

LA TECNOLOGIA APLICADA A L'ESTUDI DEL COMPORTAMENT DELS INCENDIS FORESTALS

Elsa Pastor

Centre d'Estudis del Risc Tecnològic. Departament d'Enginyeria Química. Universitat Politècnica de Catalunya

Introducció

El foc, juntament amb l'aigua, l'aire i la terra, és un dels quatre elements bàsics que conformen la natura. Entre tots ells, el foc és de ben segur el més fascinant, a causa del seu caràcter paradigmàtic de vida i destrucció. Aquesta dualitat tingué el seu origen quan l'home aprengué a fer-ne un ús domèstic i responsable, però ja de llavors ençà, la seva mala utilització i la seva propagació involuntària, li conferiren una perillositat molt temuda encara en els nostres dies. I és que si bé el foc ha estat un dels elements més rellevants per al progrés de la humanitat en el seu sentit més ampli, paradoxalment també ha estat i és, avui dia, en totes les seves formes no desitjades, el responsable de problemes ambientals, econòmics i socials de major gravetat.

El foc forma part del metabolisme de diversos sistemes ecològics i del mediterrani en particular. Durant llargs episodis de la història ha estat socialment desitjat i productiu, però ja no és així en l'escenari actual. L'abandonament de les zones rurals, el fracàs del sector primari i la creixent demanda urbana dels espais forestals són alguns dels causants més rellevants. I és precisament en aquest marc on estiu rere estiu es fa palesa la seva gravetat, i es posa en evidència d'una manera desoladora l'enorme poder devastador de l'incendi i la feblesa de l'home per combatre'l.

El nostre país és un cas molt il·lustrador d'aquesta situació. Els incendis forestals han devastat greument Catalunya durant els darrers anys, i han ocasionat danys humans i al medi ambient i han destruït una de les fonts de riquesa i d'equilibri més preuades del nostre territori, amb conseqüències econòmiques i socials importantíssimes. Les estadístiques reflecteixen la magnitud de la problemàtica dels incendis forestals a Catalunya, però també porten a advertir tendències que indiquen una evolució molt notable en les tasques de prevenció i extinció (figura 1). Si bé en el període comprès entre els anys 1970-1985 els petits i mitjans incendis eren els més freqüents, en aquests darrers vint anys la seva incidència ha estat considerablement menor, a causa d'una política aplicada en

matèria d'extinció basada en la ràpida intervenció, en detriment, però, dels grans incendis.

Paradoxalment, l'èxit assolit en aquest sentit és una de les causes que afavoreixen l'aparició d'incendis de grans superfícies, l'assignatura pendent a Catalunya i a tota l'Europa mediterrània. Així mateix, altres àrees d'arreu del món pateixen d'igual manera les conseqüències del foc. Cal mencionar el continent nord-americà, que també s'ha vist històricament afectat pels incendis forestals amb episodis molt severs durant els darrers estius; les zones tropicals d'Àfrica, Austràlia, Indonèsia i Amèrica, que, a causa del fenomen meteorològic d'El Niño, veuen devastades amb una recurrència esfereïdora milers d'hectàrees forestals; els boscos equatorials del sud-est asiàtic i d'Amèrica del Sud, que també han lamentat greus incidents en els darrers anys, així com les regions septentrionals de boscos temperats del centre i l'est d'Àsia. Amb tot això, l'escenari actual d'una evidència científica en l'escalfament del planeta i en un canvi climàtic no fa més que agreujar les expectatives a mitjà termini d'aquesta problemàtica.

Recerca en comportament d'incendis

Les aportacions que es fan des de la recerca mundial són molt diverses i s'agrupen en diferents tòpics es-

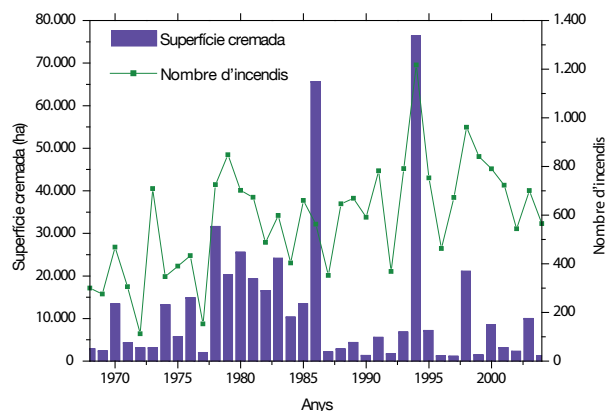


FIGURA 1. Nombre d'incendis i superfície cremada a Catalunya (període 1968-2004).

FONT: Generalitat de Catalunya.

tretament relacionats entre ells amb l'objectiu final de mitigar les conseqüències no desitjades dels incendis forestals. Aquestes àrees temàtiques es descriuen breument a continuació: la prevenció d'incendis, que inclou, entre d'altres, els treballs per a la millora en sistemes de detecció d'incendis i per a l'obtenció de mapes de combustible i de perill acurats; la meteorologia d'incendis, per a la detecció precoç de tempestes elèctriques, l'anàlisi de tendències de règims d'incendis i clima i l'estudi de la relació entre les condicions ambientals i l'estat fisiològic dels combustibles forestals; la gestió d'incendis, en què s'engloben tots aquells treballs que pretenen incrementar i millorar la informació disponible per a la presa de decisions en la gestió de l'emergència d'un incendi: el desenvolupament de programaris per a la simulació d'incendis o per a la simulació de recursos disponibles durant l'emergència, o bé els estudis sobre les cremes prescrites com a eina de gestió; els efectes dels incendis, que són treballs bàsicament d'ecologia per analitzar com es veuen afectats els ecosistemes, quina capacitat de regeneració tenen els boscos, quin és el grau d'afectació sobre la fauna, etc.; la seguretat, una àrea dedicada bàsicament a buscar millores en les tècniques d'extinció, però també a incrementar la seguretat de les persones, dels béns exposats a les flames i dels mateixos bombers, i finalment el comportament d'incendis, aquest és el tòpic de recerca bàsica, en tant que l'objectiu específic d'aquesta línia de recerca és entendre la propagació d'un incendi com un fenomen fisicoquímic.

Una definició estàndard sobre comportament d'incendis es troba a Merrill i Alexander (1987), on s'especifica que el comportament del foc és la manera com el combustible entra en ignició, la flama es desenvolupa i el foc es propaga, i la manera com s'exhibeixen altres fenòmens termodinàmics relacionats. Les característiques que configuren el comportament d'un incendi forestal, atenent diferents escales temporals i espacials i englobant múltiples categories, vénen determinades per un nombre molt extens de variables i per les complexes interaccions que es donen entre elles. Així, la magnitud d'un incendi —mesurada tant en paràmetres físics com la velocitat de propagació o la potència calorífica, com mesurada a partir de les conseqüències directes que en deriven com poden ser el nombre d'hectàrees cremades, el nombre de persones afectades o la despesa invertida en prevenció i extinció— està igualment condicionada per influències de procedència ben diversa com són factors d'origen climatològic, topogràfic, social, econòmic o termodinàmic. La figura 2 il·lustra de manera esquemàtica la influència més rellevant que exerceixen aquests factors, agrupats en les categories de meteorologia, topografia i combustible, en l'inici i l'evolució d'un incendi forestal. S'hi observa un gran nombre de connexions entre elements d'un mateix grup i entre grups diferents, fruit de les interrelacions existents entre aquests.

L'objectiu darrer del tòpic de recerca dedicat al comportament d'incendis forestals és el d'obtenir una sèrie d'eines de diverses tipologies que ajudin a predir el comportament dels incendis per tal de poder utilitzar aquesta

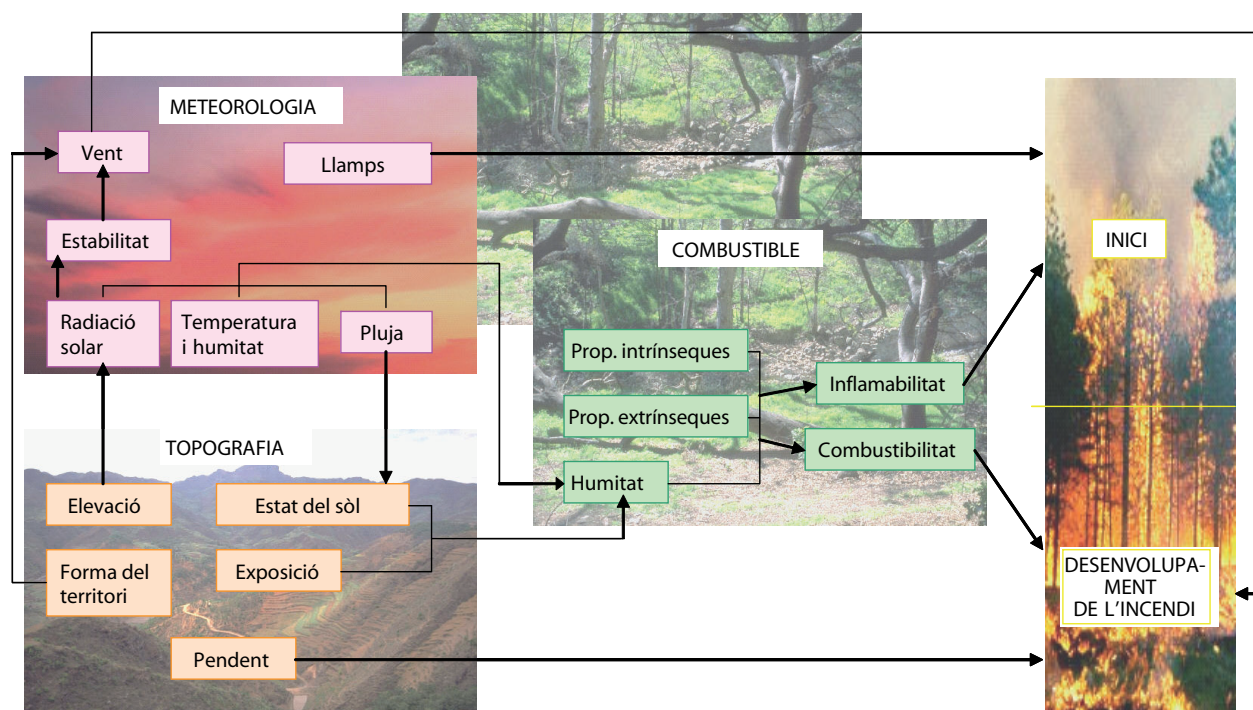


FIGURA 2. Representació esquemàtica de la influència de la meteorologia, la topografia i el combustible en l'inici i l'evolució d'un incendi forestal.

informació amb finalitats d'extinció, prevenció o gestió forestal en general (figura 3). Eines tan senzilles com ara àbacs o nomogrames (McArthur, 1967; Anderson, 1982; Rothermel, 1983), o bé programes de càlcul en suport informàtic més elaborats (Scott, 1999; Finney, 1998; Clark, Radke, Coen i Middleton, 1999).

Per bé que aquestes eines tenen característiques i complexitats diverses, totes tenen un denominador comú, que és la inclusió d'un model matemàtic, és a dir, un conjunt d'equacions de diferent naturalesa (teòriques, empíriques o semiempíriques) que expliquen les variables representatives del comportament dels incendis en funció dels paràmetres que descriuen el combustible, la meteorologia o la topografia. Aquests models han estat tanmateix extrets o validats necessàriament amb una base de dades experimentals. En conseqüència, un requisit essencial per desenvolupar models acurats que descriguin tan bé com sigui possible la realitat és obtenir mesures igualment fiables i acurades.

Variables de mesura

Les variables d'estudi del comportament dels incendis són múltiples, atesa la gran diversitat de fenòmens que ocorren en un foc forestal. S'agrupen genèricament en dues categories: variables de propagació i variables que descriuen les propietats del front de flames. Pel que fa a les primeres, el descriptor probablement més intuïtiu i evident del comportament d'un incendi és la seva velocitat de propagació, que pot ser expressada relacionant qualsevol unitat de distància i temps. La més freqüent acostuma a ser cm/s o m/min. Seguidament es defineix la intensitat lineal d'incendi com la potència calorífica despresa per metre lineal d'incendi (kW/m). Conceptualment correspon al producte de tres magnituds: la calor de combustió del combustible forestal involucrat (kJ/kg), la massa de combustible consumit durant el pas de les flames per unitat de superfície (kg/m²) i la velocitat de propagació.

Les variables que descriuen les propietats físiques del front de flames són, d'una banda, morfològiques, com ara l'altura de les flames —entesa com la magnitud vertical

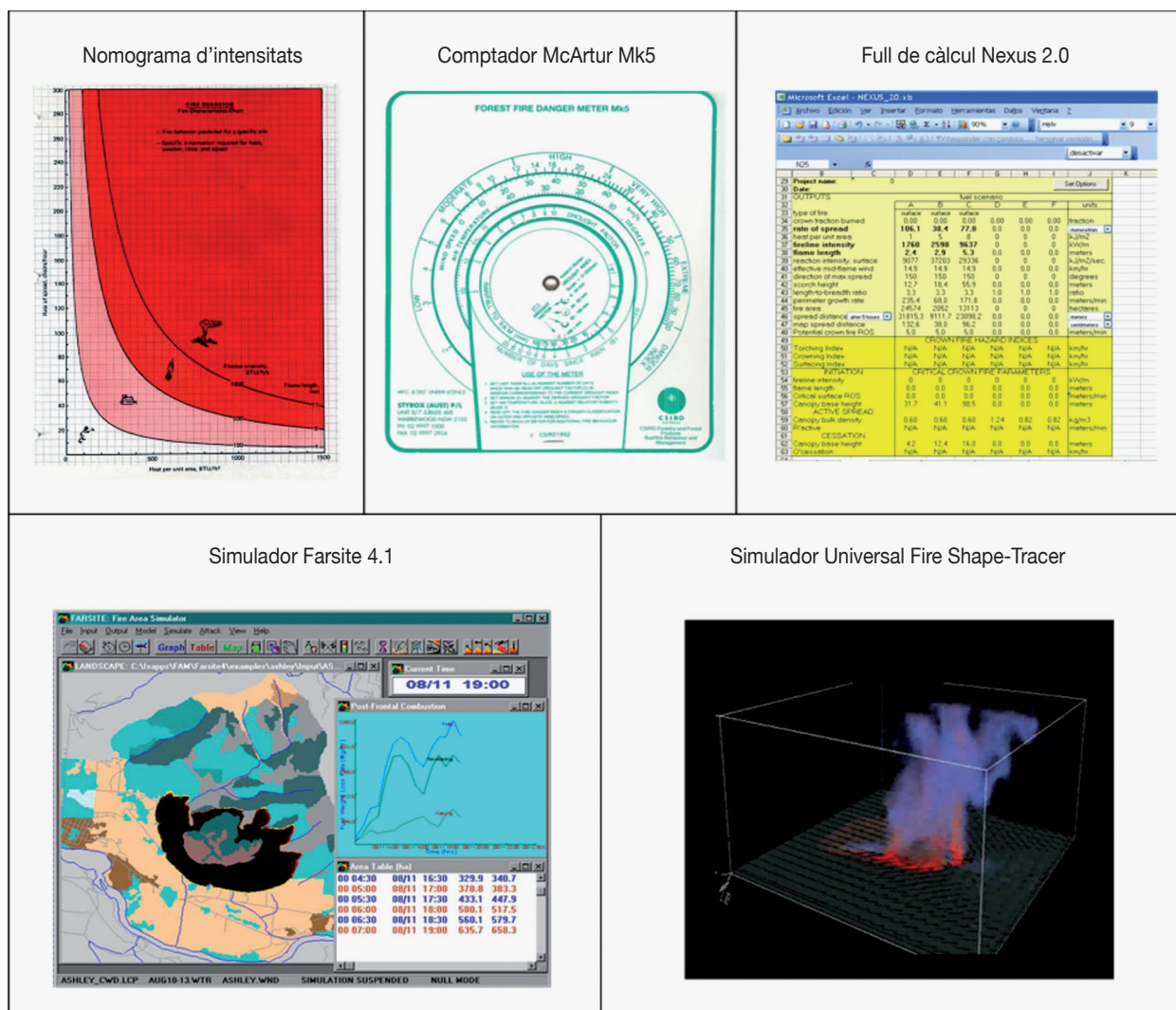


FIGURA 3. Eines per a la predicció del comportament d'incendis.

des del terra fins al punt més elevat d'aquestes— o la longitud —entesa com la dimensió des del punt més alt de la flama fins al punt mitjà del seu gruix, on ocorre la combustió de la flama. I, d'altra banda, en relació amb aquestes, la inclinació, és a dir, l'angle dibuixat des de l'eix de la flama fins al terra.

Una altra tipologia de propietats físiques són les definides com a variables termodinàmiques, com ara el temps de residència, entès com l'estona que dura la combustió en flama en un punt concret (s); el poder emissiu (kW/m^2), com la quantitat d'energia radiant per superfície de flama que és emesa en un incendi, i finalment la temperatura, molt variable en el si de les flames, en un rang de 600 K (temperatura d'ignició del combustible forestal) fins a 1.500 K, valor que es pot assolir fàcilment en un gran incendi.

Escenaris experimentals

Els escenaris experimentals on es poden prendre mesures d'aquestes variables són diversos i s'ubiquen en les diferents escales convencionals (analítica o micro-, meso- i macro-). A escala analítica s'hi realitzen genèricament estudis per obtenir dades de fenòmens que s'observen i s'han d'explicar necessàriament en aquesta escala, com ara la ignició del combustible o la reacció de combustió. La mesoescala es troba en dos escenaris ben diferenciats: d'una banda, en instal·lacions de laboratori dissenyades específicament per simular petits fronts d'incendi i, de l'altra, en cremes a camp —o bé fetes amb finalitats de gestió forestal o bé amb finalitats específiques de recerca— executades fora de temporada d'incendis. Finalment, la macroescala es troba en emergències reals o en cremes experimentals d'alta intensitat.

Pel que fa als laboratoris (figura 4), són d'especial esment les instal·lacions de l'Institut Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), a Madrid, on compten amb un túnel de vent de vuit metres de llargària (Guijarro, Hernando, Santos i Díez, 1997); les del seu equivalent francès, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), a Avinyó, on assagen amb una taula en pendent de grans dimensions (Dupuy, 1997); les de la Universitat de Coimbra, on, amb més de vint anys d'experiència en recerca d'incendis, disposen de diferents taules d'assaig per simular focs en pendent o en congostos (Viegas, 2005), o les de la Universitat Politècnica de Catalunya, amb una taula de combustió adaptada per a l'estudi de l'efectivitat dels productes retardants en l'extinció d'incendis (Pastor, 2004). Tanmateix, totes elles tenen com a referent el Firelab (Servei Forestal dels Estats Units, Montana), un dels laboratoris més prestigiosos en recerca sobre comportament d'incendis, on, des de fa més de cinquanta anys, es duen a terme proves experimentals en taules i cambres de combustió i de túnels de vent de morfologia i característiques diverses



FIGURA 4. Instal·lacions de laboratori per a la recerca en incendis forestals.

(Catchpole, Catchpole, Rothermel, Morris, Butler i Latham, 1998).

Per bé que les condicions a laboratori són òptimes per obtenir repetibilitat i control en l'experimentació, és ben cert que determinats fenòmens termodinàmics que es donen en grans incendis no són reproduïbles avui dia en les instal·lacions actuals, principalment perquè les lleis d'escala no estan encara prou ben definides. És per això que, des dels inicis de la recerca en comportament d'incendis, s'han anat plantejant campanyes experimentals per obtenir dades més semblants a les condicions d'incendis reals.

En aquest sentit, els investigadors pioners en experimentació a camp han estat australians. Des dels anys vuitanta, a Austràlia s'han dut a terme grans campanyes experimentals arreu del territori per estudiar el comportament del foc en les seves diferents formacions de combustible. Entre totes elles, cal fer esment a la campanya del projecte Vesta de finals dels anys noranta (Gould, Cheney i McCaw, 2001), en què estudiaren experimentalment el comportament d'incendis d'alta intensitat en boscos d'eucaliptus en condicions de màxima sequera (figura 5).

Tanmateix, al continent nord-americà i a Europa, també s'hi han dut a terme cremes experimentals rellevants com ara les del projecte ICFME (International Crown Fire Modeling Experiment) dut a terme entre 1997 i 2000 als territoris del nord-oest del Canadà, on més de cinquanta investigadors d'arreu del món estudiaren els incendis de capçades actius (Alexander, Stocks, Wotton, Flannigan, Todd, Butler i Lanoville, 1998), o les cremes de matollar mediterrani a les muntanyes de Gestosa (regió centre de Portugal), on des de l'any 1998 treballen conjuntament investigadors d'arreu d'Europa per estudiar el comportament del foc en aquest tipus de vegetació. Finalment, però no menys important, cal mencionar la potencialitat de les cremes de gestió de combustible conduïdes pels cossos de



FIGURA 5. Crema experimental d'alta intensitat a Nannup, Austràlia Occidental, 1998.
FONT: Organització de Recerca Científica i Industrial de la Commonwealth (CSIRO).

bombers, un escenari més proper que es troba localment en diferents regions del món afectades pels incendis.

Concretament a casa nostra, el GRAF (Grup de Recol·lament d'Actuacions Forestals) de la Generalitat de Catalunya executa cremes per a la gestió d'incendis arreu del país, i treballa eventualment de manera conjunta amb diferents universitats catalanes per poder desenvolupar projectes de recerca.

Tècniques de mesura

Els incendis forestals —simulats a laboratori, en condicions controlades a camp o en emergències reals—, en tant que

són línies de foc en moviment, presenten problemes molt particulars pel que fa a la mesura de les seves propietats. Les flames dels incendis són elements polsants, que oscil·len, que poden incrementar de volum vertiginosament, que espeteguen i crepituen, que poden tenir comportaments eruptius, que es poden arremolinar, que poden formar grans quantitats de fum i que per sobre de tot escalfen tremendament i poden causar ferides extremament greus i mort, en el pitjor dels casos. Totes aquestes característiques cal tenir-les en compte a l'hora de dissenyar sistemes de mesura adequats, per tal que aquestes representin més una oportunitat que no pas una amenaça en l'experimentació. Cal assenyalar també que l'èxit de les metodologies que s'han d'utilitzar rau en un compromís entre la qualitat de la mesura —fiabilitat, precisió i densitat de les dades— i els costos —costos econòmics i costos d'implementació pel que fa a l'esforç, la dificultat i les hores de feina—, a banda d'altres aspectes com la versatilitat i la capacitat d'extrapolació de les tècniques en els diferents escenaris experimentals.

Velocitat de propagació

Les tècniques utilitzades habitualment per trobar la velocitat de propagació consisteixen a mesurar el temps necessari que el foc triga a recórrer distàncies conegudes o bé mesurar la posició del perímetre donats certs intervals de temps coneguts (figura 6). Pel que fa a la mesura de temps, una tècnica molt simple consisteix a col·locar fils de niló paral·lels a l'avanç del front, separats a certes distàncies conegudes, i anotar el temps en què s'observa el trencament d'aquests fils pel pas del front. És la tècnica

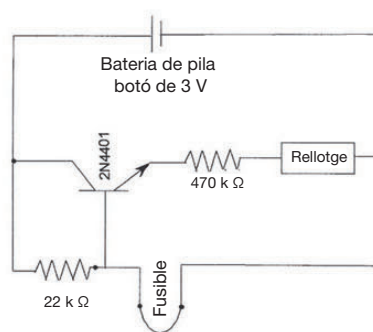
Fils de niló



Càmeres de vídeo



Relloctges



Marcadors metàl·lics



FIGURA 6. Tècniques de mesura de la velocitat de propagació dels incendis.

més utilitzada a laboratori i també és extrapolable eventualment a camp per obtenir velocitats màximes de propagació, per bé que és inviable en determinades condicions d'orografia complexa i vegetació densa i elevada. A més, en incendis amb molta producció de fum, l'instant exacte en què el foc trenca el fil de niló no es pot detectar. Altres tècniques semblants a l'anterior consisteixen en la col·locació de mastelers metàl·lics a distàncies conegudes com a referències de l'observació del pas de front —tècnica menys precisa que l'anterior però molt menys laboriosa a camp— o alternativament la col·locació de cronòmetres activats amb senyals elèctrics. Aquesta tecnologia, molt senzilla, molt barata i enginyosa, consta d'una petita placa on es configura un circuit elèctric protegit dins d'una càpsula amb un element fusible a l'aire. Quan aquest és trencat pel foc, s'activa un petit comptador de temps per tal que l'instant de pas de les flames quedi enregistrat.

Pel que fa a les tècniques d'enregistrament de posició utilitzades habitualment, es classifiquen en dos grups: les basades en tecnologia d'imatges i les que consisteixen en la utilització de petits objectes marcadors. Les primeres necessiten referències de posició i la velocitat del front s'obté observant el temps en què s'han enregistrat les fotografies o les seqüències d'imatges. Sovint es col·loquen les càmeres al marge de les parcel·les, per bé que quan es disposa d'una bona protecció es poden col·locar dins de la zona d'estudi. Les segones són les tècniques més barates però també les més arriscades, ja que requereixen una plena exposició al foc per part dels investigadors. Consisteixen a marcar l'avanç del foc llançant a les flames petites peces de metall o altres materials resistents al foc i anotar el temps en què són llançades. Un cop el foc ha passat, es recullen les marques i es pren nota de la posició on han estat trobades.

Dimensions de la flama

Per obtenir dades sobre les dimensions de les flames, es duen a terme generalment estimacions visuals amb referències —per bé que aquesta és una tècnica força subjectiva— i si es gaudeix de bones perspectives, aleshores s'acostuma a utilitzar imatges digitals enregistrades durant el pas del front, per tal de donar valors més precisos d'altures, inclinació i gruix de les flames.

Flux de calor

El sensors utilitzats més freqüentment per mesurar aquesta variable són els radiòmetres o els sensors de flux de calor duals —que mesuren radiació i convecció. Generalment, s'implementen diversos sensors en alçada com s'observa en la figura 7. Una mesura indirecta del flux de

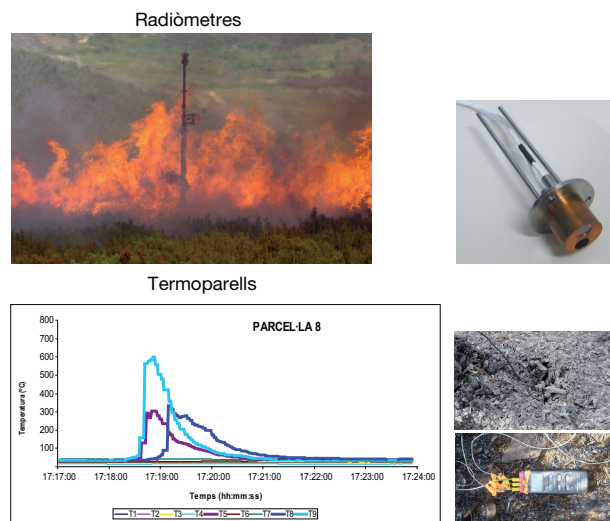


FIGURA 7. Tècniques de mesura del flux de calor emès pels incendis.

calor es pot obtenir també utilitzant una malla de termoparells que cobreixi una gran part de la parcel·la experimental. La informació que se n'extreu és l'evolució de la temperatura amb el temps en els llocs on s'han emplaçat els termoparells (vegeu la gràfica de la figura 7). Amb aquestes dades es pot obtenir, a més a més, el temps de residència de les flames i també la velocitat de propagació, comparant els instants en què s'observen pics màxims de temperatura entre les diferents localitzacions dels termoparells.

Tecnologia avançada: la termografia infraroja per a la mesura del comportament de l'incendi

Les càmeres termogràfiques aplicades a l'estudi del comportament d'incendis forestals ofereixen la possibilitat d'obtenir dades de velocitat de propagació, geometria de flames, temperatures, poder emissiu i temps de residència a partir d'una mateixa seqüència d'imatges. És una tècnica molt versàtil i precisa i en aquests darrers anys el seu cost econòmic ha deixat de ser prohibitiu.

Una càmera de termografia infraroja proporciona imatges que representen en diferents colors la distribució superficial de temperatures de l'objecte d'estudi utilitzant la transmissió de calor per radiació; per tant, no necessiten estar-hi en contacte (figura 8). La matriu de sensors de la càmera capta la radiació provinent de tres fonts diferents: la radiació emesa per l'objecte —en aquest cas les flames—, que per la seva banda és transmesa per l'atmosfera ocupada entre aquestes i l'aparell; la radiació que arriba a l'objecte i és reflectida per aquest —menyspreable en el cas del foc si es considera que aquest té nul·la capacitat reflectora—, i la radiació emesa per la mateixa atmosfera que envolta l'objecte. Per tal de distingir les diferents aportacions i captar únicament la radiació emesa pel foc sense interferències atmosfèriques, s'acostuma a treballar en

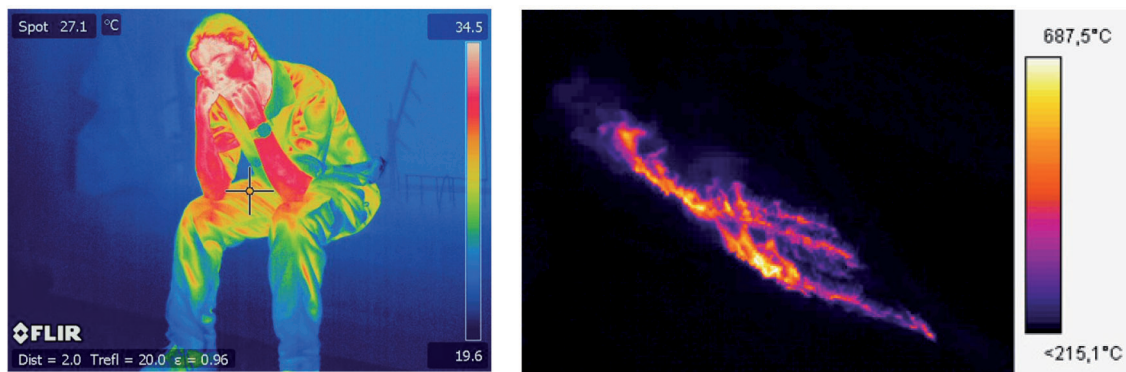


FIGURA 8. Imatges termogràfiques. Esquerra: l'autora; dreta: crema experimental en matollars amb fort pendent (Gestosa, Portugal, maig de 2007).

rangs espectrals on l'atmosfera té transmissivitats properes a la unitat. Això passa entre $3\ \mu\text{m}$ i $5\ \mu\text{m}$ i entre $8\ \mu\text{m}$ i $12\ \mu\text{m}$ de l'espectre electromagnètic. La utilització d'aquesta tecnologia requereix uns ajustaments previs molt acurats si es vol treballar amb alta precisió. D'entrada s'ha de seleccionar adequadament la posició relativa del front de foc i l'aparell. Cal assenyalar que la informació que s'obté és diferent si es filma un foc que s'apropa o que s'acosta a l'objectiu i així mateix la informació obtinguda també és diferent si es filma en direcció perpendicular a l'avanç del foc. A més, cal prendre bona nota de la temperatura atmosfèrica i de la humitat relativa, així com de l'emissivitat de l'objecte que s'ha de mesurar, aquesta darrera no sempre senzilla d'estimar.

Discussió

En la taula 1, a tall de sumari, es recullen les tècniques mencionades i s'avaluen la fiabilitat, la precisió, els costos d'implementació pel que fa a l'esforç operacional que requereixen a laboratori o a camp, els costos econòmics d'adquisició, operació i manteniment, la capacitat d'extrapolació de cada tècnica a altres escenaris experimentals i finalment la seva aplicació per mesurar una o diverses variables descriptores del comportament d'incendis al mateix temps.

Pel que fa a les primeres quatre tècniques descrites per mesurar la velocitat de propagació, s'observa que són clarament les més econòmiques, però són costoses d'implementar en els diferents escenaris experimentals. Així mateix, són poc fiables i moderadament precises. A més, tenen en general poca capacitat d'extrapolació a altres entorns i nul·la versatilitat. Contràriament, les tecnologies d'imatge digital estan més ben posicionades pel que fa a aquestes dues darreres característiques, per bé que amb aquestes tampoc no es poden obtenir resultats més acurats. Els radiòmetres i els termoparells ofereixen dades de més bona qualitat, a canvi, però, de costos més elevats, tant d'implementació com d'adquisició. La termografia infraroja és entre totes les tècniques de ben segur la més cara, tot i que aquests costos es veuen compensats en certa manera per la gran capacitat d'extrapolació a qualsevol escenari i per la facilitat d'implementació tant a laboratori com a camp. A més d'això, és la tècnica més versàtil i precisa, ja que permet obtenir dades molt acurades de tots els descriptors importants de comportament d'incendis.

Expectatives de futur

La modelització d'incendis forestals tendeix cap a l'elaboració de models cada cop més específics, tant pel que fa als objectius com pel que fa a l'àrea d'aplicació, basats en da-

TAULA 1
Comparativa de les diferents tècniques de mesura del comportament d'incendis forestals¹

Tecnologia	Fiabilitat	Precisió	Costos d'implementació	Costos econòmics	Capacitat d'extrapolació	Aplicació ²
Fils de niló	*	**	***	—	*	R
Mastelers	*	**	*	—	**	R
Rellotges	**	**	***	—	**	R
Marcadors	*	**	***	—	*	R
Fotografies	*	**	—	*	***	R, G
Vídeos	**	**	*	**	***	R, G
Radiòmetres	***	***	**	***	**	Q, R
Termoparells	***	***	***	***	**	R, Q, G
Termografia	****	****	*	****	****	R, Q, G, t

1. **** Molt elevat *** Elevat ** Moderat * Baix — Molt baix

2. R: velocitat de propagació; G: geometria de flama; Q: flux de calor; t: temps de residència

des experimentals molt acurades. Per tal d'obtenir dades de bona qualitat, cal utilitzar metodologies de mesura estàndards i objectives que proporcionin informació fiable i precisa. La termografia infraroja pot satisfer aquesta necessitat facilitant informació completa i acurada dels descriptors més importants del comportament dels incendis. El cost per adquirir equips de termografia infraroja ha experimentat un descens considerable durant els darrers anys, fet que fa que avui dia es puguin obtenir càmeres termogràfiques d'elevades prestacions a preus raonables. Per tot això, s'espera que durant els propers anys l'ús d'aquesta tecnologia sigui més generalitzat i es vegi reflectit en models i simuladors més fiables que ajudin a mitigar els efectes dels incendis en els territoris més vulnerables. ■

Bibliografia

- ALEXANDER, M. E.; STOCKS, B. J.; WOTTON, B. M.; FLANNIGAN, M. D.; TODD, J. B.; BUTLER, B. W.; LANOVILLE, R. A. «The international crown fire modeling experiment: an overview and progress report». A: *2nd Symposium on Fire and Forest Meteorology, Phoenix, AZ (11-16 gener 1998)*. Boston, MA: American Meteorological Society, 1998.
- ANDERSON, H. E. *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. United States Department of Agriculture. Forest Service, 1982. (General Technical Report INT-GTR-122)
- CATCHPOLE, W. R.; CATCHPOLE, E. A.; ROTHERMEL, R. C.; MORRIS, G. A.; BUTLER, B. W.; LATHAM, D. J. «Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel». *Combustion Science and Technology*, núm. 131 (1998), p. 1-37.
- CLARK, T. L.; RADKE, L.; COEN, J.; MIDDLETON, D. «Analysis of small-scale convective dynamics in a crown fire using infrared video camera imagery». *Journal of Applied Meteorology*, núm. 38 (octubre 1999), p. 1401-1420.
- DUPUY, J. L. *Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts: expérimentation, test et propagation de modèles*. Tesi doctoral. Villeurbanne, França: Université Claude Bernard, Lyon I. Centre National de la Recherche Scientifique, 1997, p. 272.
- FINNEY, M. A. *FARSITE: Fire Area Simulator - model development and evaluation*. United States Department of Agriculture. Forest Service, 1998. (Research paper RMRS; 4)
- GOULD, J. S.; CHENEY, N. P.; MCCAW, L. «Fire behaviour and fire danger rating: Project Vesta-research into the effects of fuel structure and fuel load on FIRE behaviour of moderate to high-intensity fires in dry eucalypt forest: progress report». A: *Proceedings of Bushfire 2001, Australasian Bushfire Conference (juliol 2001)*. Christchurch, NZ, p. 13-21.
- GUIJARRO, M.; HERNANDO, C.; SANTOS, J. A. de los; Díez, C. *EFAISTOS: Experiments and simulations for improvement and validation of behaviour models of forest fires*. European Contract ENV4-CT96-0299. Intermediate report, 1997.
- MCCARTHER, A. G. «Fire behaviour in eucalyptus forests». *Forestry and Timber Bureau Leaflet* [Commonwealth of Australia. Department of National Development, Canberra], núm. 107 (1967), 36 p.
- MERRILL, D. F.; ALEXANDER, M. E. *Glossary of forest fire management terms*. 4a ed. Ottawa, Canadà: National Research Council of Canada. Canadian Committee on Forest Fire Management, 1987. 91 p. [Publicació 26516]
- PASTOR, E. *Contribució a l'estudi dels efectes dels retardants en l'extinció d'incendis forestals* [en línia]. Tesi doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004. 304 p. <<http://www.tdx.cat/TDX-0906105-142105/>>
- ROTHERMEL, R. C. *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. USDA Forest Service, 1983. (General Technical Report INT-143)
- SCOTT, J. H. «NEXUS: A system for assessing crown fire hazard». *Fire Management Notes*, núm. 59 (febrer 1999), p. 20-24.
- VIEGAS, D. X. «A mathematical model for forest fires blow-up». *Combustion Science and Technology*, núm. 177 (2005), p. 27-51.