es generalmente inducida por el propio incendio, dado el movimiento continuo de masas de aire a diferentes temperaturas que genera un frente de fuego. Se pueden dar fenómenos como *inversiones térmicas, cizalladuras, subsidencias o estratificaciones*. En los casos estudiados se muestra la relevancia de este factor, principalmente en el de Kornat (2007).

3. La topografía del lugar es clave a la hora de facilitar dichas acumulaciones, siendo más fácil en barrancos o laderas de pendientes pronunciadas. Por otro lado, el tipo de combustible presente influye en la cantidad de gases inflamables que pueden ser emitidos. A mayor volumen de vegetación, mayor es la posibilidad de que se alcancen concentraciones superiores al *límite inferior de inflamabilidad (LII)*. Pese a todo, el fenómeno puede darse en lugares llanos o con una cantidad muy reducida de combustible.

4. Cuanto más próxima esté la concentración de los gases inflamables a su valor de *mezcla estequiométrica*, mayor será la intensidad y energía liberada por la deflagración. La combustión de estos gases, cuya concentración supera el LII, se produce por dos motivos: en primer lugar, por el contacto de un punto de ignición (llamas); en segundo lugar, cuando estos gases alcanzan temperaturas superiores a su *punto de autoignición*.

5. En una *deflagración forestal (DF)*, las llamas pueden superar con facilidad los 100 km/h y alcanzar temperaturas superiores a los 1200°C, según los datos obtenidos en los casos estudiados, produciéndose combustiones de amplias superficies en tiempos récord.

6. Si un incendio se desarrolla sobre una masa arbórea adulta con un dosel cerrado, éste puede actuar como “techo” impidiendo que los gases inflamables se disipen y alcancen concentraciones superiores al LII.

7. La teoría de los *fuegos eruptivos* se enfoca en las condiciones del escenario: topografía y modelo de combustible. Tiene un gran potencial descriptivo, pero los modelos matemáticos propuestos resultan imposibles de medir en el transcurso de un incendio, sólo a posteriori. Por tanto, no pueden ser aplicables en la prevención del fenómeno.

8. Por otro lado, la teoría de los *Generalized Blaze Flash* se centra en dar explicación a las acumulaciones de gases que se suceden en un incendio forestal. Se considera que esta corriente tiene un mejor enfoque que los *fuegos eruptivos*, dado que un comportamiento tan extremo del fuego no se puede explicar sólo mediante factores topográficos o de combustible. Sin embargo, los esfuerzos se centran en estudiar las emisiones de COVs durante un incendio, dejando un tanto de lado el importante papel que juegan las altas presiones en el confinamiento de gases.

9. Los casos desarrollados en el presente estudio muestran el gran poder destructivo de *las deflagraciones forestales (DF)*, cobrándose un incontable número de víctimas desde que se tienen registros. Los testimonios y datos recogidos muestran que los bomberos son sorprendidos por las

llamas de manera súbita, sin tiempo de reacción. Queda patente el desconocimiento del fenómeno entre los equipos de extinción y la importancia del factor humano en estos sucesos. En la gran mayoría de casos estudiados, las posiciones que asumen estos equipos son peligrosas y potenciales de albergar una gran deflagración.

10. La gran mayoría de las muertes por atrapamiento en incendios forestales son debidas a *deflagraciones forestales (DF)*, y quedan sin tener un diagnóstico correcto de los hechos, como en los casos de Millares (1994), Horta de Sant Joan (2009) o Torremanzanas (2012). Sólo cuando existen víctimas mortales se trata de comprender estos fenómenos, pero lo cierto es que pueden darse con asiduidad en el desarrollo de un incendio. Las *deflagraciones forestales (DF)* se pueden identificar a posteriori por dejar unos claros límites definidos en la vegetación, dentro de los cuales se observan los efectos de altas intensidades de fuego lindando con zonas que apenas han sufrido el efecto de las llamas.

11. Se puede constatar que existe un gran desconocimiento entre los equipos de extinción acerca del fenómeno estudiado. Apenas se han encontrado referencias en manuales de trata de incendios, protocolos de actuación oficiales, guías base para la docencia, informes oficiales de atrapamientos, manuales de bomberos o congresos de incendios.

12. Las *deflagraciones forestales (DF)* se suelen catalogar como imprevisibles, pero lo cierto es que son evitables en su gran mayoría. Pese al gran peligro que supone este fenómeno para los bomberos y brigadistas, la ciencia forestal no ha dedicado apenas recursos para trabajar en su prevención. Por ello, el autor que suscribe el presente estudio indica dos corrientes a seguir para lograr mitigar y evitar las fatales consecuencias de las *deflagraciones forestales (DF)* en los medios de extinción:

- En primer lugar, dado a que el fenómeno se puede reducir a un confinamiento de gases inflamables que supera el LII, se propone que los bomberos porten consigo detectores de gases (o *explosímetros*). Estos aparatos pueden medir la concentración de gases inflamables presentes en el ambiente, además de ser ligeros y de fácil programación. Cuando las medidas de concentración de monóxido de carbono, metano o hidrógeno alcanzasen valores cercanos a ese LII, sería el momento de realizar la evacuación del lugar. Para fijar estos valores se precisa de estudios de detalle, que deben basarse en los gases de pirólisis emitidos según el tipo de vegetación, además del grado de dispersión que puedan tener en el ambiente.
- En segundo lugar, se propone que los planes de incendio locales incluyan zonas de alto riesgo, potenciales de albergar una *deflagración forestal (DF)*, en las cuales los equipos de extinción no deberían entrar bajo ningún concepto. Estas zonas se identificarían mediante modelos cartográficos (GIS) producto de combinar los factores topográficos, de modelo de combustible y de infraestructuras presentes. A cada variable se le debería otorgar un peso y una escala de peligrosidad, y para ello se precisa de un amplio estudio en este marco.

13. Por último, cabe destacar la relación entre las *tormentas ígneas* y las *deflagraciones forestales (DF)*. En estas tormentas de fuego se observan grandes *carreras* que pueden ser asociadas al fenómeno objeto de estudio. Se plantea la posibilidad de que estos frentes de incendio avancen mediante grandes deflagraciones encadenadas entre sí, con desaceleraciones en las cuales se produce una nueva acumulación de gases. Al fin y al cabo, en ambos fenómenos el fuego tiene un comportamiento extremo debido a los mismos procesos básicos: una masa densa de aire frío confinando los gases calientes en superficie, teniendo en cuenta de que en las *tormentas ígneas* existe la gran influencia de los vientos huracanados procedentes del *downburst*.

7. Bibliografía

ALONSO HERRERÍAS, M., & BASSET BLESA, J. (2014). *Guía de Método: Extinción de Incendios en Espacios Confinados*. Consorcio Provincial de Bomberos de Valencia, Valencia.

ASOCIACIÓN PROFESIONAL DE AGENTES FORESTALES, (2014). *Manual orientativo para docentes en incendios forestales*. Consultado el 13 de enero de 2020: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/dossier_tecnico_tcm30-153331.pdf pag 21

BARBONI, T. (2006) *Caractérisation chimique d'un hybride de clémentine et du myrte commun. Etude de cas d'embrasement generalisé éclair par la détermination des COVb. Analyse des fumées issues de la combustion des végétaux*. Ph.D Thesis, Corte: University of Corsica.

BOMBEROS DE NAVARRA, 2001. *El fuego o combustión*. Consultado el 23 de diciembre de 2019: http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/fuego.pdf

BUTLER B. COHEN, J., & PUTNAM (2000). *A Method for Evaluating the Effectiveness of Firefighter Escape Routes*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station,

BUTLER, B. W., BARTLETTE, R. A., BRADSHAW, L. S., COHEN, J. D., ANDREWS, P. L., PUTNAM, T., & MANGAN, R. J. (1998). *Fire Behavior Associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado*. Research Paper RMRS-RP-9, Ogden, UT, USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 82 p.

BYRAM, G. M. (1954) *Atmospheric Conditions Related to Blowup Fires*. Southeastern Forest Experiment Station, Ashville, NC, Station Paper 35, April 1954.

CARBONELL, G., MONET, J. P., DUSSERRE, G., SAUVAGNARGUES, S. (2004) *Embrasement generalisé éclair en feu de forêt*. Rapport EMA-SDIS 13, 153.

CHATELON, F. J., BALBI, J. H., ROSSI, J. L., FILIPPI, J. B., MARCELLI, T., ROSSA, C., & VIEGAS, D. X. (2011) The Importance of Fire Front Width in the Anticipation of Eruptive Fires. *Proceedings of the Seventh Mediterranean Combustion Symposium*, Chia Laguna, Cagliari, 11-15 Septiembre 2011, 12.

CHATELON, F.; SAUVAGNARGUES, S.; DUSSERRE, G. (2014). *Generalized Blaze Flash, a "flashover" behavior for forest fires. Analysis from the Firefighter's point of view*. Disponible en línea en: <https://www.researchgate.net/publication/269704674>

COMPARTMENT FIRE BEHAVIOUR TRAINING (CFBT), 2016. *Límites de inflamabilidad (traducción)*. Consultado el 12 de enero de 2020: http://www.cfbt-be.com/images/artikelen/artikel_34_ES.pdf

COURTY, L. (2012). *Etude de l'émission et des propriétés de combustion des composés organiques volatils potentiellement impliqués dans les feux de forêts accélérés*. Ph.D. Thesis, Poitiers: University of Poitiers.

DOLD, J. W., & ZINOVIEV, A. (2009). Fire Eruption through Intensity and Spread Rate Interaction Mediated by Flow Attachment. *Combustion Theory and Modelling*, 13, 763-793. <http://dx.doi.org/10.1080/13647830902977570>

DOLD, J. W., ZINOVIEV, A., & LESLIE, E. (2011). Intensity Accumulation in Unsteady Firelines: A Simple Model for Vegetation Engagement. *Fire Safety Journal*, 46, 63-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.12.001>

EUROPEAN UNION CIVIL PROTECTION MECHANISM, 2017. *Informe técnico. Situación de incendios forestales en Chile entre enero-febrero 2017*. Consultado el 24 de enero de 2020: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/informe_tecnico_if_chile2017_tcm30-425304.pdf

FERNÁNDEZ, C., LUQUE, E., & LINARI, F. (2015). *La seguridad en la extinción de incendios forestales desde la perspectiva del factor humano*. ISBN: 978-84-608-3181-5. FITAG-UGT.

HTV1, 2015. *Kornatska tragedija*. Consultado el 14 de diciembre de 2019: <https://www.youtube.com/watch?v=jkg3AUIdkk8>

LO FORESTALILLO, 2010. *Informe situación d'incendis forestals*. Consultado el 5 de febrero de 2020: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/11.Accidente%20Horta%20Sant%20Joan%202009_1_tcm30-137512.pdf

MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN, 2020. *Estadísticas de Incendios Forestales*. Consultado el 10 de febrero de 2020: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx

NACIONAL HR, 2007. “Uz huk, vatra nas je spalila u 15 sekundi”. Consultado el 12 de diciembre de 2019: <https://www.nacional.hr/uz-huk-vatra-nas-je-spalila-u-15-sekundi/>

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2017. *Guide on methods for evaluating potential for room flashover*. Consultado el 8 de enero de 2020: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=555>

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2019. *Reporter's Guide: all about fire*. Consultado el 8 de enero de 2020: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Press-Room/Reporters-Guide-to-Fire-and-NFPA/All-about-fire>

NET HR, 2007. *Devet godina od Kornatske Tragedije*. Consultado el 12 de diciembre de 2019: <https://net.hr/danas/hrvatska/devet-godina-od-kornatske-tragedije-postoje-tri-teorije-o-uzroku-pozara-roditelji-poginulih-vatrogasaca-jos-traze-istinu/#>

PARLAMENTO PORTUGAL, 2017. *Análise e apuramento dos factos relativos aos incendios que ocorreram entre 17 e 24 de junho de 2017. Comissao técnica independente*. Disponible en línea en: https://www.parlamento.pt/Documents/2017/Outubro/Relat%C3%B3rioCTI_VF%20.pdf

PONS I GRAU, V. (2007). *L'explosió de la muntanya: el tràgic succés esdevingut en l'incendi de Guadalajara*. Varias editoriales.

RODRÍGUEZ, F. (1999). *Los fenómenos sorpresivos en el comportamiento del fuego. Análisis del incendio forestal de Alájar ocurrido el día 30 de junio de 1999 en la provincia de Huelva. Descripción del fenómeno explosivo que ocasiona la muerte de cuatro combatientes*. Disponible en línea en: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/9.Accidente%20Alajar%201999_tcm30-137510.pdf

ROTHERMEL, R.C. (1993). *Mann Gulch Fire: A race that couldn't be won*. Gen. Tech. Rep. INT-299. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

- SEWEL, A. (1871). *The great calamity*. Disponible en línea en: [https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.\\$b281987&view=1up&seq=14](https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.$b281987&view=1up&seq=14)
- SKRACIC, V. (2003). *Kornat islands*. Zarat foro.
- STIPANICEV, D., SPANJOL, Z., VUCETIC, Z., VUCETIC, M., ROSAVEC, R., & SERIC, L. (2008). *The Kornati fire accident facts and figures. Configuration, vegetation and meteorology*. Disponible en línea en: <https://www.researchgate.net/publication/271449761> The Kornati fire accident facts and figures - configuration vegetation and meteorology
- TV3, 2017. *El gran silenci de Horta de Sant Joan*. Consultado el 3 de febrero de 2020: <https://www.youtube.com/watch?v=48NwGTypv14&t=1563s>
- VIEGAS, D. X. (2004). A Mathematical Model for Forest Fire Blowup. *Combustion Science and Technology*, 177, 27-51. <http://dx.doi.org/10.1080/00102200590883624>
- VIEGAS, D. X. (2007). *Comportamiento eruptivo de un incendio forestal*. <https://es.scribd.com/doc/14071204/Fuego-Eruptivo-Efecto-chimenea>
- VIEGAS, D. X., & Simeoni, A. (2010). Eruptive Behaviour of Forest Fires. *Fire Technology*, 47, 303-320. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-010-0193-6>
- VIEGAS, D. X., & STIPANICEV, D. (2008). *The Kornati fire accident. Eruptive fire in relatively low fuel load herbaceous fuel conditions*. Disponible en línea en: <https://www.researchgate.net/publication/271449683> The Kornati fire accident - Eruptive fire in relatively low fuel load herbaceous fuel conditions
- ZÁRATE, L. (2004). *Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en incendios forestales*. Disponible en línea en <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93747> Capitulo 2, p 50-51.

ANEXOS

ANEJO I

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DE LOS CASOS ESTUDIADOS

1. MANN GULCH FIRE, 1949

Según narra Rothermel (1993), era un día muy caluroso y ventoso. Las temperaturas ese día alcanzaron los 36°C en Helena. Las llamas comenzaron cerca de la cima de una cresta entre el barranco de Mann y el cañón de Meriwether. El barranco de Mann tiene forma de embudo, se estrecha en su parte inferior de drenaje. La vegetación en el lado norte del barranco estaba compuesta de *Pinus ponderosa* adulto de 60 a 100 años. El lado sur estaba cubierto por *Pseudotsuga Menziesii* de 15 a 50 años mezclado con pino y una superficie cubierta por *Juniperus communis* en gran mayoría. Un claro gradiente de humedad se refleja en la ladera este, donde tuvo lugar el suceso. Esto influye en la vegetación, que se concentraba en mayor densidad en las partes bajas. En el momento del incendio, las zonas más bajas tenían mucha mayor carga de combustible que las altas, donde los árboles daban paso a herbáceas dispersas (Rothermel, 1993). Se puede observar a continuación una imagen del lugar tomada días después del incendio:



Ladera del Mann Gulch en la que perecieron los bomberos.

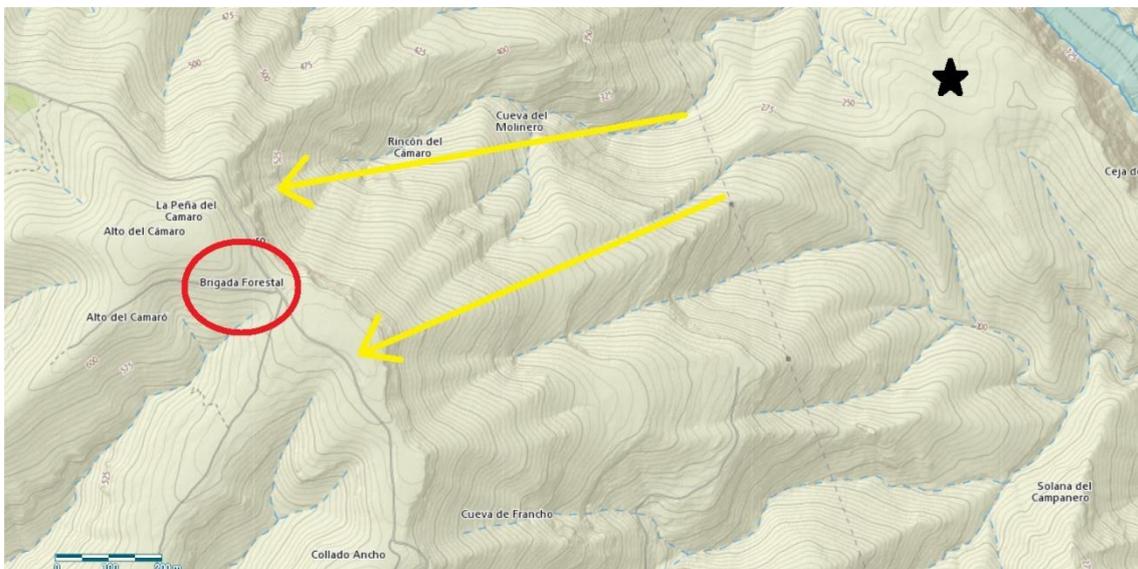
Por tanto se puede suponer que en la parte superior, donde tuvo lugar el suceso, existía un modelo 2 según la clasificación de Rothermel: *la propagación del incendio está gobernada por los*

combustibles herbáceos finos. La propagación es rápida. El matorral o arbolado ocupa de uno a dos tercios del área. Las intensidades del fuego son mayores y pueden producirse pavesas. Carga de combustible de 1-2 tn/ha.

Según aseguran algunos expertos, como Barrows (1980), corrientes descendentes de aire provinieron de una pequeña tormenta local, que extendió el incendio desde la cresta a la boca del cañón durante su fase inicial. Se pudo formar un gran torbellino de aire entre ambas crestas que pudo suponer el inicio del avance del fuego en dirección norte (Rothermel, 1993).

2. MILLARES, 1994

En el siguiente mapa topográfico se puede apreciar el relieve del lugar:



Mapa topográfico del lugar de los hechos. En rojo, la ubicación de la brigada. En amarillo, el área por la que ascendió el fuego. En negro, el punto aproximado donde se encontraba el fuego a la llegada de los brigadistas.

El mapa se ha extraído del Instituto Cartográfico Valenciano. Realizando una serie de medidas macroscópicas, se han obtenido los siguientes datos:

- La cota del escenario de la tragedia es de 603 metros sobre el nivel del mar, mientras que la del punto donde se encontraba el fuego es de aproximadamente 230 metros sobre el nivel del mar.
- La distancia entre ambos puntos es en torno a 1300 metros.
- Calculando el cociente entre la distancia entre ambos puntos y la diferencia de cotas, se obtiene que la pendiente media de la ladera es de alrededor del 36%.

Cabe destacar que antes de llegar a la parte alta la ladera acaba en unas formaciones rocosas de corte prácticamente vertical (ver Figura 5), dando lugar a la depresión donde fallecieron los brigadistas. El fuego sobrepasó este considerable escollo con gran facilidad.

La masa forestal presente en el escenario se componía de coníferas (en mayor o menor densidad) y matorral en la parte superior. En la ribera del río Júcar, donde siempre hay agua, se puede ver una masa densa y verde. Más arriba, la masa boscosa disminuye y, en algunos sitios, no hay más que árboles solitarios y bosque de rebrotes. La montaña forma una ladera de pendiente prolongada y en su parte superior estaba despoblado de árboles (Pons, 2007).

Por tanto, se pueden suponer los siguientes modelos de combustible, según la clasificación de Rothermel:

- Modelo 7 en el fondo del valle: “matorrales de menos de dos metros, pinares con sotobosque de especies inflamables”.
- Modelo 4 en la ladera y la parte superior: “matorrales de unos dos metros de altura, repoblados o regenerados jóvenes densos”. Cabe apuntar que en la ladera quedaban algunos pinos diseminados que habían sobrevivido a incendios pasados (Pons, 2007).

En cuanto a los datos climáticos, hay reportes de que los días en que se sucedió el incendio las condiciones eran realmente desfavorables: temperaturas en muchos casos superiores a 40°C, vientos racheados e intensos procedentes del Sáhara y una humedad relativa muy baja (Antena 3, 1994). Sin embargo, no se han podido encontrar datos climáticos de estaciones cercanas a Millares medidos esos días. Se han consultado en la estación más cercana que los disponía, la de Xátiva. Se muestran a continuación:

RESUMEN DE VALORES PARA LA ESTACION: 8293X , PARA EL DIA 05-07-1994

							
Temperatura Máxima:	35.8 °C	Presión Máxima :	mb	Racha Máxima:	6.9 m/s	Horas de Sol :	
Hora Temperatura Máxima:	13:50	Hora Presion Máxima :		Hora Racha Máxima:	12:30	Precipitacion:	0.0 l/m ²
Temperatura Mínima :	20.3 °C	Presion Mínima :	mb	Direccion:	06		
Hora Temperatura Mínima:	23:59	Hora Presion Mínima :		Velocidad Media:	2.2 m/s		

Mediciones de la estación meteorológica de Xátiva. Fecha: 05/07/1994.

No se pueden trasladar estos datos a las condiciones en Millares, ya que ambos lugares se encuentran separados por más de 30 kilómetros en línea recta. Sin embargo, pueden servir de aproximación. El día anterior (4 de julio), cuando se inició el incendio, esta misma estación captó una máxima 42.7°C y rachas de viento de hasta casi 40 km/h. Son valores mucho más críticos que los del día de la tragedia. No se dispone de información acerca de la humedad relativa.

3. ALÁJAR, 1999

Para abordar el estudio del fenómeno, es necesario revisar cada uno de los factores que influyen en el proceso, tanto de manera física como química. Fco. Rodríguez analizó los tres factores más relevantes en estos casos: topografía, combustible vegetal y condiciones climáticas. Se muestra a continuación una imagen del lugar:



Ortofoto del lugar del accidente, extraída de Google Earth. En amarillo, el punto donde comenzó el incendio. En rojo, la ubicación donde fueron hallados sin vida los cuatro bomberos.

El fatídico suceso tuvo lugar en la ladera sur de una de las estribaciones de la Sierra de los Cuchareros. No cabe duda de que la topografía del lugar tuvo influencia directa en la rápida propagación del frente de fuego y en la creación de un ambiente climático inestable. La posición de la brigada en el momento del siniestro, en términos de relieve, era muy desfavorable. Se trata de un pequeño barranco que discurre en dirección S-N, con una ligera inclinación hacia el oeste. Al contrario de lo que cabe esperar, el fuego en primera instancia ascendió por los flancos del barranco, cuya pendiente es del 45.7% en el flanco izquierdo y del 46.03% en el derecho (Rodríguez, 1999). Cabe apuntar que no se realizaron medidas directas de la pendiente en el lugar del incidente, pero por su proximidad a las realizadas en el flanco derecho se puede deducir que se encontraba entre 40% y 50%.

En cuanto al combustible vegetal presente, Rodríguez y su equipo lo dividieron en dos zonas. Siguiendo las clasificaciones de Rothermel se puede describir las características florísticas del lugar:

- Al punto donde comenzaron las llamas se le puede asignar un Modelo 5: “*Matorral denso pero bajo, altura no superior a 0’6 metros. El incendio se propaga por los combustibles superficiales como matorral, pastos y otras herbáceas de sotobosque. Incendios poco intensos debido a cargas ligeras de combustible, que oscilan entre las 6 y 9 tn/ha*” (Rothermel, 1976).
- La ladera en la que tuvo lugar la tragedia está compuesta alternativamente por dos modelos. Por un lado, el Modelo 4: “*Matorral o arbolado joven muy denso de unos dos metros de altura. Continuidad vertical y horizontal del combustible. El incendio se propaga sobre las copas con grandes intensidades y alturas de llama. Carga estimada entre 24 y 36 Tn/ha*” (Rothermel, 1976). Por otro, el Modelo 7: “*Matorral inflamable de 0’6 a 2 metros de altura, que propaga el fuego bajo el arbolado. Puede ocurrir con combustibles con alto contenido en humedad debido a la inflamabilidad de estos. Carga aproximada entre 8-15 tn/ha*” (Rothermel, 1976).

Para el segundo caso, Rodríguez propone un nuevo modelo de combustible resultante de la combinación de ambos, y lo denomina Modelo Mr: “*Dada la distribución espacial mezclada de los modelos 4 y 7 anteriormente definidos, ha sido necesario conformar un modelo resultante, siendo éste nuevo, el responsable del comportamiento del fuego. La asignación de pesos ha sido de un 85% para el modelo 4 y un 15% para el 7. Carga estimada entre 20 y 28 Tn/ha*” (Rodríguez, 1999).

Finalmente, en cuanto a las condiciones climáticas, se muestra a continuación una tabla que recoge las variables más importantes medidas en la estación de Alájar en la hora de la tragedia. Éstos valores son aproximados, dado que han sido extraídos de gráficas y no de tablas con valores exactos:

Valores más representativos medidos en la estación meteorológica de Alájar.

Hora	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento	Dirección del viento
14:00	34°C	25%	5 km/h	Este

Cabe apuntar que se muestra la velocidad media del viento (5 km/h), siendo la máxima de unos 14 km/h. La distribución topográfica de la zona facilita situaciones en las que capas de aire se estancan por fenómenos convectivos asociados a los calentamientos diferenciales de ladera. Se produce una estratificación de las masas de aire encerradas entre las laderas del valle, quedando una capa de mayor temperatura entre dos capas más frías. Tal situación define la existencia de una inversión térmica en el valle, ubicándose a unos 650 metros de altura (Rodríguez, 1999).

4. RIBA DE SAELICES, 2005

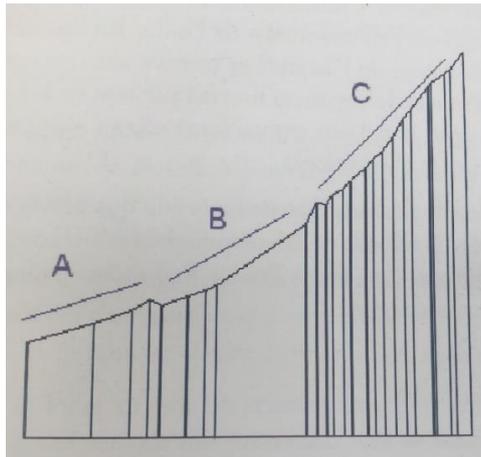
El fatídico suceso tuvo lugar en el denominado Rincón del Jaral, en el término municipal de Riba de Saelices y muy cerca del linde con Santa María del Espino. El lugar en el que perecieron es una vaguada situada entre dos pequeñas lomas (aparecen en la imagen como “El Rincón” y “Chorrera Alta”) y atravesada por una pista forestal. En sentido SE-NO, en la parte inferior, se encuentra el denominado barranco de “La Hoz” que desemboca en el Valle de los Milagros. Desde ese barranco provino el fuego que ascendió por la ladera, situada entre ambas lomas en dirección S-N, y que atrapó a los brigadistas. La fotografía que se adjunta a continuación se tomó desde un medio aéreo minutos antes del incidente, y muestra una perspectiva frontal del lugar de los hechos:



Fotografía aérea del lugar de los hechos instantes antes de la tragedia. En rojo, el lugar donde fallecieron los brigadistas. En amarillo, el sentido de la deflagración que los atrapó.

Las dos imágenes mostradas servirán de apoyo gráfico a la hora de entender la información que se va a exponer a continuación. Tanto los datos topográficos como del combustible vegetal presente se han extraído del libro “*L’explosió de la muntanya*”, de Vicent Pons i Grau. El autor es también el máximo responsable de la Oficina Técnica de Ingeniería Forense, y una de las eminencias nacionales en el peritaje de incendios. El libro se basa en el informe realizado por Pons y su equipo para la comisión de investigación que se creó tras el incendio y por el cual llegaron a declarar hasta en el Parlamento Europeo. Por tanto, se consideran de gran valor los datos y estudios expuestos en él.

A pesar de existir mapas de la zona el equipo realizó sus propias medidas topográficas. En cuanto a la pendiente que recorrió la deflagración, estos fueron los resultados:



Representación de la pendiente de la ladera por la que ascendió la deflagración. Tres tramos claramente diferenciados (Pons, 2007).

La distancia total, es decir, desde el fondo del pequeño barranco hasta el lugar donde murieron los brigadistas es de 960 metros, con una pendiente media del 15.5% y ocupando un área total de 2.1 hectáreas. En la siguiente tabla se exponen los datos por tramos:

Longitud y pendiente media de cada uno de los tramos.

Tramo	Longitud	Pendiente media
A	396 m	7 %
B	221 m	19 %
C	343 m	23 %

En cuanto al combustible vegetal presente, basándose en la clasificación de Rothermel y sus 13 modelos de combustibles, se puede dividir la ladera en dos partes claramente diferenciadas (ver Imagen 2):

- La primera abarca el primer tercio de la ladera y se le asigna un modelo 7: “*Matorral de especies muy inflamables; de 0.5 a 2 metros de altura, situado como sotobosque en masas de coníferas*” (Rothermel, 1972).
- La segunda abarca los dos tercios restantes y se le asigna un modelo 5: “*Matorral denso y verde de menos de 1 metro de altura. Propagación del fuego por la hojarasca y el pasto*” (Rothermel, 1972).

Ambos modelos cuentan con una gran superficie de exposición al fuego y por tanto con una alta velocidad de combustión, la cual se propagará por superficie en los dos casos.

Las especies presentes eran, principalmente, *Pinus pinaster* y altas densidades de *Cistus laurifolius* y *Cistus ladanifer*, además de *Erica arborea* y *Calluna vulgaris* en menor proporción. Se debe considerar que el estado de la masa vegetal era de bajo contenido en humedad, ya que en 2005 las lluvias de primavera habían sido más bien escasas, al igual que en los primeros meses de verano.

Para conocer las condiciones climáticas, Vicent Pons y su equipo solicitaron al Instituto Nacional de Meteorología los datos de las dos estaciones de medición más próximas: la estación

de Prados Redondos y la de Jadraque. Se pueden consultar en uno de los anejos del libro, pero está prohibida su reproducción. En referencia al momento de la deflagración (que tuvo lugar alrededor de las 17:15 horas), las variables medidas fueron las siguientes:

Variables más representativas medidas por las estaciones meteorológicas próximas en el momento del incidente.

Estación	Prados Redondos	Jadraque
Humedad relativa	12.56 %	19.35 %
Radiación solar	307.4 W/m ²	449.6 W/m ²
Temperatura	29.06° C	29.87° C
Velocidad del viento	20.67 km/h	8.70 km/h
Dirección del viento	239.3°	230.9°

Se puede observar que los niveles de humedad en la zona eran realmente bajos, por encima de ese 25% crítico que marcan algunos expertos en incendios. Era un día completamente soleado, con apenas algunos cirros en el cielo, y la temperatura en ese momento no alcanzaba los 30° C. Estudiando las gráficas de viento adjuntas en el libro queda claro que en ningún momento se detectaron fuertes vientos localizados o cambios bruscos en la dirección, aunque muchas veces los vientos de convección que se crean en el propio incendio no pueden ser detectados por las estaciones situadas a varios kilómetros de él.

En resumen, los datos climáticos aportados se pueden considerar óptimos para un desarrollo peligroso de las llamas, pero quedan lejos de los valores más críticos que podían llegar a alcanzar. De hecho, el día anterior (sábado 16), las mediciones tomadas a la misma hora (17:00) eran más desfavorables: 33.4°C de temperatura y una humedad relativa que apenas llegaba al 10%. Por tanto, los brigadistas que allí se encontraban no se encontraban bajo la peor situación climática posible, ni mucho menos.

5. KORNAT, 2007

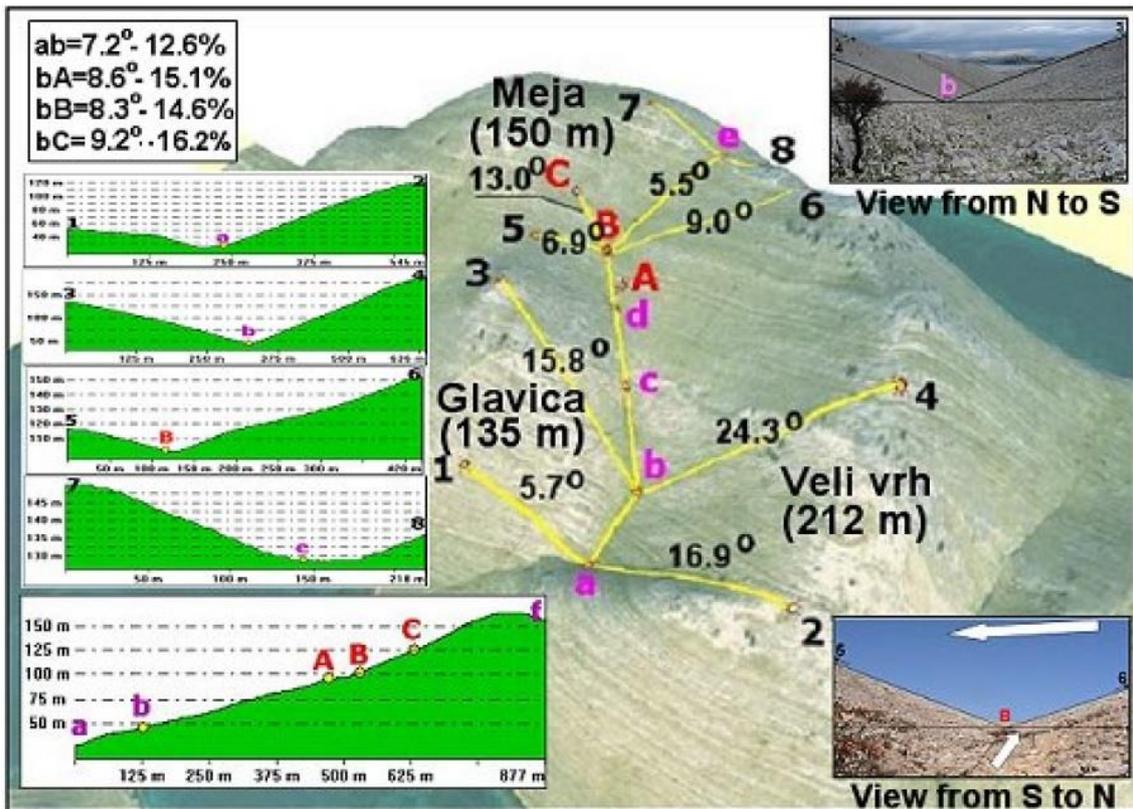
El lugar de los hechos es un barranco que discurre en dirección SO-NE desde prácticamente primera línea de costa. A mitad, se curva ligeramente hacia el oeste hasta coronar la parte más alta. El denominado “barranco de Sijnate” desemboca en una bahía con idéntico nombre y tiene una longitud aproximada de 900 metros. Este escenario se puede observar en la siguiente imagen:



Barranco en el que tuvo lugar el incidente.

Un mes después de la tragedia, un grupo de seis investigadores independientes decidieron realizar un estudio acerca del suceso y el escenario en el que tuvo lugar. El equipo estaba formado por D. Stipanicev y Lj. Bodrozic (facultad de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica y Arquitectura Naval, universidad de Split), Z. Spanjol y R. Rosavec (facultad de Ciencias Forestales, universidad de Zagreb) y M. Vucetic y V. Vucetic (Servicio Meteorológico e Hidrológico de Croacia, en Zagreb). La información que recabaron es extensa y se centró en aspectos topográficos, de combustible vegetal y meteorológicos. Se publica tanto la memoria como los anejos en el portal ResearchGate, y esta información servirá como fuente principal en los próximos subapartados.

En cuanto a la topografía, Stipanicev y su equipo realizaron un completo análisis topográfico del barranco de Sipnate. La siguiente figura, a modo de representación sobre una ortofoto, muestra las características del relieve más significativas:



Parámetros topográficos más importantes del barranco de Sipnate (Stipanicev, 2008).

Como se ha mencionado, existe un primer tramo SO-NE y un segundo con orientación S-N y una longitud aproximada de 350 metros. El barranco está cerrado por tres elevaciones: al este el monte Veli (212 metros), al norte el monte Meja (150 metros) y al oeste el monte Glavica (135 metros), donde aterrizaron los 13 bomberos. El fondo del barranco tiene una pendiente media del 16% y la máxima pendiente de sus flancos es del 29% en la ladera del Glavica y 45% en la del monte Veli. El área aproximada que ardió en el barranco fue de unas 10 hectáreas (Stipanicev, 2008).

En cuanto al combustible, como se puede ver en las imágenes adjuntas, la vegetación del lugar es realmente pobre. Se trata de un terreno muy rocoso cubierto por especies herbáceas y arbustivas de muy bajo porte con alguna leñosa muy dispersa. Las especies dominantes son principalmente estas herbáceas (*Stipa bromoides* y *Stipa pennata*) y algunas plantas aromáticas como *Xeranthemum annuum* o *Salvia officinalis*. Las pocas leñosas presentes son por lo general *Quercus ilex* que no superan los cuatro metros de altura (Skracic, 2003).

La asociación de vegetación presente es *Stipo-salvietum officinalis* var. *Brachypodium ramosum*. La cobertura vegetal está entre el 45% y el 55% de la superficie total. La carga de combustible se sitúa entre los 0.56 kg/m² y los 0.83 kg/m² con un poder calorífico medio de 18.000 kJ/kg. Se recogieron diversas muestras de vegetación que no habían ardido durante la deflagración y tras su análisis en laboratorio se estimó que el tiempo de combustión total era de unos 12 segundos y su contenido en humedad no superaba el 14% (Stipanicev, 2008).

Teniendo estas características en cuenta se puede asignar al barranco de Sipnate, según la clasificación de Rothermel, un modelo 1: “la propagación del incendio está gobernada por los combustibles herbáceos finos (secos o casi secos). La propagación es rápida. El matorral o arbolado ocupa menos de un tercio del área” (Rothermel, 1972).

Los datos que se exponen en este subapartado corresponden a la estación meteorológica de “Vela Sestrica”, situada en una isla a unos 5 kilómetros del barranco de Sipnate, y a la del aeropuerto de Zadar que se encuentra más alejada del lugar de los hechos. Stipanicev y su equipo también realizaron simulaciones de las corrientes de aire por medio de ALADIN, modelo numérico de predicción meteorológica para un área limitada.

Las variables climáticas más representativas de cada estación, con fecha del 30 de agosto de 2007 y publicadas en el citado informe, se muestran en las siguientes tablas:

Datos registrados en la estación de Vela Sestrica en el intervalo horario de la tragedia. No se disponen de información sobre humedad relativa.

Hora	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento	Dirección del viento
14:00	27.4° C	-	20-28 km/h*	SE
16:00	27.2° C	-	20-28 km/h*	SSE

*En los datos pertenecientes a esta estación, la velocidad del viento se expresa con un valor de “4” en la escala de Beaufort. A este valor le corresponde un rango de entre 20 y 28 km/h.

Datos registrados en la estación de Zodar a mediodía. No se dispone de información sobre la dirección del viento.

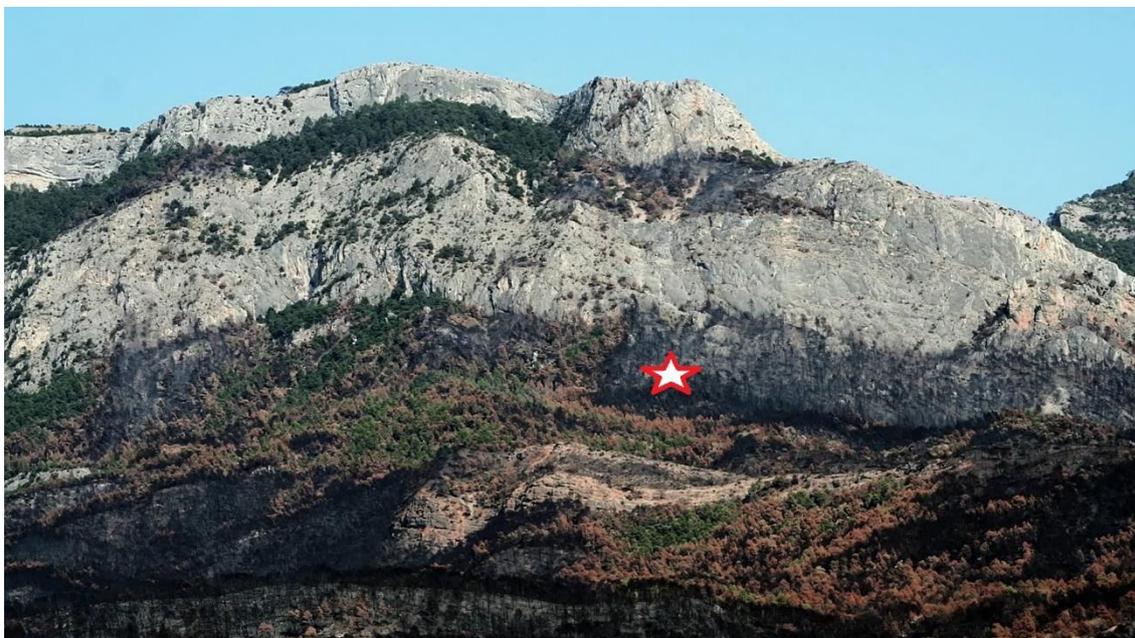
Hora	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento	Dirección del viento
12:00	28.3° C	61%	21.6 km/h	-

Se puede considerar que los valores de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento no son excepcionales. Muestran unas condiciones que pueden facilitar un rápido avance de las llamas pero que en teoría no deben calificarse como “críticas”. Sin embargo, hay un factor clave que puede influir más que los tres citados: la dirección del viento. Según los datos de la estación de Vela Sestrica, en los momentos cercanos a la tragedia el viento tenía una dirección SSE que coincide con la orientación del barranco de Sipnate. Quizás este factor influyese más en lo sucedido que el resto. Además, cabe destacar que en dicha estación se registró también la “abundancia de nubosidad” con un valor de 7 sobre 10, siendo 0 un cielo completamente despejado y 10 uno completamente cubierto de nubes.

Las simulaciones del modelo MM5 de la estructura vertical de la atmósfera mostraron que las condiciones de las capas inferiores de la troposfera eran favorables para una rápida propagación del fuego. La estratificación de estas capas permitió que se produjeran corrientes ascendentes de aire. De repente, se observa cómo las velocidades del viento en los primeros 200 metros de altura se aceleran hasta los 14 m/s. Este hecho provocó una corriente en chorro de bajo nivel con una cizalladura vertical del viento muy pronunciada. Altos valores de energía cinética denotan fuertes turbulencias en este estrato. Posteriormente, y según la simulación, se formó encima de esta capa (primeros 200 metros sobre el nivel del mar) otra de inversión térmica cuyo grosor aproximado era de 300 metros. Esto provocó que cesara el movimiento de corrientes ascendentes en la capa inferior y por tanto las velocidades del viento en la zona de inversión se redujeron, cambiando su dirección a S (Stipanicev, 2008).

6. HORTA DE SANT JOAN, 2009

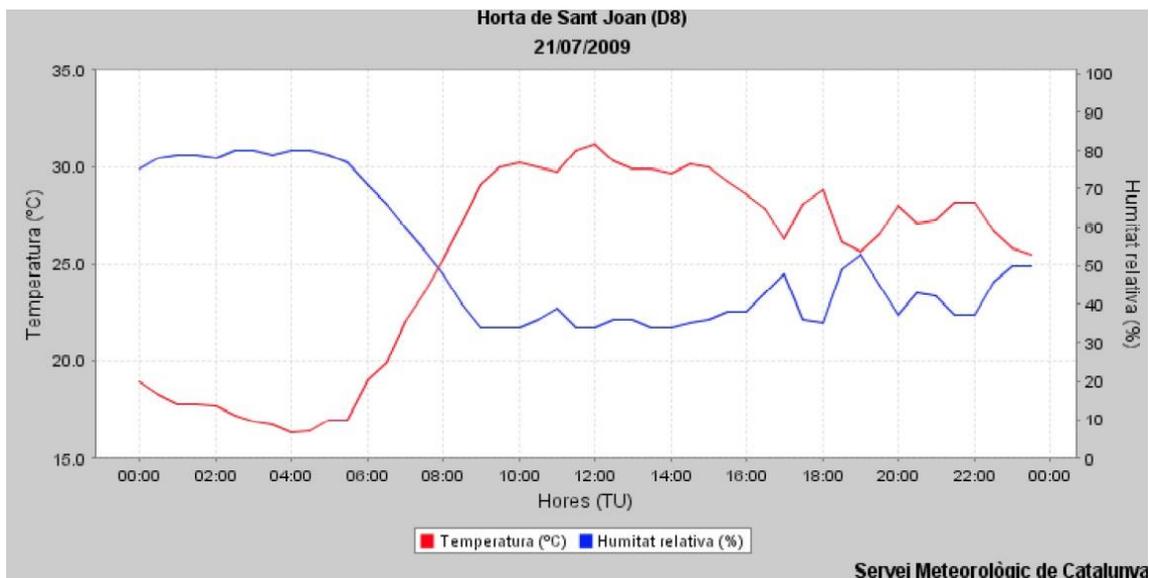
El lugar en el que perecieron los cinco bomberos de GRAF Lleida se ubicaba en una pronunciada ladera (con pendientes superiores al 50%) que daba lugar a una gran pared de roca antes de coronar la cima de la montaña. Se puede observar en la siguiente imagen:



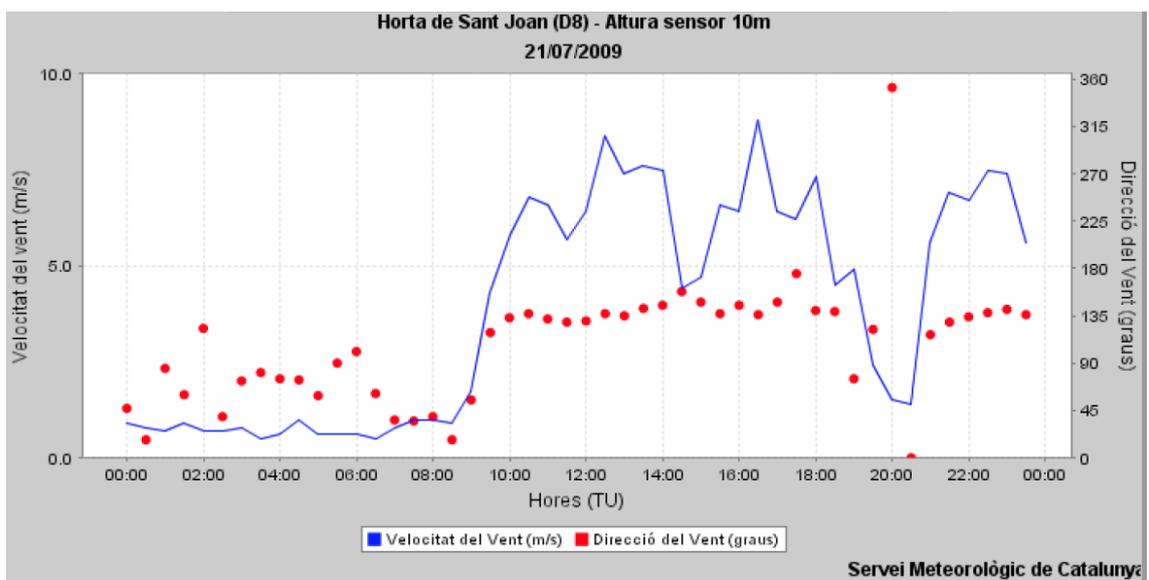
Lugar del atrapamiento, con la ubicación exacta marcada.

La vegetación del perímetro se puede dividir en dos zonas. La primera, donde se inició el foco secundario, era una masa mixta de *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Quercus ilex* y *Quercus faginea*. Las alturas predominantes corresponden a los pinos, en cambio, la densidad arbustiva del estrato dominado está protagonizada por encinas y robles. Se trata de un modelo de combustible 4, según la clasificación de Rothermel. Existía un denso estrato arbustivo que hacía la zona impenetrable. (Lo Forestalillo, 2010).

En cuanto a las variables climáticas, se adjuntan los datos del Servei Meteorològic de Catalunya recogidos el día del suceso:



Gráfica de temperatura y humedad relativa para el día 21.

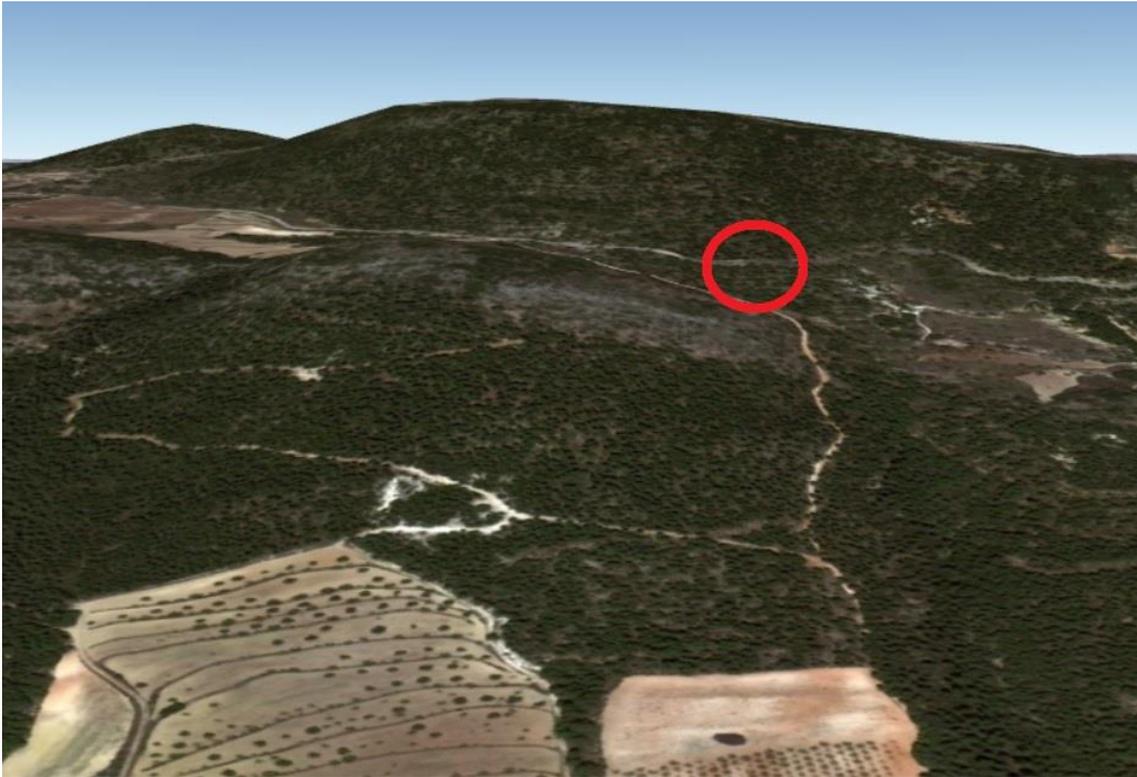


Gráfica de velocidad y dirección del viento para el día 21.

A la hora del incidente, entorno a las 15:20 horas, se pueden recoger los siguientes datos aproximados: temperatura de 29°C, humedad relativa que rondaba el 40% y un viento racheado superior a los 20 km/h. Estas condiciones climáticas se pueden considerar óptimas para la extinción, por tanto, no pueden relacionarse directamente con el fenómeno.

7. TORREMANZANAS, 2012

El lugar de los hechos es una ladera de pendiente pronunciada y altas cargas de combustible. La longitud total es de aproximadamente un kilómetro, y termina coronando una montaña de unos 1090 metros de altitud. Se puede apreciar en la siguiente ortofoto, que se ha tomado del histórico de Google Earth, a fecha de junio de 2012 (dos meses antes del incendio):



Ortofoto de la ladera en la que ocurrieron los hechos. En rojo, la ubicación donde fueron encontradas las dos víctimas.

Tomando la totalidad de la ladera y la diferencia de cotas, se puede decir que la pendiente media es del 22% aproximadamente. Sin embargo, hay que matizar que cuando comenzó la deflagración el fuego ya había ascendido un pequeño tramo. Según diversas fuentes, el frente se encontraba a unos 400 metros de los bomberos en el momento de su llegada. Teniendo en cuenta el punto donde fueron alcanzadas las víctimas, la pendiente media de este tramo es del 40%. Según diversos expertos que han visitado el lugar, hay partes de este recorrido con inclinaciones cercanas al 100%.

Otro aspecto a tener en cuenta es la orientación de esta ladera, que se corresponde por completo a la parte de la solana, directamente enfocada al sur. Esto provoca que la vegetación existente tenga bajos contenidos de humedad al recibir los máximos de radiación solar.

En cuanto a la vegetación presente, existía un matorral denso bajo arbolado (*Pinus halepensis*), con una continuidad de combustible tanto horizontal como vertical. Al lugar se le puede asignar una combinación de los dos siguientes modelos de combustible, según la clasificación de Rothermel:

Modelo 4 → “Matorrales de unos 2 metros de altura, repoblados o regenerados jóvenes densos. Propagación del fuego por las copas del matorral, que forma un estrato continuo. Carga de combustible entre 25 y 35 t/ha” (Rothermel, 1976).

Modelo 7 → “Bosque de coníferas con sotobosque compuesto por matorral menor a 2 metros de altura. Propagación por matorral, aunque puede pasar a las copas de los árboles. Cargas entre 10 y 15 t/ha” (Rothermel, 1976).

Las previsiones meteorológicas que se manejaban para ese día, en ese lugar concreto del incidente y en el intervalo horario del momento de la deflagración, se adjuntan en la siguiente tabla:

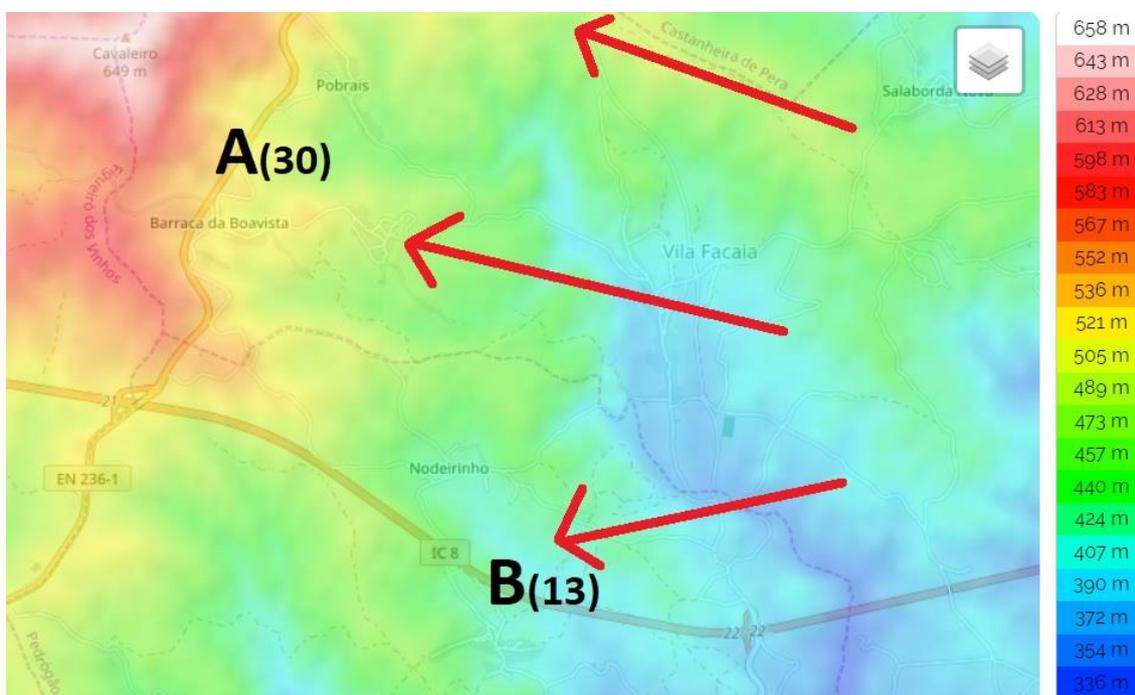
Tabla 4. Datos de la previsión meteorológica para el lugar del incidente en el momento en que se produjo.

Hora	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento	Dirección del viento
16:00/17:00	32°C	20%	25 km/h	N

Los valores adjuntados muestran una situación adversa para el control o extinción de un incendio forestal. El viento moderado empujaba el fuego en dirección a la ladera, y las condiciones de temperatura, humedad relativa y radiación solar (primera hora de la tarde con el cielo despejado, orientación sur) provocaron que el combustible vegetal presentase bajos contenidos de humedad. Si a esto se le suma que los meses anteriores fueron muy secos y calurosos, se puede presuponer que la vegetación presente estaba muy seca y por tanto era susceptible de arder con altas velocidades de propagación.

8. PEDRÓGÃO GRANDE, 2017

Se va a profundizar principalmente en analizar el fenómeno deflagrante y el área que abarcó. En la siguiente imagen se muestra la topografía del lugar:



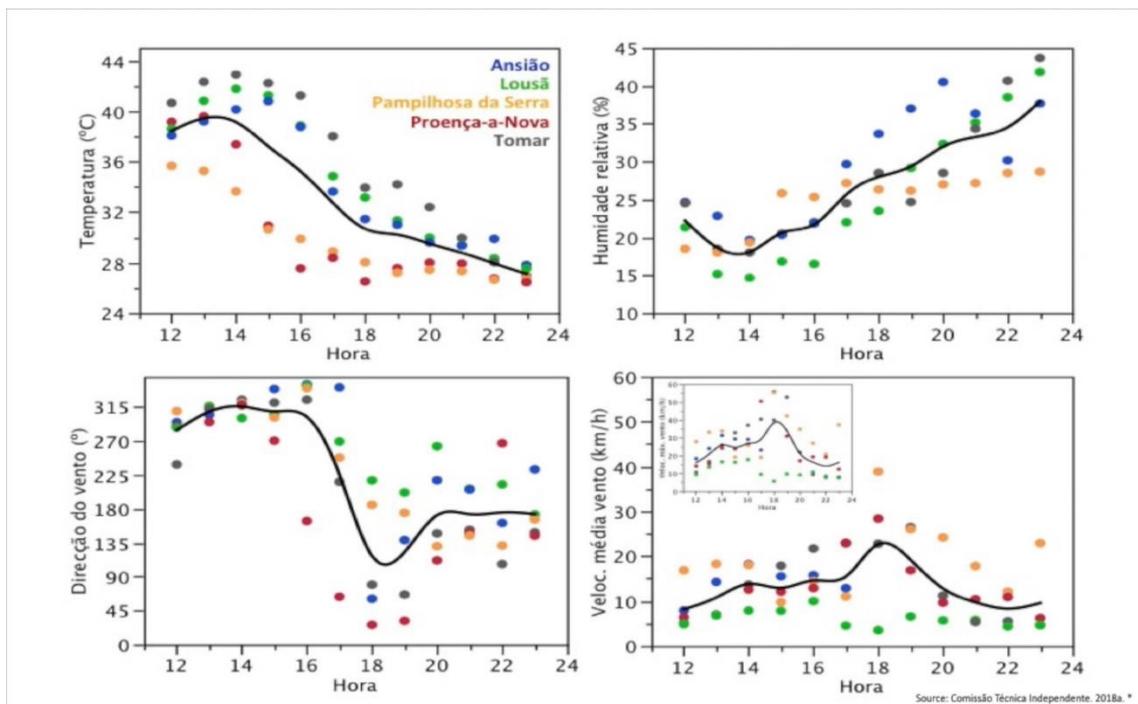
Mapa topográfico del lugar de la deflagración. En negro, se muestran los puntos donde un mayor número de personas perecieron, además de esa cifra. En rojo, la dirección del fenómeno.

En general, se trata de una zona con sucesivas cadenas montañosas de bajo porte. La topografía del lugar se puede catalogar como suave, con pendientes poco pronunciadas. Haciendo un pequeño análisis macroscópico sobre este mapa y en la aplicación Google Earth Pro se obtienen

pendientes máximas del 15%, siendo la media general del 10%, para los puntos A y B. Tampoco se observan pronunciados encajonamientos cercanos que pudiesen propulsar el fuego a mayor velocidad. Por tanto la topografía no debió tener gran influencia en el desarrollo de la deflagración.

El cuanto al combustible vegetal del lugar se trata de una masa boscosa mixta de eucalipto (75%) y *Pinus pinaster* (25%), con una considerable continuidad espacial. Estas especies aparecen debido al suelo pobre y poco profundo que allí se encuentra. Abarcan la mayoría de superficie de la deflagración, teniendo baja presencia agrícola en comparación con los alrededores. La masa adulta era densa, y en el sotobosque se podían encontrar especies inflamables como *Ulex europaeus* o *Calluna vulgaris*, también en altas densidades. Según el Inventario Forestal Nacional de 2010 (IFN6), la carga de combustible del lugar era de 16.3 tn/ha. Teniendo esto en cuenta, se puede asignar de manera intuitiva un modelo 7 según la clasificación de Rothermel: “*matorral de especies inflamables, de 0,5 a 2 metros de altura, situado como sotobosque en masas de coníferas. Propagación por matorral. Carga de 10-15 tn/ha*” (Rothermel, 1972).

Por último, hay que destacar las condiciones climáticas. Según narra Marc Castellnou, uno de los técnicos que suscribe el informe oficial, los datos recogidos aquel día dejaron muy desconcertado al equipo. Se adjuntan los valores más representativos en la siguiente imagen:

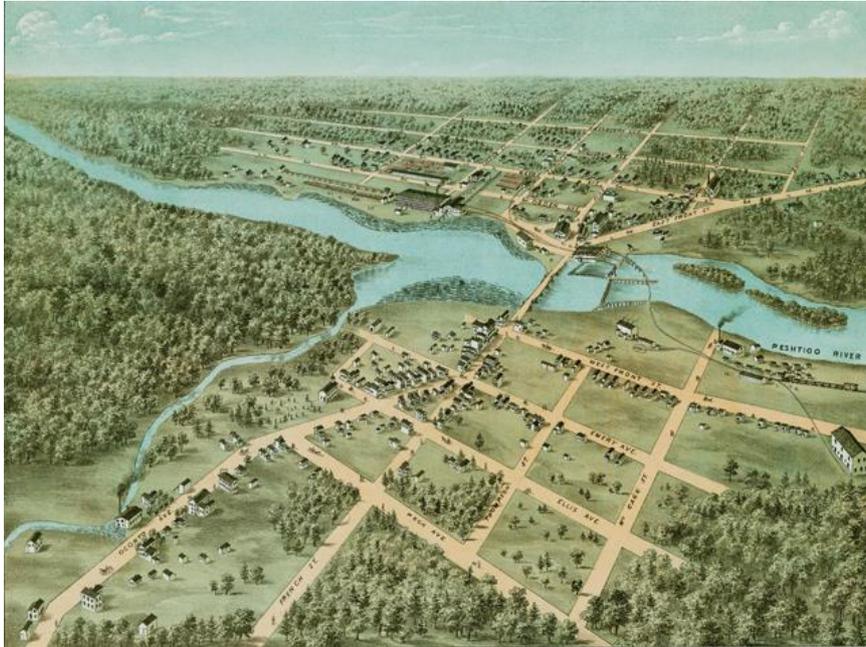


Datos de las 5 estaciones climáticas más próximas al incendio, junto a su media (línea negra).

El desconcierto de los investigadores era obvio. A la hora a la que se produjo la deflagración generalizada (20:00), la temperatura había disminuido por debajo de los 30°C, la humedad relativa superaba el 30% y la velocidad del viento tenía valores aproximados de 15 km/h. Todos estos valores eran mucho menos críticos que las condiciones habidas al inicio del incendio y en sus horas posteriores. Además, cabe destacar que los meses previos fueron muy secos y áridos, por lo que el combustible vegetal tenía bajos contenidos en humedad.

9. PESHTIGO, 1871

Peshtigo, en esa época, se situaba en un claro rodeado por un frondoso bosque de coníferas. Un frío y caudaloso río con idéntico nombre dividía la ciudad en dos mitades de forma equitativa. Se muestra a continuación una representación del lugar realizada en esa época:



Representación gráfica de Peshtigo realizada con anterioridad al incendio.

Se puede observar que se trata de una zona prácticamente llana. Según la aplicación Google Earth, la localidad se encuentra a unos 180 metros sobre el nivel del mar y se hallan en sus alrededores algunos pequeños montículos que no sobrepasan los 210 metros de altura.

En cuanto a la vegetación presente, se trataba de una masa frondosa de coníferas de gran altura. En la actualidad existen en la zona altas densidades de *Pinus banksiana* y *Pinus resinosa*. Algunas de estas masas son bosques mixtos junto a *Quercus ellipsoidalis*, y el sotobosque está compuesto por especies como *Pteridium aquilinum*, *Waldsteinia fragarioides* o *Vaccinium angustifolium* (Anderson, 2006).

Suponiendo que las condiciones de combustible vegetal en 1871 fuesen similares a las actuales podría asignarse, según la clasificación de Rothermel, un modelo número 7: “*matorral de especies inflamables, de 0,5 a 2 metros de altura, situado como sotobosque en masas de coníferas. Propagación por matorral. Carga de 10-15 tn/ha*” (Rothermel, 1972). Cabe apuntar que se está mencionando la vegetación circundante a la ciudad, pero el fenómeno se produjo también a lo largo del claro en el que se ubican las viviendas, arrasando con todo sin existir prácticamente vegetación en la urbe.

Finalmente, lo único que se menciona al respecto de las condiciones climáticas es que fueron unos días con fuertes vientos provocados por un frente frío situado sobre la zona. Sin embargo, se estima que en la atmósfera del propio incendio se pudieron alcanzar intensidades de 130 km/h (glenallenwater.com, 2019).

ANEJO II

TESTIMONIOS

MANN GULCH FIRE, 1949

- Testimonio de Robert Sallee, uno de los supervivientes, acerca de la situación previa del incendio: *“Eché un vistazo al fuego y decidí que la situación era buena. Estaba ardiendo en la cima de la cresta y deduje que continuaría por ella en su evolución. Pensé que probablemente no quemaría mucho más esa noche porque era el final del periodo de combustión (para ese día), además que parecía tener que superar un gran escollo rocoso para proseguir su evolución”* (Rothermel, 1993).

- Cabe resaltar algunos de los testimonios del capataz de la cuadrilla, Wagner Dodge: *“Después de prender fuego a un rodal de hierba, intenté iniciar otra quema, pero el fósforo se había apagado y al mirar hacia arriba, tenía un área de 100 pies cuadrados en llamas. Le dije al hombre más cercano que esperaríamos unos segundos para tratar de cruzar posteriormente al área quemada”* (Alexander et. al, 2009). *“Cuando el fuego principal llegó a mi área quemada, me tumbé en el suelo de costado (...) y mantuve la cara tan cerca del suelo como pude, mientras las llamas pasaban sobre mí. En estos momentos, hubo tres ráfagas extremas de aire caliente que casi me levantaron del suelo”* (Cooley, 1984). Además, según se lee en el informe de Rothermel (1993), Dodge encendió su fuego con fósforos aprovechando uno de los pequeños intervalos sin viento entre rachas huracanadas. Según relataron los otros dos supervivientes, algo extraño sucedió: el fuego creado por el capataz no siguió la dirección de los fuertes vientos y de la huida del equipo (casi paralela a la cresta), sino que ascendió de manera perpendicular a la cresta, por la línea de máxima pendiente. Es decir, tomaron entre sí una dirección de casi 90° de diferencia.

RIBA DE SAELICES, 2005

- Relato del padre de una de las víctimas, que recibió una llamada a las 17:10 horas de su hijo que aseguró que *“no comprendía qué hacían allí. El incendio era de tal envergadura que ellos no podían hacer nada”* (Alcarria TV, 2015).

- Testimonio del único superviviente, Jesús Abad: *“No pensaba yo que ese fuego... yo creo que nos vio y dijo: vosotros sois míos. Vino a por nosotros. Porque estaba muy lejos, muy lejos... y de buenas a primeras, humo negro, ya de llama y empiezas a temer, y dices esto ya se ha cambiado, se ha vuelto. Y la siguiente vez que volvimos la cabeza asomaban ya las llamas... y ya pues a montar en los coches para salir y ya no nos dio tiempo, ya nos enganchó, era un... una especie, como si fuera una ola gigante, pero en fuego, muy grande”*. (Informe Semanal, 2005).

- Testimonio de uno de los voluntarios que se encontraba próximo al lugar: *“Lo último que vi fue a esos hombres peleando contra el fuego cuerpo a cuerpo. Luego, cuando bajábamos, escuché cuatro explosiones”* (Rodríguez, 2006).

KORNAT, 2007

- Testimonio del único superviviente, Frane Lucic: *“Llegamos a una zona que estaba abierta en el lado sur, y el fuego y el humo comenzaron de repente a tal velocidad que no pudimos escapar, a pesar de que intentamos correr. Nos invadió un calor terrible y simplemente nos quemó. Llevaba mucho equipo encima, así que estaba un poco más rezagado del grupo, detrás de unos compañeros, y tuve un poco más de tiempo para cubrirme la cara y tumbarme boca abajo. Como tenía un casco con visera pude protegerme el cabello y la cara. El fuego y el estallido de calor duraron unos 15 segundos y simplemente nos pasó por encima. No hubo tiempo para reaccionar. Sentí un dolor agudo en mis manos y vi que estaban hinchadas, así que me quedé en el suelo como los demás e intenté contactar con el Departamento de Bomberos de Sibenik. No hubo señal. Escuché gemidos, llantos de auxilio, y vi que todos estaban heridos, pero no me di cuenta de si había algún muerto”* (Nacional.hr, 2007). También declaró que el fuego provino del fondo del barranco situado al sur, y que el sonido que producía era parecido al de un tren en movimiento (Viegas, 2008).

HORTA DE SANT JOAN, 2009

- Testimonio del único superviviente de GRAF Lleida, Josep Pallás: *“Si evidentemente hubiésemos sabido que venía aquello... muchas veces he soñado con cómo escalar esta pared y subirla como fuera o en huir hacia alguna dirección... no éramos conscientes de lo que llegaba, no... tan bestial no (...) La sensación de este sonido de fatalidad, de tren descarrilado, de algo brutal que viene sobre ti como a destruirte... Lo escuchamos cuando estábamos dentro de la fireshelter. Es el peor sonido posible, con la sensación de claustrofobia dentro. Estar encerrado en un sitio escuchando algo que no ves, que no notas, que escuchas pero que no sabes cómo es, no sabes cuándo acabará y lo peor fue sentirlo dentro, pidiendo agua. Porque lo que se escuchaba era bestial (...) La situación de desesperación, cuando vino rápidamente el fuego me puse de pie, giré la cabeza y vi una pared inmensa de fuego a mi derecha (mirando hacia las rocas) y obviamente salí disparado hacia el otro lado. Cuando estas dentro y escuchas y notas lo que notas... es la fatalidad y la suerte”* (TV3, 2017).

- Un miembro de GRAF Barcelona describe así la situación desde su posición: *“Escuchabas más ruido que sentías radiación. Se veía el sol rojo y viento fortísimo. Un sonido impresionante, pasamos mucho miedo”* (TV3, 2017).

- Otro miembro de GRAF Tarragona, que se situaban más alejados hacia el oeste, describen lo siguiente: *“La primera vez teníamos bien claro de donde venía la carrera, pero la segunda no vimos nada. Volvimos a sentir que venía alguna cosa, por el sonido. Más cerca más cerca más cerca hasta que se vuelve a ir. Nosotros estábamos dentro de una burbuja de humo, y solamente escuchábamos el ruido. Pero no sabíamos que pasaba, ni dónde”* (TV3, 2017).

TORREMANZANAS, 2012

- Uno de los bomberos presentes relata así la situación vivida: *“La zona era técnicamente inadecuada para efectuar el contrafuego, y sin embargo el jefe del sector dio la orden al brigadista de empezar la quema (...) Lo que ocurrió es que al instante se formó una bola de fuego que los atrapó, y cada uno intentó salir como pudo (...) aquello era una ratonera y pudo haber sido una carnicería (...) No había escapatoria, uno de los brigadistas salió colgado del espejo retrovisor de un camión de bomberos y otro se dejó arrastrar por la manguera”* (El País, 2012).

PEDRÓGÃO GRANDE, 2017

- Un testimonio de uno de los vecinos de una pedanía cercana a la deflagración se recoge en el informe oficial, y es de gran relevancia para entender lo allí sucedido: *“Alrededor de las 20:00 horas (no puedo precisar la hora exacta) todo se puso totalmente oscuro y poco después vino una gran bola de fuego precedida por un fuerte viento, como un ciclón (...) no se parecía al fuego que ardía en el bosque de pinos circundante sino a un tipo de bomba que estalló de repente. El cielo se abrió en un gran destello y cayeron potentes lenguas de fuego en todas direcciones. Fueron estas lenguas de fuego las que arrasaron con mi pueblo y con los de alrededor”*. Otros testimonios confirman esta descripción: *“La gente hablaba de un sonido ensordecedor de las llamas, y cómo estas habían pasado por encima de sus cabezas”, “Pensé que al estar a dos kilómetros del fuego huiría más rápido que él. Pero me equivocaba”, “Acabo de sacar mi auto de una zanja en la que cayó ayer. Increíblemente, no está afectado por el fuego, mientras que otro coche a 10 metros del mío está completamente destruido”, “Era un verdadero muro de fuego”, “Fue un verdadero infierno. El fuego cayó sobre los eucaliptos y luego se arrastró hasta el suelo”* (Sabado, 2017).

PESHTIGO, 1871

El 20 de octubre un corresponsal del periódico New York Tribune entrevistó a los supervivientes, recogiendo los testimonios en un largo escrito:

“En esta tarde de verano, contemplo el claro más espantoso que jamás haya tenido ante los ojos cualquiera de los mortales. Las calles arenosas brillan con una espantosa claridad y los fragmentos calcinados son todo lo que queda de imponentes edificios y cientos de hogares familiares (...).

Los bosques circundantes estaban intercalados con innumerables claros abiertos, de hierba crujiente y seca, que durante semanas habían ardido con los fuegos que en otoño se intensifican en estas regiones (...) Durante estos incendios, como en otras ciudades, las autoridades y la población pensaban estar bien protegidos. El incendio se extendió hasta las afueras de la ciudad (...), y se prepararon para combatir al enemigo. Aparentemente, todo material inflamable había sido apartado del peligro ese domingo (...).

De repente, durante la tarde de ese domingo, se empezó a percibir un gran ruido y bullicio que se acercaba desde el oeste. El ruido creció en volumen, y se acercaba cada vez más, con crujidos y grandes detonaciones (...) El bosque se sacudió y una gran alarma invadió el pueblo, porque ahora imponentes ráfagas de viento y remolinos provenían de todas direcciones. En un horrible instante, antes de que la expectativa pudiera dar forma al horror, una gran llama se disparó en los cielos occidentales, e innumerables leguas de fuego ardiente penetraron hacia abajo en la aldea, perforando cada objeto que se encontraba a su paso, como un rayo al rojo vivo. Un rugido ensordecedor, mezclado con explosiones de llamas eléctricas que se producían por todo el ambiente, paralizó todas las almas del lugar (...).

No hay disparidad en los testimonios, todos escucharon el primer rugido inexplicable. Algunos afirman que la tierra tembló, mientras unos pocos crédulos confiesan que los cielos se abrieron y el fuego cayó desde arriba (...).

La muchedumbre jadeante se congregó en el río. Corrieron en dirección al puente, pero al verlo en llamas tuvieron que virar y lanzarse a las frías aguas. Unas trescientas personas se sumergieron entre los brazos del agua, balanceándose de un lado a otro, donde se asaron por el cálido aliento de llamas que se cernía sobre ellos. Ardió el cabello de cada cabeza expuesta momentáneamente sobre el agua. (...) La orilla oriental estaba densamente poblada por muertos y moribundos. Un numeroso grupo de personas avanzaba hacia el río desde esta dirección, pero las explosiones se arremolinaban y encontraron a las víctimas, cortando una franja a través de la multitud que huía. (...) La avalancha de gente cayó en la primera explosión. Unos pocos pudieron gatear hasta la ribera de guijarros, pero tan terriblemente desfigurados que la muerte debió ser horrible. No todos pudieron llegar al río; incluso los grupos que cayeron en la poca profunda orilla sufrieron una agonía insoportable. El fuego feroz, sumido en fuertes corrientes en todas direcciones, era lo suficientemente fuerte como para incendiar la ropa. La arena voladora, calentada como por un horno, ampollaba la carne allá por donde pasaba. El sofocante “simún” atravesó todo lo que encontró a su paso hasta llegar al río. (...) Sólo se podía percibir las siluetas en medio de un gran resplandor rojo (...).

Las vacas y el resto del ganado, aterrorizadas por el humo y las llamas, se apresuraron en una gran estampida a llegar a la orilla del río. Muchas personas fueron pisoteadas por las reses asustadas (...) Las ardientes maderas del molino, construido en el borde del puente, volaron por los aires y se expandieron sobre la multitud, infligiendo los daños más terribles (...).

En el fervor de la situación en el río, muchos cabellos ardieron y muchos perdieron la vida al tratar de proteger a otros. Los bomberos intentaron salvar alguno de los edificios importantes, conduciendo la manguera desde el río. El calor detuvo instantáneamente el intento, pero no antes de que la manguera, llena de agua, se hubiera quemado en cien partes. Aunque la embestida del fuego y del viento había sido simultánea, y la destrucción casi instantánea, las feroces y sofocantes corrientes de calor atravesaron el aire durante horas. Estas corrientes fueron más fatales que las lenguas de fuego que recorrían la aldea, con una espantosa combinación de viento y llamas. (...).

Las llamas “bailaban” por la atmósfera del lugar con un rugido incesante y ensordecedor. Se produjo un tornado de fuego, pero fue solo momentáneo, sucedido por una vorágine de fuego, humo, cenizas y arena al rojo vivo (...). La lluvia de chispas, ceniza y arena caliente cayó con una fuerza continua y prodigiosa, y tuvo tanto que ver en las muertes como el primer estallido que precedió al fuego (...).

La miserable multitud que se hallaba metida hasta el cuello en el agua, cuanto más tiempo estaban con la cabeza fuera, más fueron perforados y ampollados por esas partículas ardientes. Parecían lancetas de acero al rojo vivo, penetrando en la cubierta más gruesa. La evidencia ahora queda para atestiguar la increíble fuerza de las lancetas en llamas. Todavía quedan mangos de arado de duro hierro, perforados como por bolas muy pequeñas, y en su mayor parte sin quemar (...).

Los resistentes leñadores no suelen exagerar, y la similitud perfecta de cada testimonio e incidente confirma cada episodio de esta tragedia (...). Se encontraron grupos de cadáveres (...) que habían sido golpeados por la explosión en plena huida (...). Las ardientes explosiones de la noche los habían dejado irreconocibles a la llegada de la luz del día.

A través de los sólidos bosques, una franja limpia de tocones y raíces ennegrecidas marcó el curso de las ardientes tempestades. Los caminos estaban llenos de ganado asado, y con frecuencia con cadáveres de osos y ciervos (...). En muchos casos, los restos humanos se distinguían de los animales sólo por los dientes (...). La matanza no resultó de ninguna infracción u omisión por parte del hombre (...) ni se contribuyó a la devastación más completa en los anales

de la historia (...). La inmensidad de la destrucción material de Chicago sobrepasa esta devastación, pero Chicago, con todos sus problemas, no tiene dos tercios de sus ciudadanos que declarar como muertos (...).

Junto a uno de los hombres que sufrió esa noche de destrucción, deambulé por la bonita llanura ascendente donde Peshtigo extendió sus prósperos comercios y hermosas viviendas. Salvo donde se construyeron las casas con sótano, lo cual era muy raro, no hay rastro alguno de viviendas. Aquí y allá hay restos metálicos de máquinas de coser y piedras desmenuzadas (...) Un mortero ennegrecido se encuentra en una confusa mezcla de vidrio fundido y plomo, listo para una nueva decocción (...). La pérdida material se estimó en 3 millones de dólares” (Sewel, 1871).

ANEJO III

IMÁGENES ADICIONALES

- MANN GULCH FIRE, 1949

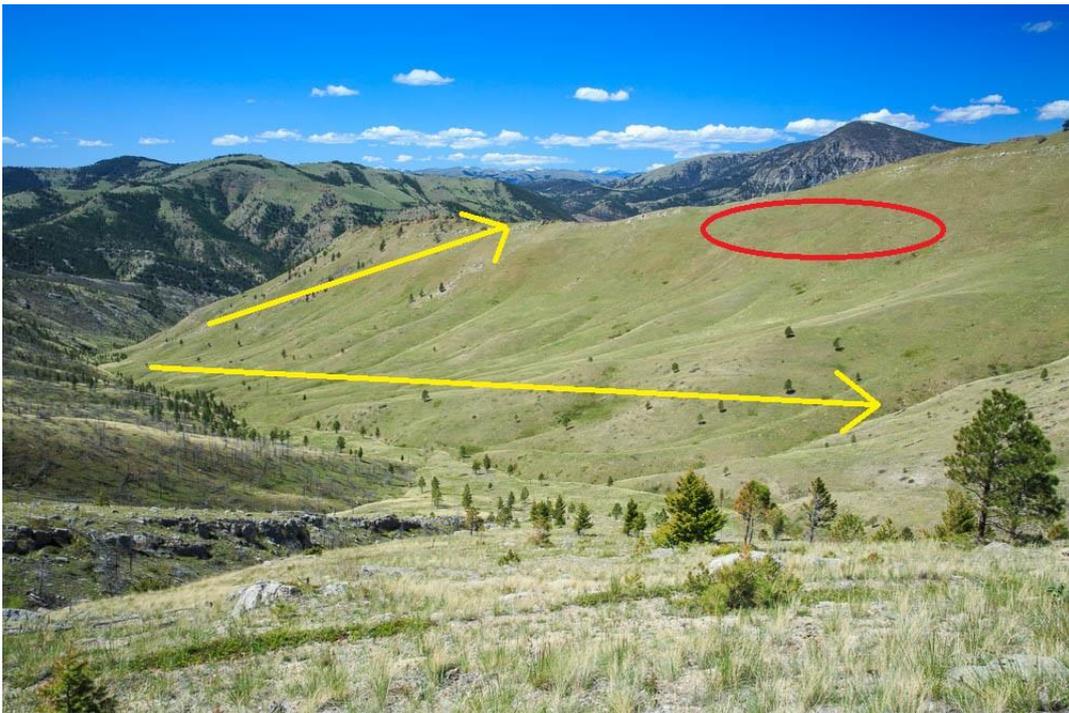


Imagen 1. Barranco de Mann en la actualidad. En amarillo, el área abarcada por la deflagración. En rojo, la ubicación aproximada donde perecieron los 13 bomberos.



Imagen 2. Barranco de Mann años antes de la tragedia.

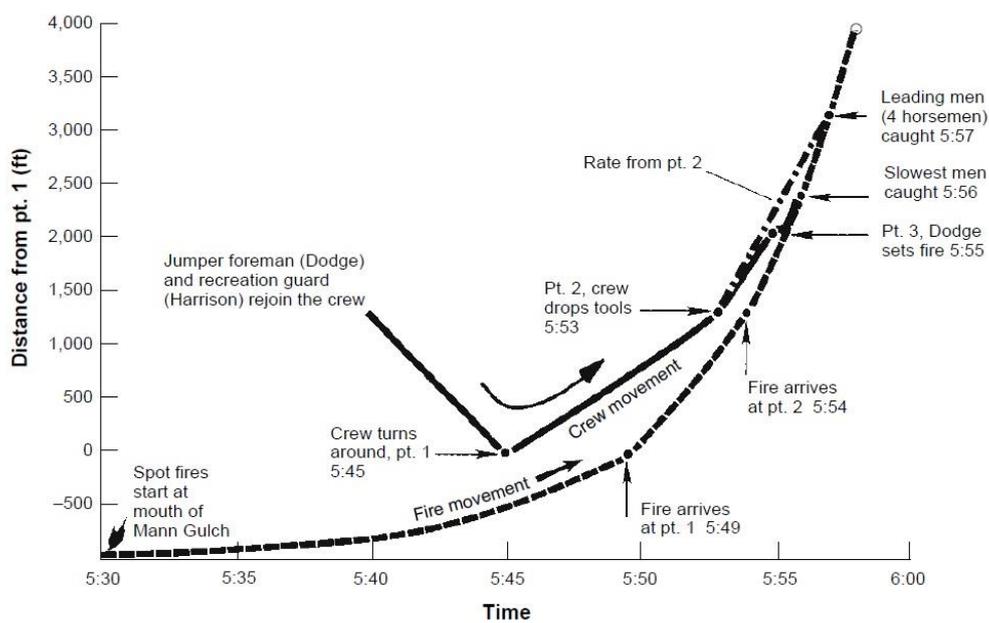


Figure 2—Distance and time graph of the estimated positions of the crew and the fire. Distances are estimated from the crew's turnaround at point (pt.) 1. The slopes of the lines indicate the rate of movement; the steeper the line, the faster the rate.

Imagen 3. Gráfica relativa al avance del fuego y del grupo de bomberos (Rothermel, 1993).

- **MILLARES, 1994**



Imagen 4. Disposición de los vehículos afectados (Pons, 2007).



Imagen 5. Estado del Land Rover. Fotografía tomada días después del incidente.

- **RIBA DE SAELICES, 2005**



Imagen 6. Imagen tomada instantes antes de la llegada del retén. En rojo, el lugar donde plantearon las labores de extinción.



Imagen 7. Situación del incendio antes de la llegada del retén. En rojo, el lugar donde plantearon la defensa. Se observa en la parte superior derecha el avance del nuevo frente, el cual les atrapó.



Imagen 8. Uno de los vehículos afectados por la deflagración.



Imagen 9. Se observa la posición de la motobomba tras la cual se refugió J. Abad y se observan los límites de la DSG, con vegetación sin arder a ambos flancos.

- **KORNAT, 2007**



Imagen 10. Barranco de Sipnate desde la vertiente sur del monte Veli. En azul, la balsa de agua. En negro, donde aterrizaron los bomberos. En rojo, el lugar en el que perecieron. Imagen tomada el día posterior a la tragedia (HRTV1, 2015).



Imagen 11. Captura extraída del documental de HRTV1 sobre de la tragedia. Al parecer, esta es la última fotografía tomada por el equipo, instantes antes de la deflagración.

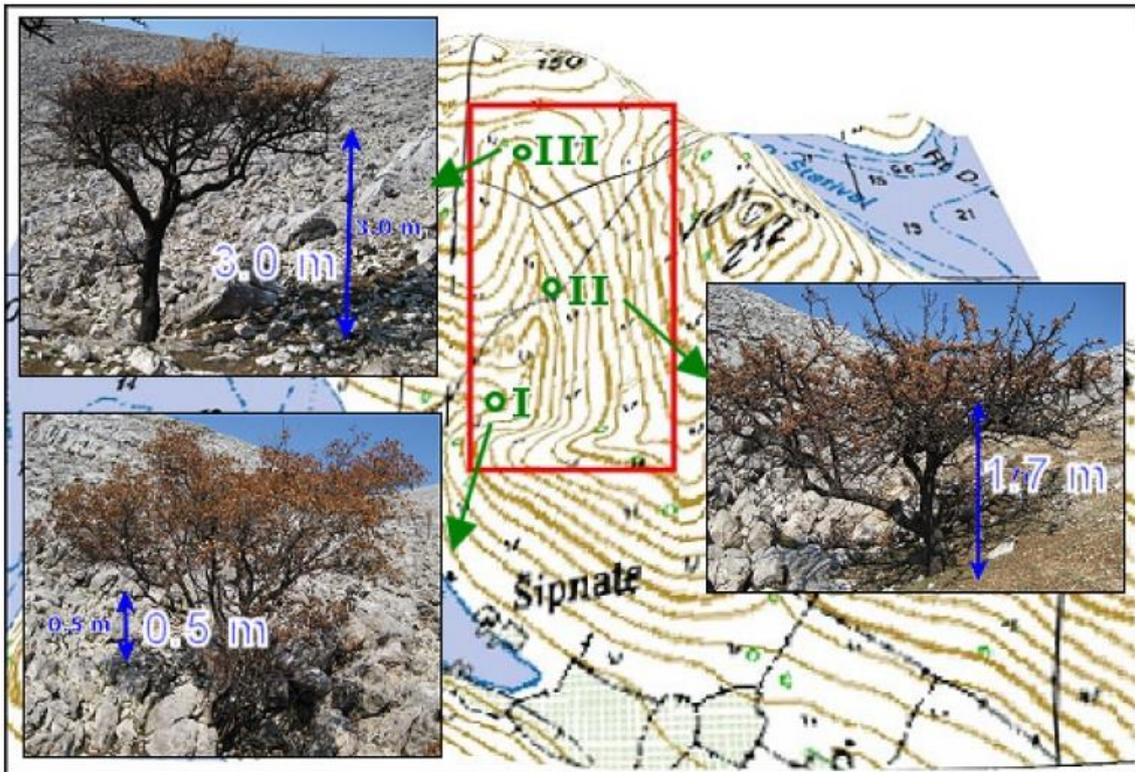


Imagen 12. Mapa topográfico del barranco de Sipnate con la ubicación de los tres árboles afectados. Se pueden observar fotografías de cada uno, así como la altura afectada por las llamas (Viegas, 2008).



Imagen 13. Parte superior del barranco de Sipnate. Se muestra el lugar del accidente y, en verde, el área que no ardió. Fotografía tomada en septiembre de 2007 (Stipanicev, 2008)

- **HORTA DE SANT JOAN, 2009**



Imagen 14. Lugar del atrapamiento en la mañana del día 20 de julio. Se pueden observar los puntos calientes que aún quedaban activos.



Imagen 15. Situación de los bomberos GRAF en el escenario del incendio.



Imagen 16. Fotografía tomada por GRAF Lleida minutos antes de la tragedia.



Imagen 17. Posible deflagración que acabó con la vida de los bomberos (TV3, 2017).



Imagen 18. Deflagración captada en otra ubicación del incendio.

PEDRÒGÃO GRANDE, 2017



Imagen 19. Carretera N236-1, bautizada como "carretera de la muerte".



Imagen 20. Vehículo afectado por la deflagración en la NE 236-1.



Imagen 21. Carretera NE 236-1 a la altura del paso de la deflagración. Foto actual (2019).

ANEJO IV

MULTIMEDIA

Vídeo 1

Inside the fire → https://www.youtube.com/watch?v=zvPa_yEEd4E

Experimento realizado por el International Crown Fire Modeling Experiments in the Northwest Territories, en el año 2000. En los primeros 25 segundos se muestra la pirolisis de la vegetación y como prenden por efecto de la radiación emitida por el frente (Flashover).

También parece haber pequeñas explosiones de gases que propulsan el incendio hacia delante, alcanzando temperaturas superiores a los 1000°C.

Vídeo 2

Backdraft en cámara 4k → <https://www.youtube.com/watch?v=ZyCCWuO0mQo>

En el video se puede apreciar en cámara lenta, a partir del minuto 7:00, el fenómeno del backdraft. Se produce unos 15-20 segundos después de que los bomberos abran la ventana del contenedor incendiado.

Vídeo 3

El gran silenci de l'Horta → <https://www.youtube.com/watch?v=Mf3bjlrCKsM&t=5140s>

En este documental se puede observar (minuto X, Y, Z) la acumulación de gases previa a la deflagración en la posición de los GRAF. Además de las imágenes adjuntas, se pueden observar otras relativas al incendio y a sus efectos en la zona.

Vídeo 4

Accidente mortal incendio Alicante 2012 → <https://www.youtube.com/watch?v=lv8AspoMOlg>

En el vídeo se observa la llegada del convoy al lugar del atrapamiento en el Camí de les Covetes. A unos cuantos cientos de metros, se observan llamas de gran intensidad pero bajas velocidades de avance. Esta filmación muestra lo peligrosa que era la situación a la llegada de los bomberos.

Vídeo 5

Incendio forestal en Pedrógão Grande → https://www.youtube.com/watch?v=SRacxH-Yd_I

Vista aérea de dron el día posterior a la tragedia. En estas filmaciones se observan la gran mayoría de copas sin arder, además del mosaico de zonas quemadas intensamente y otras que no han sido afectadas por las llamas.

Vídeo 6

Dron graba incendio de Pedrógão Grande → <https://www.youtube.com/watch?v=wMjdzSltJ3g>

Otra vista aérea desde un dron. En este video se puede observar con mayor claridad el estado de alguno de los vehículos.

Vídeo 7

Incendio de Bargaat, 2007 → <https://www.youtube.com/watch?v=ULNIVaQM6As>

En esta filmación se puede observar una gran deflagración de una extensa área de pinos, de manera prácticamente súbita.

Vídeo 8

Incendios Australia 2019 (NSW) → <https://www.youtube.com/watch?v=SgC6XE1DdB0>

Se observa una gran deflagración en el área boscosa, que posteriormente se transforma en diversas explosiones de fuego y humo en dirección tangencial a las copas.