

# Un Sistema Integrado para Evaluación Estática y Dinámica de Riesgos a Nivel Nacional<sup>1</sup>

Paolo Fiorucci,<sup>2</sup> Francesco Gaetani,<sup>2</sup> Riccardo Minciardi<sup>2,3</sup>

## Resumen

En esta ponencia, se presenta un planteamiento integrado para la evaluación del riesgo de incendios forestales en una extensa zona geográfica. Dicha evaluación tiene por objeto apoyar decisiones relativas a la planificación a largo plazo y a las fases preoperativas. La evaluación de riesgos se realiza tanto en situaciones estáticas como dinámicas. La información utilizada para la evaluación de riesgos es pertinente para el peligro y para la vulnerabilidad y el coste de los elementos expuestos. La evaluación de riesgos se realiza, en el caso dinámico, mediante el uso de una cascada de dos modelos, haciendo el primero el seguimiento del contenido de humedad de la materia combustible fina muerta disponible y proporcionando el segundo una estimación de la propagación potencial y de la intensidad lineal de un incendio posiblemente iniciado en la celda. Los dos modelos se basan en información meteorológica (tiempo real y previsión) y en información territorial almacenada en una base de datos GIS. Por el contrario, en el caso estático, la evaluación de riesgos está basada en un profundo análisis de los incendios ocurridos históricamente en cada celda.

## Introducción

Desde la más remota antigüedad un gran número de incendios incontrolados han quemado el bosque mediterráneo. De hecho, a lo largo de los siglos, la necesidad de sostener a la población creciente ha alterado el equilibrio original del hábitat natural. Una gran cantidad de zonas boscosas fueron destruidas con el ánimo de crear espacio para nuevos asentamientos, pastos y cultivos agrícolas. Más adelante, en la era industrial y los consiguientes asentamientos urbanos de grandes dimensiones transformaron el territorio de forma espectacular. A este respecto, las zonas boscosas eran los lugares donde las poblaciones mediterráneas encontraban los materiales y la energía (leña, madera y lignito) que necesitaba la industria. Actualmente, en plena era del petróleo, los bosques han perdido su importancia, pero como consecuencia del crecimiento urbano, la población que vive dentro o cerca de zonas con vegetación o bosques ha aumentado. En contrapartida, la población rural ha disminuido y,

---

<sup>1</sup> Una versión abreviada de este trabajo se presentó en el segundo simposio internacional sobre políticas, planificación, y economía de los programas de protección contra incendios forestales: una visión global, 19–22 Abril, 2004, Córdoba, España.

<sup>2</sup> Centro di Ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale, Universidad de Génova. Via Cadorna, 7- 17100 Savona, Italia.

<sup>3</sup> Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Telematica, Universidad de Génova. Via Opera Pia, 13 - 16145 Genova, Italia.

actualmente, una población creciente sin ningún conocimiento un rural o agrícola vive en zonas boscosas y las visita percibiéndolas únicamente como zonas de descanso y placer.

A este respecto, la presencia procede de dos usos distintos de la tierra, separados por una frontera, que separa los entornos naturales de los asentamientos humanos. Por tanto, no debería sorprender la constatación de que la máxima frecuencia de declaración de incendios forestales se produzca a lo largo de esa frontera, es decir, en las llamadas interfaces urbanas con tierras sin cultivar (Wildland Urban Interfaces - WUI). De hecho, donde las zonas urbanas periféricas entran en contacto con zonas agrícolas productivas o zonas abandonadas, surge una situación de serio peligro, por ejemplo relacionada con las prácticas agrícolas que requieren generalmente la provocación de incendios en la proximidad de zonas ricas en biomasa y cerca de zonas habitadas. Realmente, en algunas regiones, la frecuencia de incendios y los efectos que tienen sobre el hábitat natural y las actividades humanas hacen que los incendios incontrolados representen el riesgo natural más notable, agravado por la complejidad de la organización necesaria para controlar dicho riesgo y luchar con eficacia contra un incendio forestal activo.

Se pueden hacer algunas observaciones preliminares relativas a terminología, ya que, de hecho, los términos *riesgo* y *peligro* en la literatura se consideran casi equivalentes. Por el contrario, en esta ponencia se utilizará el término peligro para designar la distribución física de las condiciones que favorecen una declaración de incendio potencial, independientemente de la presencia en el territorio de un *elemento expuesto*. El primer término se utilizará para designar el conjunto de entidades que pueden ser víctimas de una fuerza externa (en este caso un incendio) y sufrir daños. Naturalmente, los elementos expuestos están relacionados con vidas humanas, asentamientos, actividades industriales, infraestructura y también zonas pobladas de fauna. Para analizar el impacto de una fuerza externa sobre un elemento expuesto, es necesario tener en cuenta la *vulnerabilidad* del elemento. Entonces, el riesgo al que está sometido un elemento expuesto se puede evaluar sobre la base del peligro existente, de la vulnerabilidad del elemento y de cierta medida del valor del propio elemento.

Al menos en las zonas mediterráneas, la declaración de un incendio en una zona con vegetación es imputable en la práctica totalidad de los casos a actividades humanas (bien como una acción voluntaria o como una consecuencia involuntaria de las actividades humanas) y, por tanto, no reconocible propiamente como un suceso natural. Sin embargo, la propagación de un incendio declarado resulta muy influenciada por las características (topográficas, de vegetación, etc.) del territorio afectado, así como por las condiciones meteorológicas y las condiciones de la materia combustible (especialmente por lo que se refiere al contenido de humedad). Realmente, está claro que es incorrecto pensar en términos de prever las declaraciones de incendios y que por el contrario parece sensato evaluar y prever el peligro de que un incendio iniciado (de alguna manera) pueda encontrar condiciones favorables para su propagación y, por tanto, las consecuencias de dicha incendio sobre el sistema territorial (elementos expuestos).

El objeto de esta ponencia es proporcionar un primer desarrollo de un sistema integrado para apoyar decisiones relativas a la planificación a largo plazo y a las fases preoperativas dirigidas a reducir el impacto de los incendios incontrolados sobre el territorio. Con este fin, se considera en primer lugar la evaluación del peligro tanto desde el punto de vista estático como desde el dinámico. Luego, se presenta una

posible manera de evaluar el riesgo correspondiente a una sola unidad territorial y, sobre esta base, se definen los problemas de optimización con objeto de formalizar el proceso de toma de decisiones mencionado anteriormente.

## La evaluación del peligro

Igual que ocurre en relación con otras clases de riesgos naturales, la evaluación del peligro de incendios forestales se puede hacer comenzando dentro de tres estructuras conceptuales distintas. En la primera, que se puede denominar evaluación *estática del peligro*, la evaluación y la distribución del peligro sobre el territorio se realiza sobre la base de información topográfica y de uso de la tierra (incluida la capa de vegetación), clima, posiblemente considerado para las distintas estaciones, y condiciones medias de la materia combustible (es decir, vegetación), de nuevo referidas a las diversas estaciones. La evaluación estática del peligro también se tiene que basar en el análisis de los datos disponibles de series históricas correspondientes a incendios forestales ocurridos en la región considerada.

El objeto de dicha evaluación podría ser proteger el bosque contra los incendios y planificar las dimensiones y la posición de las distintas clases de recursos (hombres, camiones, motores, aviones, infraestructuras, etc.) necesarios para gestionar el riesgo de incendios en un amplio territorio. Otro objetivo de dicho análisis podría ser obtener indicaciones sobre el uso de la tierra y la planificación urbana en una zona regional pequeña o media. Realmente, el diseño y la asignación en zonas protegidas o naturales de infraestructuras dedicadas a emergencias de incendios forestales constituye un grave problema debido a la necesidad de limitar el impacto sobre la fauna así como a los costes de construcción y mantenimiento. La gestión de las operaciones de extinción en tierra requiere una amplia gama de instalaciones y una perfecta coordinación entre los elementos que intervienen en la fase de emergencia. Además, es necesario asegurar una acción continua de los recursos de emergencia y por tanto es fundamental diseñar un sistema global capaz de proporcionar un suministro continuo de agua cuando y donde es necesaria.

Dentro de la segunda estructura, que denominaremos evaluación *dinámica del peligro*, se supone que hay disponible información en tiempo real y que la evaluación del peligro se realiza en relación con un cierto período de tiempo (por ejemplo dos o tres días) para el cual hay disponibles previsiones meteorológicas fiables. Junto con la información de previsiones, la información en tiempo real utilizada para la evaluación dinámica del peligro puede proceder de distintas fuentes: condiciones meteorológicas presentes, datos medidos al nivel del terreno relativos a las condiciones de la vegetación, datos procedentes de satélites o sensores atmosféricos (de nuevo referidos principalmente a las condiciones de la vegetación). Con un ligero abuso de terminología, en lo que sigue el término “información en tiempo real” incluirá también las previsiones meteorológicas para el breve período de tiempo durante el cual se evalúa el peligro de incendio forestal.

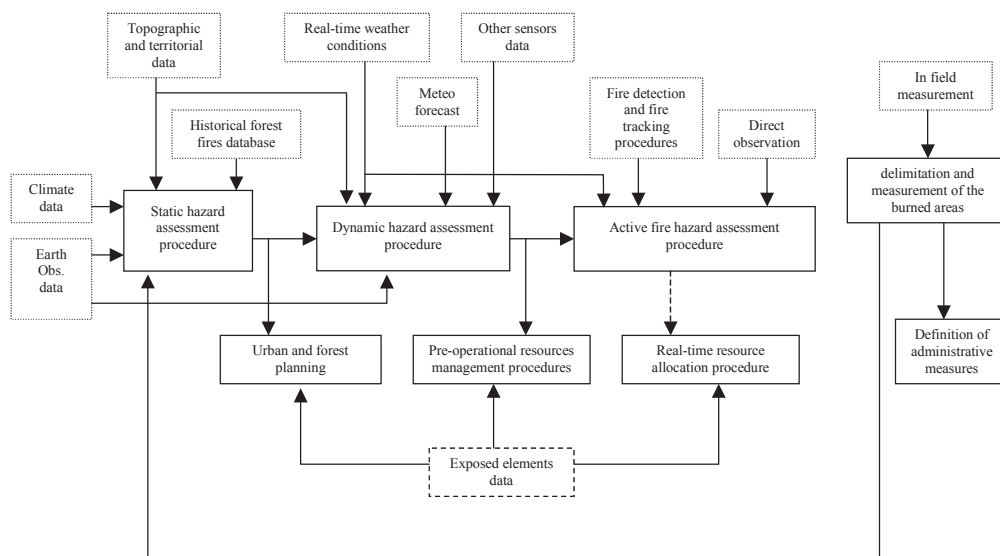
La principal ventaja de una evaluación dinámica del peligro es la identificación, dentro del territorio considerado, de las zonas expuestas al peligro más alto y los intervalos de tiempo dentro del período de tiempo considerado en el que este peligro tiene lugar. El objeto de la evaluación dinámica del peligro es conseguir información fiable y útil para emprender cierto número de acciones preoperativas diversas capaces de reducir el impacto de un incendio declarado sobre el territorio considerado, dentro

del período de tiempo considerado. Dichas acciones pueden incluir, por ejemplo, cambiar de posición de los recursos disponibles sobre el territorio, poner en servicio recursos en período de descanso, alertar a las autoridades locales o responsables de situaciones de emergencia, establecer prohibiciones de algunas prácticas agrícolas peligrosas (como la quema de rastrojos) y patrullar las zonas afectadas por el peligro más alto.

Finalmente, la tercera estructura es la correspondiente a una situación en la cual se han detectado algunos incendios activos, existiendo el problema de seleccionar las mejores acciones para combatir dichos incendios, teniendo en cuenta la información correspondiente a la distribución de peligros sobre el territorio considerado. En este caso, se tiene que realizar una evaluación del peligro que sea pertinente para cada incendio detectado. Sobre esta base, se puede aplicar un procedimiento de toma de decisiones operativas con objeto de apoyar a los responsables de la toma de decisiones para tomar las correspondientes a las acciones a emprender con objeto de contrastar efectivamente o extinguir los incendios detectados.

Resumiendo, para cualquiera de las tres estructuras mencionadas anteriormente, es necesario considerar una fase de procesamiento cuyo objeto es realizar alguna evaluación del peligro, seguida de una fase orientada a la toma de decisiones cuyo objetivo es la selección de las mejores acciones a emprender sobre la base de la información disponible. Lo que distingue las tres estructuras, que se pueden llamar niveles de procesamiento de información/toma de decisiones, es el período de tiempo que caracteriza su operatividad y la información disponible. Evidentemente, la información generada a cualquiera de los niveles se pasa al nivel subsiguiente.

Para completar el cuadro, se puede añadir un cuarto nivel al esquema conceptual resumido anteriormente, relativo al procesamiento de información y a la toma de decisiones, después de haber extinguido un incendio. Realmente, las acciones correspondientes a dicho nivel tienen una importancia considerable en la gestión del riesgo de incendios forestales, pero en conjunto, su examen está más allá del alcance de la presente ponencia.

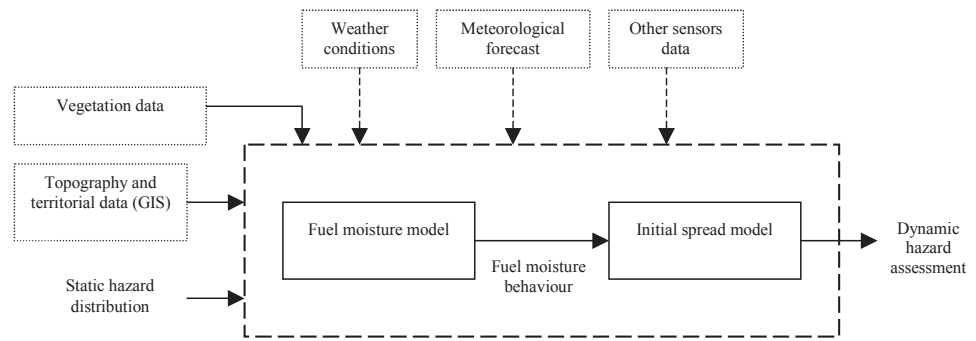


**Figura 1**—Esquema conceptual de la evaluación del peligro de incendios incontrolados. Cada bloque de líneas continuas representa un procedimiento (o módulo del sistema), mientras que los bloques de líneas de puntos representan una información de entrada o salida y las líneas representan flujo de la información (incluida naturalmente la información correspondiente a las acciones que se tienen que emprender)

En esta ponencia sólo se consideran las dos primeras estructuras, mientras que la evaluación del peligro en tiempo real y la fase posterior al suceso no se consideran. Esto significa que se explican los procedimientos de evaluación estática y dinámica de peligros para las fases de planificación y preoperativa, además de los problemas y políticas pertinentes para mitigación del riesgo esperado o previsto, para una zona determinada, y para un conjunto determinado de elementos expuestos.

### **La evaluación dinámica del peligro**

Para facilitar la presentación, es conveniente presentar este módulo antes que el módulo de evaluación estática de peligros. La estructura del módulo considerado se puede representar como en la figura 2. La estructura ilustrada en esta figura muestra que el módulo global se puede descomponer en dos modelos, es decir el modelo de humedad de la materia combustible y el modelo de propagación potencial del incendio. La función del modelo de humedad de la materia combustible es representar el comportamiento dinámico de la distribución sobre el territorio, de la variable que expresa el contenido de agua de la materia combustible que es más afectada por el proceso de combustión. El segundo modelo se utiliza para describir cuantitativamente el comportamiento de un incendio iniciado, sin tener en cuenta cualquier posible acción de extinción. Dicho modelo no se utiliza para obtener una previsión del proceso de propagación de un incendio dado, sino sólo para evaluar el riesgo potencial después de una posible iniciación.



**Figura 2** - Una representación esquemática de la estructura del módulo de evaluación dinámica del peligro de incendio forestal.

La información que pueden utilizar los dos submodelos representados en la figura 2 es parcialmente estática y parcialmente dinámica. Es decir, la información estática corresponde a datos topográficos y territoriales (orografía, uso de la tierra, red vial, etc.), que se puede obtener mediante un sistema de información geográfica (GIS) y a la capa de vegetación de las zonas consideradas. El último tipo de información se puede considerar estática, incluso en relación con la densidad de la biomasa. De hecho, la dinámica estacional de la biomasa es mucho más lenta que la dinámica de los dos submodelos ilustrados en la figura 2, de modo que se puede pensar razonablemente en considerar la carga media de vegetación para cada estación de interés.

Por otra parte, la información dinámica puede ser de distintos tipos. En primer lugar, puede haber una red de sensores de tierra (pluviómetros, anemómetros, sensores de radiación solar, etc.) capaces de proporcionar medidas en tiempo real de las variables cuya importancia es evidente para la evaluación del peligro de incendio forestal. Para adquirir información relacionada con la humedad del combustible, se pueden utilizar otros sensores. Finalmente, otra fuente de información dinámica la proporcionan también las salidas de un modelo meteorológico, suponiendo que las previsiones a lo largo de un período de tiempo de duración adecuada (por ejemplo, 48-72 horas) se pueden considerar suficientemente fiables.

Las funciones anteriores son discretas en el tiempo y en el espacio. Realmente, es razonable elegir el intervalo de división del tiempo y la retícula de división del espacio en correspondencia con los resultados del modelo meteorológico. Las variables que se determinan para evaluar el peligro de incendio forestal en cada celda de la retícula del espacio son la velocidad de propagación y la intensidad lineal que puede adquirir un incendio (en el caso de que prenda el incendio). La velocidad de propagación se obtiene mediante la aplicación de un modelo, quien no se utiliza para evaluar la dinámica de un incendio dado sino para evaluar las características físicas que puede alcanzar un incendio, en cada celda, sobre la base de las variables locales y la posibilidad de que el incendio prenda y se propague.

En este momento, ya se ha realizado una primera implantación del sistema, que esta basado únicamente en la información proporcionada por las salidas de un modelo de área limitada (LAM) meteorológico y en una base de datos GIS. En cuanto a la LAM, la información utilizada consiste en: la precipitación acumulada [m] en cada intervalo de tiempo de tres horas, la temperatura del aire [K], la temperatura del punto de rocío [K], la velocidad del viento [m.s<sup>-1</sup>] y la dirección del viento [rad]. Además,

se ha utilizado un modelo de evaluación digital (DEM) para definir el valor medio del ángulo de orientación [°], la pendiente [%] y la altitud [m] de cada celda de la retícula.

La información de vegetación disponible para el sistema está organizada en un mapa vectorial de toda la zona. Los datos morfológicos están almacenados en una base de datos GI y son: las cargas de combustible [ $\text{kg m}^{-2}$ ], la altura media de las plantas [m] y la altura de la cresta [m]. Además, las características fisiológicas de las materias combustibles, que son el contenido medio de humedad del tejido estacional [%] de la materia combustible viva está incluido en la base de datos GIS, así como el poder prolífico superior (HHV) estacional medio [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ], tanto para las materias combustibles muertas como para las vivas.

### El modelo de humedad de la materia combustible

La estructura básica del modelo de humedad de la materia combustible propuesto se parece mucho al que corresponde a la ecuación de Byram (Byram, 1963). Sin embargo, la justificación de la estructura es algo distinta y, lo que es más importante, la dependencia de los parámetros del modelo de variables meteorológicas está representada de una forma efectiva y operativa. Es decir, dicha dependencia se estructurará sobre la base de algunas consideraciones sencillas semifísicas, haciendo uso de un conjunto de parámetros de calibración que es posible determinar, con objeto de adaptar los resultados del modelo a las observaciones experimentales. Es necesario hacer una primera observación en relación con el modelo de humedad de la materia combustible propuesto que es que sólo se modela la dinámica de la materia combustible fina muerta. Por el contrario, la humedad de la materia combustible viva se considera prácticamente como independiente del tiempo y proporcionada por valores correspondientes a la capa de vegetación específica y a la estación considerada.

La dinámica de la humedad de la materia combustible fina muerta se representa utilizando, para cada celda  $k$  sobre la zona considerada, un modelo específico que no interactuar con los modelos de las demás celdas, ya que no se representa la propagación del incendio.

Por tanto, si  $u_k^o(t)$  representa la humedad de la materia combustible fina muerta en la celda  $k$ , en el instante  $t$ , se supone que la evolución de la cantidad anterior se rige por la ecuación diferencial

$$\frac{du_k^o(t)}{dt} = K_1 \text{step}(t) - K_2 u_k^o(t) \quad (1)$$

donde el paso  $(t)$  es la función de paso unitario <sup>4</sup>. De hecho, la solución de (1) tiene un comportamiento asintótico determinado únicamente por la relación  $(K_1/K_2)$ , es decir

$$u_k^o(t) = \frac{K_2 u_k^o(0) - K_1}{K_2} e^{-K_2 t} \text{step}(t) + \frac{K_1}{K_2} \text{step}(t) \quad (2)$$

<sup>4</sup> La función paso[x] se define como igual a 1 si  $x = 0$  e igual a 0 en caso contrario.

Naturalmente, el valor a asintótico ( $K_1/K_2$ ) es independiente del estado inicial  $u_k(0)$ , y el comportamiento transitorio disminuye (aumenta) si  $u_k(0) > (K_1/K_2)$  ( $u_k(0) < (K_1/K_2)$ ). Obsérvese que la "constante de tiempo" que caracteriza la velocidad a la cual desaparece el término transitorio en la r.h.s. de (2), viene dada por  $1/K_2$ .

Realmente, debe tenerse en cuenta que la solución (2) de la ecuación (1) sólo es correcta en la hipótesis de la invariancia respecto al tiempo de los coeficientes  $K_1$  y  $K_2$ , que sin embargo, como se explicará más adelante, se tiene que considerar variable en función del tiempo, ya que sus valores dependen de un conjunto de variables meteorológicas. Por consiguiente, el uso de la solución (2) sólo es correcto cuando la dinámica del modelo (1) (que se caracteriza por la constante de tiempo ( $1/K_2$ )) es considerablemente más lenta que la dinámica meteorológica (que determina la variación de  $K_1$  y  $K_2$ ). Sin embargo, el tratamiento discreto de (2) es admisible en cualquier caso, incluso si  $K_1$  y  $K_2$  varían significativamente en función del tiempo. Por esta razón, la dependencia del tiempo (y de la celda  $k$ ) de dichos coeficientes se recordará en lo sucesivo explícitamente mediante la notación.

Se supone que los coeficientes  $K_{1,k}(t)$  y  $K_{2,k}(t)$  son funciones de las variables meteorológicas  $p_k(t)$ ,  $w_k(t)$ ,  $\rho_k(t)$ ,  $\tau_k(t)$ , es decir, de la precipitación acumulada  $p_k(t)$  [m], la intensidad del viento  $w_k(t)$  [ $ms^{-1}$ , rad], la humedad relativa  $\rho_k(t)$  [%], y la temperatura del aire  $\tau_k$  [K], respectivamente. En el modelo propuesto, en lugar de tratar de modelar dicha dependencia mediante consideraciones termodinámicas, se supone una estructura semifísica expresando el valor asintótico ( $K_{1,k}(t)/K_{2,k}(t)$ ) como una función de las variables meteorológicas de la manera siguiente:

$$\frac{K_{1,k}(t)}{K_{2,k}(t)} = e^{\frac{\rho_k(t)+\alpha_1}{\alpha_2+\alpha_3\tau_k(t)}} \text{ si } p_k(t) \leq p^* \quad (3)$$

$$\frac{K_{1,k}(t)}{K_{2,k}(t)} = \beta_1 \text{ si } p_k(t) > p^* \quad (4)$$

donde  $\alpha_i$  ( $i=1,\dots,3$ ),  $\beta_1$  son constantes que tienen dimensiones adecuadas y  $p^*$  [m] es un valor de umbral para la precipitación acumulada. Obsérvese que (3) se cumple en ausencia de una precipitación importante (en el último intervalo de tiempo) mientras que (4) se cumple siempre que no se puede despreciar dicha precipitación. Naturalmente, los valores constantes se tienen que seleccionar de manera que

$$\beta_1 > e^{\frac{\rho_k(t)+\alpha_1}{\alpha_2+\alpha_3\tau_k(t)}} \quad (5)$$

para cualquier valor posible de  $\rho_k(t)$  y  $\tau_k(t)$ . Obsérvese que la dependencia del r.h.s. de (4) de  $\rho_k(t)$  se puede justificar observando que cuanto mayor es el valor de  $\rho_k(t)$ , mayor es el valor asintótico de  $u_k^0(t)$ . Además, el hecho de que el r.h.s. de (4) sea independiente de  $p_k(t)$ , se puede justificar por la hipótesis de que los valores asintótico de la humedad de la materia combustible son independientes de la intensidad de la precipitación (siempre que dicha intensidad supere un determinado umbral). Finalmente, la humedad de la materia combustible no guarda correlación con la temperatura y la humedad en caso de precipitación, ya que ésta lleva las condiciones de humedad del combustible al punto de saturación de las fibras que es superior al 35% (Cheney, 1981). Los valores supuestos para los parámetros  $\beta_1$  y  $\alpha_i$  ( $i = 1,\dots,3$ ), se muestran en la tabla 1.

Respecto a la dependencia de  $K_{2,k}(t)$  de variables meteorológicas, recordando que  $1/K_{2,k}(t)$  es una constante de tiempo que (en condiciones meteorológicas invariantes respecto al tiempo) caracteriza el comportamiento transitorio representado en (2), se puede proponer la estructura siguiente

$$K_{2,k}(t) = \alpha_4 e^{\text{sign}\left[u_k^0(t) - e^{\frac{\rho_k(t)+\alpha_1}{\alpha_2+\alpha_3\tau_k(t)}}\right] [\alpha_5\tau_k(t) + \alpha_6 w_k(t)]} \text{step}[p^* - p_k(t)] + \max\{p_k(t) - p^*, 0\} \beta_2 \quad (6)$$

donde se han introducido otras constantes que tienen dimensiones adecuadas. Por simplicidad, sólo se considera el caso de ser  $\tau_k > 0$ . La estructura del r.h.s. de (6) se puede justificar como sigue. En primer lugar, debe tenerse en cuenta que  $(1/K_{2,k}(t))$  representa la constante de tiempo del término transitorio de (2). Luego se debe observar que el primer término del r.h.s. de (6) es aplicable en ausencia de precipitaciones importantes y por tanto  $K_{2,k}(t)$  representa la velocidad del proceso de secado (o humedecimiento) cuando  $u_k^0(t) > e^{\frac{\rho_k(t)+\alpha_1}{\alpha_2+\alpha_3\tau_k(t)}}$  (o  $u_k^0(t) < e^{\frac{\rho_k(t)+\alpha_1}{\alpha_2+\alpha_3\tau_k(t)}}$ ). Evidentemente, la dependencia propuesta en (6) hace que, en ausencia de precipitaciones importantes, altos valores de la temperatura e intensidad del viento favorecen el secado y dificultan el humedecimiento. Por el contrario, el segundo término del r.h.s de (6) tiene aplicación en presencia de precipitaciones importantes y adquiere una dependencia lineal de la velocidad de humedecimiento respecto a la intensidad de las precipitaciones. Naturalmente, de (3) y (4) resulta que

$$K_{1,k}(t) = K_{2,k}(t) \left\{ \text{step}[p^* - p_k(t)] e^{\frac{\rho_k(t)+\alpha_1}{\alpha_2+\alpha_3\tau_k(t)}} + (1 - \text{step}[p^* - p_k(t)]) \beta_1 \right\} \quad (7)$$

Al llegar a este punto, después de haber explicado el modelo (1), también en relación con la dependencia de los coeficientes que aparecen en (1) de las variables meteorológicas, vale la pena proporcionar explícitamente la versión para partes discretas del modelo, que está realmente implantada en el sistema desarrollado, es decir

$$u_k^0(t+1) = u_k^0(t) [1 - T K_{2,k}(t)] + T K_{1,k}(t) \quad (8)$$

donde T es la duración de los intervalos discretos (3 horas) y la variable tiempo t es (ahora) un número entero..

**Tabla 1**—Lista de valores de los parámetros para el modelo de humedad de la materia combustible

Parámetro de humedad de la materia combustible						
Parámetro del modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
Valor	24.210	34.940	0.100	0.2317	$7.5 \times 10^{-3}$	$17,5 \times 10^{-6}$
Parámetro del modelo	$\beta_1$	$\beta_2$	$p^*$			
Valor	40.000	0.100	0.001			

Evidentemente, el comportamiento del modelo de humedad de la materia combustible se ve profundamente afectado por el valor de los parámetros  $\alpha_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), and  $\beta_i$  ( $i = 1, 2$ ) y  $p^*$ . De hecho, una calibración preliminar de dichos parámetros, para un caso de estudio pertinente para todo el territorio italiano y para la estación de verano, es lo que ha conducido a los valores indicados en la tabla 1.

Esencialmente, dicha calibración se ha realizado sobre la base de pruebas empíricas extraídas de un amplio conjunto de casos de prueba (correspondientes a incendios detectados realmente).

### ***El modelo de propagación potencial***

El objeto de este modelo es proporcionar una medida del peligro para que la celda de la zona considerada. La información dinámica que utiliza dicho modelo es la pertinente para las variables meteorológicas previstas y las proporcionadas por el modelo de humedad de la materia combustible. Al mismo tiempo, el modelo de propagación hace uso de información topográfica y de información relacionada con la vegetación (clase y densidad por m<sup>2</sup>), una vez más referida a las celdas consideradas. La información relativa a densidad y tipo, para cada celda, de materia combustible viva y muerta, se considera estática, ya que sólo se consideran variaciones estacionales tomando simplemente distintos valores de los parámetros pertinentes para las distintas estaciones.

El desarrollo del modelo de propagación potencial seguirá las mismas líneas básicas propuestas por primera vez por Drouet (1974), en relación con la definición de un modelo de propagación de incendio forestal, pero introduciendo algunas novedades importantes relacionadas con los procedimientos para evaluar el peligro de incendio forestal.

Es conveniente recordar una vez más que, en esta ponencia, no estamos realmente interesados en un modelo de propagación del incendio, sino que estamos más bien interesados en determinar una evolución cuantitativa de la peligrosidad, a través de toda la región considerada. Dicha peligrosidad está relacionada con el comportamiento de un incendio potencial después de haber sido provocado de manera accidental o deliberada. La primera información sobre la que está construido el modelo de propagación potencial está representada por la *velocidad nominal de propagación*  $v_{0,k}$ , que es una cantidad referida a condiciones estándar por lo que se refiere a la temperatura y a la humedad media de la materia combustible viva, en ausencia de viento, en un terreno totalmente llano y con materia combustible muerta totalmente seca. Evidentemente,  $v_{0,k}$  depende del índice de la celda  $k$ , ya que depende de la clase de materia combustible (es decir, tamaño de partículas, densidad aparente, humedad y composición química de la materia combustible) y de la densidad de vegetación (biomasa por metro cuadrado) de materia combustible viva y muerta. Además, dicho valor se tiene que especificar en relación con las distintas condiciones estacionales, ya que éstas determinan la humedad media de la materia combustible viva. Evidentemente, la determinación de  $v_{0,k}$  requiere una gran cantidad de ensayos experimentales y un profundo conocimiento de la vegetación que cubre el territorio. Sobre esta base, la *velocidad de propagación potencial*, que tiene en cuenta la influencia de las variables meteorológicas, se puede definir y determinar de la manera siguiente

$$v_k(t) = v_{0,k} Z_k(t) \frac{W_k(t)}{N_k(t)} S_k D_k(t) \quad (9)$$

donde

$Z_k(t)$  es una corrección (multiplicativa) [adimensional] para tener en cuenta la temperatura del aire, en el instante  $t$  y en la celda  $k$ , respecto a la temperatura estándar ( $0^\circ\text{C}$ ) supuesta como la referencia uno;

$W_k(t)$  es una corrección (multiplicativa) [adimensional] para tener en cuenta la velocidad del viento en terreno llano, en el instante  $t$  y en la celda  $k$ ;

$N_k(t)$  es un término de normalización [adimensional] que tiene en cuenta la influencia de la topografía en el coeficiente  $W_k(t)$ ;

$S_k$  es una corrección (multiplicativa) [adimensional] para tener en cuenta la pendiente en la celda  $k$ ;

$D_k(t)$  es una corrección (multiplicativa) [adimensional] para tener en cuenta la humedad de la materia combustible fina muerta, en el instante  $t$  y en la celda  $k$ ;

La dependencia de dichos términos de la información en tiempo real se puede modelar de la manera siguiente El término  $Z_k(t)$  de (13) se puede suponer que viene dado por (Drouet, 1974)

$$Z_k(t) = e^{\gamma_1 \tau_k(t) \left(1 + \frac{(1 - \chi_k(t))}{\gamma_2}\right)} \quad (10)$$

donde  $\gamma_1, \gamma_2$ , son parámetros que tienen dimensiones adecuadas y  $\chi_k(t)$  es la cobertura total de nubes (adimensional) de la celda  $k$  en el instante  $t$ , ( $\chi_k(t) \in [0, 1]$ ), que se puede medir directamente o prever mediante modelos meteorológicos.

En relación con el término  $W_k(t)$ , se puede utilizar la expresión siguiente (Drouet, 1974)

$$W_k(t) = \left\{ 1 + \delta_1 \left[ \delta_2 + \tanh\left(\frac{w_k(t)}{\delta_3} - \delta_4\right) \right] \right\} \left[ 1 - \frac{w_k(t)}{\delta_5} \right] \quad (11)$$

donde los parámetros  $\delta_i$  ( $i=1, \dots, 5$ ) tienen dimensiones adecuadas y están fijados como en la tabla 2.

La velocidad del viento tiene una influencia muy notable en el comportamiento del incendio cuando el ángulo  $\theta_k(t)$  entre la dirección del viento y la orientación de la celda es nulo. Evidentemente, en caso de terreno llano o con débil pendiente, la influencia de la velocidad del viento sobre la velocidad de propagación depende de la orientación de la celda. Por otra parte, en caso de pendientes importantes, el ángulo entre la dirección del viento y la orientación de la celda tiene una gran influencia sobre el comportamiento (potencial) del incendio, ya que, cuando  $\theta_k(t)$  es aproximadamente  $\pi$ , la influencia de la velocidad del viento sobre la velocidad de propagación del incendio tiene que ser despreciable. Entonces, con objeto de representar la influencia de la topografía sobre el efecto de la velocidad del viento (representado por medio del factor de corrección  $W_k(t)$ ), se ha introducido el término  $N_k(t)$  en la ecuación (9), dada por

$$N_k(t) = 1 + \frac{2 \operatorname{arctg} s_k}{\pi} (W_k(t) - 1) \frac{2 \operatorname{arctg} s_k}{\pi} e^{-\frac{(\theta_k(t) - \pi)^2}{2\epsilon^2}} \quad (12)$$

donde:

$\varepsilon$  es un parámetro que tiene dimensiones adecuadas y cuyo valor se indica en la tabla 2, se ha elegido expresamente con objeto de permitir una dependencia de  $\theta_k(t)$  como la que se describirá en lo que sigue;

$s_k$  es la pendiente [adimensional].

Es importante observar que la pendiente tiene un doble efecto sobre la propagación del incendio. De hecho, además de condicionar el efecto del viento sobre la propagación, como se ha explicado anteriormente, la pendiente tiene también un efecto directo, ya que las llamas de un incendio que se propaga cuesta arriba están situadas más cerca de la materia combustible se encuentra delante del incendio. Esto seca y precalienta la materia combustible a una velocidad mayor que en un incendio en terreno llano. Por tanto, es necesario introducir el término  $S_k$  en la ecuación (9), que representa la contribución de la pendiente a la velocidad de propagación, y estructurarla de la manera siguiente

$$S_k = 1 + \lambda_1 \left( \frac{2 \operatorname{arctg} s_k}{\pi} \right) \quad (13)$$

donde  $\lambda_1$  es un parámetro adimensional. En la tabla 2 se indica el valor seleccionado para dicho parámetro.

Como ya se ha mencionado, sólo se tiene en cuenta la dinámica de la humedad de la materia combustible fina muerta, mientras que la humedad de la materia combustible viva se determina solamente (como un parámetro estático) sobre la base de los valores medios estacionales para el tipo de vegetación característico de la celda considerada. Esto es tanto como decir, que mientras la humedad de la materia combustible fina muerta se representa por medio de una variable  $u_k^0(t)$ , la humedad de la materia combustible viva se representa por medio de una constante  $u_k^1$ .

Luego se puede tener en cuenta la influencia de la humedad de la materia combustible fina muerta mediante la introducción en (9) del término adimensional  $D_k(t)$  definido como

$$D_k(t) = e^{-\left(\frac{u_k^0(t)}{\phi}\right)^2} \quad (14)$$

donde  $\phi$  es un parámetro adimensional (cuyo valor se ha fijado como se indica en la tabla 2).

**Tabla 2**—Lista de valores de los parámetros para el modelo de propagación potencial del incendio

<b>Parámetro de propagación potencial</b>					
Parámetro del modelo	$\varepsilon$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\phi$	$\lambda_1$
Valor	0.500	0.001	1.400	24.040	1.000
Parámetro del modelo	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
Valor	1.500	0.848	$16 \times 10^3$	1.250	$25 \times 10^4$

Habiendo aclarado la manera de calcular la velocidad de propagación potencial  $v_k(t)$ , que proporciona una cuantificación de la rapidez que caracteriza la propagación (potencial) de un incendio, es necesario cuantificar también la intensidad del fenómeno, que es la medida definitiva del peligro. Con este fin, se puede utilizar la

ecuación de Byram (1959) para determinar el peligro (potencial)  $H_k(t)$ , que es la intensidad lineal del incendio [ $\text{kWm}^{-1}$ ], es decir

$$H_k(t) = v_k(t) \sum_{i=0}^1 \text{LHV}_k^i d_k^i \quad (15)$$

donde

$d_k^0, (d_k^1)$  [ $\text{kg m}^{-2}$ ] es la densidad de la materia combustible muerta (viva), para la estación considerada en la celda  $k$ ;

$\text{LHV}_k^0(t), (\text{LHV}_k^1)$  es el poder prolífico inferior [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ] de la materia combustible fina muerta (viva) en la celda  $k$  y en el instante  $t$ , dado por:

$$\text{LHV}_k^0(t) = \text{HHV}_k^0 \left[ 1 - \frac{u_k^0(t)}{100} \right] - Q \frac{u_k^0(t)}{100} \quad (16)$$

$$\text{LHV}_k^1 = \text{HHV}_k^1 \left[ 1 - \frac{u_k^1}{100} \right] - Q \frac{u_k^1}{100} \quad (17)$$

donde

$\text{HHV}_k^0, (\text{HHV}_k^1)$  es el poder prolífico superior [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ] de la materia combustible fina muerta (viva) basado en la composición prevalente de las especies presentes en la celda  $k$ , mientras que  $Q$  es el poder prolífico latente [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ].

## La evaluación estática del peligro

Cómo se ha señalado en la introducción, la iniciación de un incendio incontrolado en las regiones mediterráneas es imputable prácticamente en todos los casos a la intervención humana, bien como una acción voluntaria o bien como una consecuencia involuntaria de alguna actividad. Por tanto, aunque un alto peligro potencial puede afectar de manera importante a partes del territorio, no todas las zonas caracterizadas por un alto peligro arden realmente.

Por tanto es esencial, con objeto de evaluar el peligro estático a través de un territorio considerado, tener acceso a información relacionada con una gran cantidad de incendios producidos sobre una zona extensa (por ejemplo, todo el territorio nacional italiano) y durante un período de tiempo suficientemente largo para que sea estadísticamente representativo de las condiciones climáticas medias para las regiones consideradas (por ejemplo, 10 años) y hacer uso de ella.

Por ejemplo, en relación con el territorio italiano y de acuerdo con *Forest Service's Daily Journal of Detected Fires* (Corpo Forestale dello Stato, 2002), se ha recogido un conjunto de datos pertinentes para  $Y$  años. Para cada incendio, hay disponible la información siguiente:

- las coordenadas geográficas del punto de iniciación;
- la zona quemada (bosques y zonas sin árboles);
- el número y tipo de medios utilizados en la intervención;

la duración de la intervención;

las condiciones meteorológicas locales existentes durante el período de tiempo de la intervención;

la topografía y la vegetación de la zona del caso de estudio.

Luego, para cada incendio ocurrido, se define un índice de peligro de la manera siguiente:

$$\tilde{h} = \left( \kappa_1 A_1 + \kappa_2 A_2 \right) \frac{\sum_{m=1}^M \lambda_m x_m \tau_m}{\tau_{tot}} \quad (18)$$

donde:

$\tilde{h}$  [m<sup>2</sup>] es el índice de peligro;

$\kappa_1, \kappa_2$  [adimensionales] son coeficientes de ponderación;

$A_1, A_2$  [m<sup>2</sup>] son, según el informe, la superficie de bosque y las tierras no pobladas de árboles quemadas respectivamente;

$\lambda_m, m=1, \dots, M$ , [adimensional] es un coeficiente correspondiente a cada tipología distinta de medios perteneciente a la clase  $m$  (camiones, motores, aviones, helicópteros) cuyo valor representa una medida de la efectividad de esta clase de medios en relación con la acción de extinción;

$x_m, m=1, \dots, M$ , [adimensional] es el número de medios pertenecientes a la clase  $m$ , que tomaron parte en las acciones de extinción;

$\tau_m, m=1, \dots, M$ , [s] es la duración de la intervención, referida a los medios pertenecientes a la clase  $m$ .

$\tau_{tot}$  [s] es la duración total de la intervención.

El significado de  $\tilde{h}$  es evidente, ya que se trata de un índice útil para medir el peligro de los incendios detectados, que tiene en cuenta el tipo de incendio incontrolado y también el número y tipología de las acciones que pueden intervenir en la acción de extinción..

Luego, se puede definir una clase de peligro  $\sigma = 1, \dots, \Sigma$  introduciendo valores de umbral adecuados para el índice  $\tilde{h}$ . Sobre esa base, para cada celda  $k = 1, \dots, K$ , se puede definir el peligro estático  $H_k$  como una función del número de casos de incendios incontrolados de diversas clases, en la celda  $k$ , dentro del período de tiempo considerado  $Y$ .

$$H_k = \sum_{y=1}^Y \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \psi_{\sigma} N_{ky}^{\sigma} \quad (19)$$

donde:

$H_k$  [adimensional] es el peligro estático correspondiente a la celda  $k$ ;

$\psi_{\sigma}$  [adimensional] es un coeficiente de ponderación correspondiente a los incendios incontrolados de clase  $\sigma$ ;

$N_{ky}^{\sigma}$  [adimensional] representa el número de incendios incontrolados de clase  $\sigma$  ocurridos en la celda  $k$  durante el año  $y$ .

## La evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo de incendio forestal y la subsiguiente mitigación está estrictamente relacionada con la tipología de los elementos expuestos considerados. Dichos elementos se definen tanto por sus características físicas como por sus funciones dentro de un sistema territorial más complejo.

En la metodología propuesta, se supone que el sistema territorial está descrito y modelado utilizando un número limitado de clases de elementos expuestos, que, a distinta escala espacial y temporal, tiene que preservar y proteger la comunidad de un incendio forestal potencial, con objeto de evitar su pérdida, daños o indisponibilidad temporal. Por tanto, se pueden definir y almacenar en una base de datos GIS datos relativos a uso de la tierra, infraestructuras y zonas urbanas y se puede definir cierto número  $n$  de clases de objetos, con objeto de representar las diversas clases de elementos expuestos en cada celda  $k$ .

El gran número de elementos expuestos identificables en el territorio y la heterogeneidad de sus características físicas y de su uso, imponen una simplificación radical del sistema con objeto de hacer una clasificación dentro de clases homogéneas del gran número de elementos, sin que se produzca una gran pérdida de información. Con este fin, se han definido siete clases generales de elementos expuestos de zonas y lineales, como se muestra en la tabla 3. Además, considerando los asentamientos urbanos, es posible observar que en estas zonas la carga de material combustible es en general despreciable y por tanto las celdas ocupadas totalmente por tales elementos expuestos se caracterizan por un peligro nulo. Por esa razón, con objeto de obtener una evaluación con sentido del riesgo que afecta a dichos asentamientos, se tiene que definir una zona de amortiguación, cuya profundidad es una función de la tipología o clase del asentamiento. La presencia de un incendio en una de dichas zonas de amortiguación puede determinar una pérdida potencial de funcionalidad del asentamiento o, en el peor de los casos, puede convertirse en una amenaza física real.

**Tabla 3**— *Las siete tipologías principales de elementos expuestos consideradas por el sistema.*

n	Tipología	Descripción de la clase	Profundidad de la zona de amortiguación [m]
1	Superficial	Asentamientos urbanos	500
2	Superficial	Asentamientos de producción	500
3	Superficial	Zonas cultivadas	200
4	Superficial/lineal	Red de autopistas y zonas de servicio	300
5	Lineal	Red de tráfico	300
6	Superficial/lineal	Red de ferrocarriles y zonas accesorias	300
7	Superficial/lineal	Red eléctrica y zonas accesorias	300

En los asentamientos urbanos, las actividades residenciales y comerciales están concentradas y la presencia de un incendio incontrolado en estas zonas o en sus proximidades supone un suceso extremadamente peligroso. Los asentamientos industriales se caracterizan por la presencia prevalente de instalaciones industriales de fabricación o por la presencia de centros comerciales de grandes dimensiones. Están situados generalmente en las zonas periféricas de los centros habitados y en ocasiones en contacto directo con zonas pobladas de árboles o con matorrales o cultivos. Las zonas cultivadas y las zonas próximas son las zonas en las que es más frecuente la iniciación de un incendio que con frecuencia puede degenerar en un grave incendio forestal. Las redes de carreteras y ferrocarriles constituyen un importante elemento lineal de discontinuidad. Esta redes se ven afectadas con frecuencia por el fenómeno de los incendios forestales que, entre las diversas catástrofes naturales, es una de las que con más frecuencia afectan a su funcionamiento normal. Además, la producción de electricidad se ve interrumpida con frecuencia por incendios incontrolados y la ineficiencia es grave si los incendios son extensos, prolongados y afectan a líneas eléctricas principales. Las interrupciones de líneas de alta tensión pueden tener graves consecuencias sobre el suministro regular de energía eléctrica o sobre la funcionalidad de la red (sobrecargas). Además, la interrupción de líneas de alta tensión es necesaria para garantizar la seguridad de los operadores que intervienen en las fases de extinción, especialmente cuando se utilizan aviones.

El “*valor*” o coste de la celda  $k$ ,  $C_k$ , se puede definir de la forma siguiente

$$C_k = \sum_{n=1}^7 \xi_{nk} c_n \quad (20)$$

donde

$C_k$  [€] coste estimado de la celda  $k$ ;

$\xi_{nk} \in \{0,1\}$  es un coeficiente que expresa la ausencia/presencia de objetos de clase  $n$  dentro de la celda  $k$ ;

$c_n$  [€] es el coste del elemento expuesto  $n$  (expresado en euros), tomado como una medida del valor de los objetos existentes, es decir, el gasto económico necesario para reconstruir o restaurar el elemento considerado.

Además, se tiene que introducir una función de vulnerabilidad con objeto de modelar la relación entre el peligro y la característica física/funcional de la celda  $k$  (es decir, implícitamente, de los elementos presentes que están expuestos en la celda  $k$ ). El análisis de la dinámica de propagación del incendio es crucial por lo que se refiere a la evaluación de la vulnerabilidad. En primer lugar, es evidente que la vulnerabilidad a incendios incontrolados no se puede definir simplemente como una relación entre las sollicitación de fuerzas y los efectos sobre el elemento expuesto. De hecho, la dinámica de los incendios forestales es comparable a la dinámica de su extinción y por tanto la vulnerabilidad física de los elementos se tiene que considerar principalmente como una función de los recursos de extinción disponibles. Por tanto, se asume que la vulnerabilidad es una función de la eficiencia de la intervención, definida en términos de recursos disponibles (ponderados por su distancia a la celda considerada) que pueden hacer frente a un incendio en caso de emergencia o, en la fase preoperativa, pueden patrullar la celda con objeto de evitar la iniciación de un incendio. Además, la vulnerabilidad de una celda  $k$  depende normalmente de las características físicas (geográficas) de la celda y de las relaciones funcionales entre las instalaciones o

estructuras existentes que, en caso de una fuerza externa de una magnitud dada, pueden intervenir en dicha celda.

Los recursos se pueden dividir en dos conjuntos; el primero incluye los recursos móviles que están asignados a una determinada zona durante un largo periodo de tiempo (estación). Esos recursos son generalmente escasos pero su dinámica, más lenta que la dinámica de un incendio activo, y los elevados costes necesarios para su desplazamiento, sugieren un movimiento/cambio de posición limitado (al menos estacional) en la zona afectada por el valor de riesgo más alto. Por otra parte, el otro conjunto de recursos corresponde a las infraestructuras (fijas) que deben utilizarse en caso de emergencia y este conjunto incluye los puntos de suministro de agua y las estaciones contra incendios del servicio forestal, donde están situados los recursos móviles durante períodos de tiempo entre medios y largos.

Específicamente, se supone que la vulnerabilidad se puede definir como el producto de dos términos independientes. El primero,  $\tilde{V}_k$ , que es la vulnerabilidad *nominal* de la celda  $k$ , se supone como un parámetro (dado) cuyo valor es una función de las características físicas de la celda  $k$ , y las infraestructuras existentes capaces de servir a la celda  $k$ , es decir

$$\tilde{V}_k = 1 + (\chi_1 d_k + \chi_2 s_k + \chi_3 o_k + \chi_4 e_k) \quad (21)$$

donde

$\tilde{V}_k \in (0, 1)$  [adimensional] es la vulnerabilidad *nominal* de la celda  $k$  ;

$d_k$  [ $m^{-1}$ ] accesibilidad de la celda  $k$  para intervención de fuerzas de tierra, expresada en términos de red de carreteras por  $m^2$  de celda;

$s_k$  [m] distancia entre la celda  $k$  y el punto de suministro de agua disponible más cercano;

$o_k$  [m] índice de *desigualdad* de la celda expresado de manera siguiente

$$o_k = b_k \Delta z_k \quad k=1,..,K \quad (22)$$

donde  $b_k$  representa el número de afluentes del río principal (valle) en la celda  $k$ , y  $\Delta z_k$  representa la pendiente media [%] de la celda  $k$ ;

$e_k \in [0, 1]$  es = 1 si en la celda  $k$  hay señalado al menos un obstáculo para la navegación aérea (redes eléctricas, tendidos de cables, etc.);

$\chi_i$   $i=1,..,4$  son parámetros adecuados.

Finalmente, el valor de  $V_k$ , que es la vulnerabilidad *real* de la celda  $k$ , viene dado por el producto de la vulnerabilidad nominal de la celda  $k$ ,  $\tilde{V}_k$ , por un término introducido con objeto de ponderar la prontitud de los recursos disponibles  $m_h$  situados en la celda  $h$  y preparados para intervenir en la celda  $k$

$$V_k = \tilde{V}_k \frac{1}{1 + 9 e^{-z_k}} \quad (23)$$

donde

$V_k \in (0, 1)$  [adimensional] es la vulnerabilidad de la celda  $k$  ;

$z_k = \min_h \{m_h d_{kh}\}$  [m] es un término que tiene en cuenta el número de recursos más próximos  $m_h$  situados en la celda  $h$  y que distan  $d_{kh}$  de la celda  $k$ ;  $\theta$  es un parámetro adecuado.

Una vez definidos y evaluados la vulnerabilidad, el coste y el peligro (tanto estático como dinámico), una manera adecuada de definir el riesgo asociado con una celda dada consiste en tomar simplemente el producto de esas cantidades.

$$R_k = H_k C_k V_k \quad (24)$$

## Mitigación del riesgo de incendio forestal mediante un planteamiento de programación matemático

### *La fase de planificación*

De la sección anterior, se desprende que la planificación territorial tiene que tener por objeto no la total eliminación del riesgo, sino su mitigación. La mitigación del riesgo en un sistema territorial se puede conseguir de acuerdo con dos planteamientos distintos:

a) reducción del peligro  $H_k$ , con intervención directa de las características físicas de la materia combustible disponible en la celda  $k$ , es decir, con acciones de planificación forestal con vistas a reducir el poder prolífico disponible en la celda considerada, o mantener valores suficientes número de la materia combustible mediante el uso de técnicas oportunas capaces de irrigar la zona considerada;

b) reducción de la vulnerabilidad  $V_k$ , por medio de intervenciones estructurales funcionales sobre los elementos expuestos, es decir, mediante la construcción de nuevas infraestructuras de suministro de agua, barracones de bomberos, etc.

Ambos planteamientos requieren generalmente una inversión económica considerable. En esta ponencia, sólo se considera el segundo tipo de intervención. Por consiguiente, el problema se formaliza en términos de asignar óptimamente los recursos totales disponibles (monetarios) entre la totalidad de las células, con el objetivo de crear nuevas infraestructuras o reasignar las existentes, con objeto de minimizar los daños (potenciales) sufridos por el sistema territorial. El problema se formaliza con el objetivo de minimizar el riesgo máximo para el conjunto de celdas consideradas. Además, se tienen que tener en cuenta los costes de construcción de cada nuevo recurso, así como la necesidad de penalizar la asignación nominal de recursos de extinción situados en una determinada celda  $j$  a una celda  $k$  situada demasiado lejos de la primera.

Entonces, se puede formalizar el problema como

min  $y$

s.t.

$$y \geq I_k V_k C_k \quad k = 1, \dots, K \quad (25)$$

$$(20) \div (24)$$

$$\sum_{j=1}^J c_j m_j \leq \tilde{C} \quad (26)$$

donde

y es la función de coste;

$c_j$  es el coste de construcción de una nueva infraestructura en la celda  $j$ ;

$m_j$  es el número de recursos disponibles en la celda  $j$ ;

$\tilde{C}$  es la cantidad total de recursos (económicos) disponibles para la fase de planificación de la totalidad de la zona tomada como objetivo.

### La fase preoperativa

En una fase preoperativa, el problema a resolver es la distribución óptima de los recursos móviles totales disponibles (es decir, aviones, equipos de ataque inicial, etc.) entre el conjunto de celdas (por ejemplo,  $Z$  celdas) teniendo  $R_k > 0$ . Dicho problema se tiene que formalizar teniendo en cuenta el objetivo de minimizar la suma ponderada de las diferencias entre los recursos necesarios (hipotéticos) y los recursos asignados reales para cada celda de interés. Además, es necesario tener en cuenta los costes de transportes desde una celda  $j$  hasta otra  $h$ , así como el objetivo de penalizar la asignación de recursos situados en una determinada celda  $j$  a otras celda  $k$  demasiado alejadas de la primera.

El problema se modela suponiendo que los recursos son continuos, por ejemplo representados por la cantidad de energía disponible para extinguir incendios forestales, es decir,  $m^3/s$  de agua disponible en el frente del incendio considerando el tiempo necesario para repostar, la extracción y la misión entre el incendio y la zona de suministro de agua. Además, se debe proporcionar la cantidad actual disponible de potencia en todas las celdas  $j$ ,  $\tilde{U}_j$ , para la formalización del problema.

Por otra parte, la demanda de servicio  $D_k$  [kW] se representa por la suma a lo largo de todo el período de tiempo de la intensidad lineal (prevista)  $H_k(t)$  [kW  $m^{-1}$ ] multiplicada por la longitud del lado de la celda  $k$ ,  $\Delta_k$  [m]

$$D_k = \sum_{t=0}^{T-1} H_k(t) \Delta_k \quad (27)$$

Las variables de decisión del problema son

$q_{jh}$  [kW] recursos situados en la celda  $j$  que debe ser trasladados a la celda  $h$ ,  $j=1, \dots, K$ ;  $h=1, \dots, K$ ;  $j \neq h$ ;

$u_{jk}$  [kW] recursos situados en la celda  $j$ , asignados para satisfacer la demanda prevista de la celda  $k$ ,  $j=1, \dots, K$ ;  $k=1, \dots, K$ ;

el problema se puede definir como

$$\min \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{n=1}^N \xi_{nk} c_n V_k \max \left( D_k - \sum_{j=1}^J u_{jk}, 0 \right) \right\} + \alpha \sum_{j=1}^J \sum_{\substack{h=1 \\ j \neq h}}^J d_{jh} q_{jh} + \beta \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K d_{jk} u_{jk} \quad (28)$$

donde

$\alpha, \beta$  son parámetros de ponderación adecuados

s.t.

$$\sum_{k=1}^K u_{jk} = \tilde{U}_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq h}}^J q_{jh} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq h}}^J q_{hj} \quad (29)$$

que representa la limitación de conservación de recursos

Naturalmente, una vez encontrada la solución óptima de dicho problema, es necesario convertir esta solución en los términos de los recursos reales, que sin duda son discretos.

## Conclusiones y futuras direcciones de la investigación

Se ha presentado en esta ponencia un planteamiento para el diseño estructural y operativo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones pensado para la gestión del riesgo de incendios forestales. Se han considerado tanto los peligros estáticos como los dinámicos y la evaluación del riesgo está basada en la estimación de dichos peligros, así como en la evaluación de la vulnerabilidad y en los costes asociados con cada celda. Sobre la base de la distribución del riesgo estimada sobre el territorio considerado, se han formalizado dos problemas. El primero está relacionado con la planificación de la asignación de recursos monetarios con objeto de reducir la vulnerabilidad global del territorio. El segundo tiene por fin reasignar de manera óptima los recursos disponibles de extinción en todo el territorio, en una frase preoperativa, es decir, si se prevé la aparición de una situación de elevado riesgo de incendio.

La actividad de investigación actual está orientada hacia una definición más correcta de las vulnerabilidad y el riesgo de una celda, así como una definición más adecuada del peligro estático de una celda individual. Se están llevando a cabo actualmente implantaciones experimentales de los dos procedimientos de toma de decisiones presentadas en la sección anterior.

## Reconocimiento

Las actividades de las que se informa en esta ponencia se están realizando actualmente con referencia al caso de estudio correspondiente al organismo italiano de protección civil y han sido financiadas por el Gruppo Nazionale per la Difesa dalle catastrofi Idrogeologiche GNDCI, U. O. n° 3.28, proyecto especial n° 4, diseño estructural y operativo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones basado en un sistema nacional de información geográfica y teniendo como objetivo la gestión de riesgos de incendios forestales.

## Bibliografía

Byram GM (1959) Combustion of forest fuels. In Forest Fire: Control and Use. Editor Davis KP, McGraw-Hill, NY, pp. 113-126.

- Byram GM (1963) An analysis of the drying process in forest fuel material. Unpublished report USDA Forest Service, Fire Science Laboratory, Rocky Mountain Research Station, Missoula USA.
- Cheney NP (1981) Fire behaviour. In 'Fire and the Australian biota'. Australian Academy of Science, Canberra, AUS. pp. 151-175.
- Corpo Forestale dello Stato (2002) *Foglio Notizie Antincendio Boschivo*, Rome, Italy.
- Drouet JC (1974) Theorie de la propagation des feux de forets. Master Thesis Université d'Aix- Marseille, France.

Esta página se deja en blanco intencionadamente.