

CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DELS EFECTES DELS RETARDANTS EN L'EXTINCIÓ D'INCENDIS FORESTALS

Memòria de Tesi Doctoral presentada per
Elsa Pastor Ferrer
per obtenir el grau de Doctora Enginyera Industrial

Dirigida per Eulàlia Planas Cuchi

Barcelona, desembre de 2004
Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Departament d'Enginyeria Química
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Abstract. Los incendios forestales han devastado gravemente nuestro país durante los últimos años, ocasionando daños a nivel humano y al medio ambiente y destruyendo una de las fuentes de riqueza y de equilibrio más preciadas de nuestro territorio, con consecuencias económicas y sociales importantísimas.

Esta tesis doctoral pretende hallar soluciones a los graves problemas que los incendios forestales representan para nuestra sociedad. Se centra en el ámbito de la extinción, y más concretamente en la aplicación de productos retardantes a largo plazo actuando como cortafuegos químicos del frente de incendio. Esta es una técnica de extinción que ofrece enormes posibilidades de éxito, sin embargo, presenta grandes incógnitas por lo que a su eficacia y operatividad se refiere, a causa de las importantes lagunas existentes en su conocimiento sobre todo a mediana y gran escala. El trabajo tiene dos objetivos específicos; por un lado el de diseñar una nueva metodología experimental para el estudio del efecto de los retardantes a largo plazo, que permita extraer la máxima información sobre las principales variables que determinan el comportamiento de un incendio y, por otro lado, el de obtener un modelo matemático que prediga el efecto de un tratamiento retardante sobre un frente de incendio, dados los parámetros de aplicación.

Para la consecución de estos objetivos, se ha llevado a cabo un extenso programa experimental de laboratorio en la Universidad de Coimbra (Portugal) y en la Universidad Politécnica de Cataluña (donde se ha diseñado y puesto en funcionamiento una instalación a tal efecto) y también se han realizado dos campañas experimentales de campo, con vegetación típicamente mediterránea. En estos experimentos se han implementado diferentes sistemas de adquisición de datos de la velocidad de propagación, la velocidad de combustión, la temperatura y la potencia calorífica radiante del frente de incendio.

Con el tratamiento y el análisis de los datos experimentales se han detallado los principales fenómenos físicos que ocurren cuando un frente de incendio transcurre bajo el efecto de una formulación retardante. Finalmente, a partir de este análisis, se ha validado un modelo teórico de propagación de incendios forestales basado en el mecanismo de transferencia de calor por radiación. Este modelo se ha adaptado para que pueda contemplar el efecto del tratamiento retardante y se convierta así en una herramienta predictiva en este sentido.

Palabras clave. Incendios forestales, extinción, retardantes a largo plazo, velocidad de propagación, transferencia de calor, modelización matemática.

Als meus pares i
a la meva germana

AGRAÏMENTS

A en Joaquim Casal, director del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, per oferir-me la possibilitat de dur a terme aquesta Tesi. Per la seva generositat i per l'estímul constant que he rebut d'ell durant tots aquests anys.

A en Domingos Xavier Viegas, director del *Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais* de la Universitat de Coimbra. Pel seu tracte amable i hospitalari durant la meua estada i per tot el que vaig aprendre treballant al seu costat.

A tots els diferents companys del CERTEC que he anat trobant al llarg de la meua Tesi, estudiants, doctorands i professors, pel seu recolzament i afecte. D'entre tots ells, voldria mencionar en Josep Arnaldos, per les seves valuoses indicacions i pels seus ànims continus. En Luis Zárate, amb ell és amb qui he compartit més estones i ha esdevingut el millor company de viatge. En Miguel Muñoz, per la seva implicació desinteressada en les tasques de més càrrega tecnològica d'aquest treball i per totes les discussions científiques que hem mantingut i que m'han ajudat a trobar la solució en els moments més complicats. La Rosa Mari Darbra, perquè m'ha il·luminat els dies més grisos amb el seu immens somriure, perquè m'ha encomanat el seu optimisme i la seva alegria en les hores baixes. Finalment, voldria agrair particularment el suport que he rebut de la Yolanda Pérez. Vaig realitzar tot el treball experimental a Barcelona juntament amb ella i ja des d'ençà em va oferir la seva incondicionalitat en tots els sentits. Ha estat una gran companya, una millor amiga i un dels meus pilars bàsics tant a nivell professional com personal durant els darrers anys de doctorat. Per aquest motiu li'n guardaré sempre un agraïment molt especial.

No voldria oblidar els companys del CEIF de Coimbra. Em van acollir amb molta calidesa i em van oferir la seva amistat des del primer dia. Guardo un gran record d'en Luis Mario Ribeiro, en Pedro Palherio i en Jorge

Agrela, amb ells vaig treballar-hi dia a dia i la seva ajuda va ser inestimable. També vull citar aquí en Miguel Cruz, pel seu recolzament tècnic i personal tan proper, malgrat la distància.

A les meves amigues Núria Ribera, Eva Darnés, Cristina Solà i Imma Oliveras; amb elles he pogut experimentar la grandesa de la recerca i l'amistat. En els moments més durs, m'han sabut transmetre la seva fe quan m'ha mancat la meua i m'han empès a seguir sempre endavant tot i les adversitats. No vull deixar de mencionar la M^a Àngels Pons i la Dolors Agudé, per tants anys de vivències compartides.

I finalment voldria dedicar les últimes paraules a l'Eulàlia Planas, directora d'aquesta Tesi. Per la responsabilitat, la confiança, la il·lusió i la complicitat que hem compartit. Per la seva gran vàlua professional i humana. Perquè m'ha anat obrint camí i seguint els seus savis consells m'he format com a investigadora i he crescut com a persona. Per tot això i per tot el què esdevindrà a partir d'ara, li'n dono les gràcies més sinceres.

ÍNDIX

1.	INTRODUCCIÓ	1
1.1.	ELS INCENDIS FORESTALS A CATALUNYA. ANÀLISI HISTÒRICA I CONJUNTURAL	2
1.2.	BREU APUNT SOBRE ELS INCENDIS FORESTALS A PORTUGAL	5
1.3.	ELS INCENDIS FORESTALS, UNA PROBLEMÀTICA GLOBAL	6
1.4.	CONCEPTES GENERALS SOBRE INCENDIS FORESTALS PER AL SEU ESTUDI CIENTÍFIC.....	7
1.4.1.	Els incendis forestals. Definició i classificació.....	7
1.4.2.	La combustió en incendis forestals. Propietats dels combustibles	9
1.4.3.	Mecanismes de transferència de calor en els incendis forestals	16
1.4.4.	Característiques geomètriques i físiques dels incendis forestals.....	17
1.4.5.	Factors que influeixen en el comportament dels incendis forestals	20
1.5.	ASPECTES BÀSICS SOBRE TÈCNiques D'EXTINCIÓ I AGENTS EXTINTORS	22
1.5.1.	Retardants per a l'extinció d'incendis forestals	23
1.6.	CONCLUSIONS. ABAST GENÈRIC DE LA TESI.....	28
2.	ANTECEDENTS.....	31
2.1.	LA RECERCA CIENTÍFICA EN INCENDIS FORESTALS.....	32

2.2.	ESTUDI BIBLIOGRÀFIC SOBRE LA MODELITZACIÓ MATEMÀTICA PER A L'ESTUDI DELS INCENDIS FORESTALS	35
2.2.1.	Els inicis, modelització teòrica embrionària.....	36
2.2.2.	Models empírics i semiempírics	38
2.2.3.	Tendències actuals en modelització teòrica.....	39
2.3.	ESTUDI BIBLIOGRÀFIC SOBRE LA RECERCA EN PRODUCTES RETARDANTS	40
2.3.1.	Avaluació de l'eficàcia dels productes retardants	41
2.4.	CONCLUSIONS.....	43
2.5.	OBJECTIUS ESPECÍFICS DE LA TESI I METODOLOGIA.....	45
3.	EXPERIMENTACIÓ A ESCALA DE LABORATORI, INSTAL·LACIÓ I METODOLOGIES	47
3.1.	LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA	48
3.1.1.	Descripció general.....	48
3.1.2.	Descripció de la taula d'assaigs	49
3.1.3.	Equips de mesura	62
3.1.4.	Sistema d'adquisició de dades.....	69
3.2.	LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSITAT DE COIMBRA.....	73
3.2.1.	Descripció de la taula de combustió.....	73
3.3.	ELS PRODUCTES RETARDANTS UTILITZATS	74
3.3.1.	Selecció de productes	74
3.3.2.	Característiques físiques i químiques	75
3.4.	ELS COMBUSTIBLES UTILITZATS	77
3.4.1.	Selecció de combustibles.....	77
3.4.2.	Propietats dels combustibles.....	78
3.5.	DISSENY EXPERIMENTAL I METODOLOGIA A LA UPC	79
3.5.1.	Proves preliminars.....	79
3.5.2.	Disseny d'experiments	82

3.5.3. Metodologia experimental	84
3.6. DISSENY EXPERIMENTAL I METODOLOGIA A ADAI	88
3.6.1. Experiments tipus 1	88
3.6.2. Experiments tipus 2	89
3.6.3. Blocs experimentals	91
4. DESCRIPCIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS EN L'EXPERIMENTACIÓ AL LABORATORI	95
4.1. EFECTES DELS PARÀMETRES AMBIENTALS EN LA HUMITAT DEL COMBUSTIBLE	96
4.1.1. Humitat relativa i humitat del combustible	96
4.2. ESTUDI DE LA VELOCITAT DE COMBUSTIÓ	102
4.2.1. Metodologia de càlcul	102
4.2.2. Anàlisi de la velocitat de combustió dels assajos control	104
4.2.3. Anàlisi de l'efecte del retardant sobre la velocitat de combustió	111
4.2.4. Breu estudi sobre la taxa de cendres	133
4.3. ESTUDI DE LA VELOCITAT DE PROPAGACIÓ	135
4.3.1. Metodologia de càlcul	136
4.3.2. Anàlisi de la velocitat de propagació dels assajos control	140
4.3.3. Relació entre la velocitat de combustió i la velocitat de propagació	144
4.3.4. Anàlisi de l'efecte del retardant sobre la velocitat de propagació	145
4.4. ESTUDI DE LA TEMPERATURA I DE LA POTÈNCIA CALORÍFICA RADIANT	155
4.4.1. Metodologia	155
4.4.2. Anàlisi dels resultats	160
4.5. ESTUDI COMPARATIU DE v , ω i τ PER AL PRIMER BLOC EXPERIMENTAL	163
4.6. CONCLUSIONS	164
5. EXPERIMENTACIÓ DE CAMP A ESCALA REAL	167

5.1.	PRIMERA CAMPANYA EXPERIMENTAL.....	168
5.1.1.	Emplaçament i descripció de la zona.....	168
5.1.2.	Descripció de les proves.....	171
5.1.3.	Resultats.....	175
5.2.	SEGONA CAMPANYA EXPERIMENTAL.....	183
5.2.1.	Emplaçament i descripció de la zona.....	183
5.2.2.	Descripció de les proves.....	185
5.2.3.	Resultats.....	189
5.3.	CONCLUSIONS.....	204
6.	MODELITZACIÓ MATEMÀTICA DELS FENÒMENS OBSERVATS.....	207
6.1.	MODELITZACIÓ MATEMÀTICA DE LA VELOCITAT DE PROPAGACIÓ DELS ASSAJOS CONTROL.....	208
6.1.1.	Descripció del model teòric d'Anderson (1969).....	208
6.1.2.	Ajust del model d'Anderson (1969) a les dades experimentals.....	211
6.2.	INCLUSIÓ DE L'EFECTE DEL RETARDANT EN EL MODEL.....	216
6.3.	CONCLUSIONS.....	217
7.	CONCLUSIONS.....	219
	NOMENCLATURA.....	223
	BIBLIOGRAFIA.....	227
I.	TERMOGRAFIA INFRAROJA.....	241
I.1	PRINCIPIS BÀSICS DE RADIACIÓ.....	242
I.1.1	Radiació tèrmica. Emissió, absorció, reflexió i transmissió.....	242
I.1.2	Radiació del cos negre. Lleis de Planck, Wien i Stefan-Boltzmann.....	244

I.1.3 Radiació emesa pel foc. El cas dels incendis forestals.....	245
I.2 RADIOMETRIA. TERMOGRAFIA INFRAROJA	248
I.2.1 L'emissivitat de flames d'incendis forestals.....	251
I.2.2 L'emissivitat en les flames experimentals	264
II. CARACTERITZACIÓ DELS RETARDANTS.....	267
II.1 ANTECEDENTS	267
II.2 OBJECTIUS I METODOLOGIA.....	268
II.3 RESULTATS.....	269
III. CARACTERITZACIÓ DEL COMBUSTIBLE.....	273
III.1 RELACIÓ SUPERFÍCIE-VOLUM I DENSITAT DE PARTÍCULA DEL COMBUSTIBLE DE LABORATORI	273
III.1.1 Caracterització de les agulles de pi blanc (<i>Pinus halepensis</i>) i pi pinyoner (<i>Pinus pinaster</i>)	274
III.1.2 Caracterització dels llits de gramínies: ordi (<i>Hordeum vulgare</i>), blat comú (<i>Triticum aestivum</i>) i blat dur (<i>Triticum turgidum</i>).....	276
III.2 PROPIETATS EXTRÍNSEQUES DEL COMBUSTIBLE DE LABORATORI	278
III.3 PROPIETATS TÈRMiques DEL COMBUSTIBLE DE LABORATORI.....	283
III.3.1 Càlcul del poder calorífic.....	283
III.3.2 Càlcul de la calor específica.....	288

1. INTRODUCCIÓ

El foc, juntament amb l'aigua, l'aire i la terra, és un dels quatre elements bàsics que conformen la natura. D'entre tots ells, el foc és de ben segur el més fascinant, degut al seu caràcter paradigmàtic de vida i destrucció. Aquesta dualitat tingué el seu origen fa gairebé 80.000 anys, quan l'home aprengué a fer-ne un ús domèstic i responsable, però ja des d'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 a l'avanç de la humanitat en el seu sentit més ampli, paradoxalment també ha estat i és a dia d'avui, en totes les seves formes no desitjades, el responsable de problemes ambientals, econòmics i socials de major gravetat.

Els incendis forestals són probablement l'exemple més evident d'aquesta paradoxa, ja que la dimensió de la problemàtica que comporten va creixent conjuntament amb el grau de desenvolupament de les societats més avançades. 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 en són, de manera genèrica, els causants. I és precisament en aquest marc on estiu rera estiu se'n fa palesa la seva gravetat, deixant en evidència d'una manera desoladora l'enorme poder devastador de l'incendi i la feblesa de l'home per a combatre'l.

La solució a aquesta situació és certament complexa i requereix l'esforç, en major o menor grau, de tots els agents socials que hi són implicats. En aquest sentit, la recerca hi té un paper tant important com difícil. Els incendis forestals han estat estudiats històricament per sociòlegs, geògrafs, biòlegs, ecòlegs i, òbviament, per enginyers de forest. Però a dia d'avui, el desenvolupament científic i tecnològic responsable en certa mesura del problema, mostra també la seva dualitat oferint la possibilitat d'incorporar nous perfils per a l'estudi i la recerca de solucions als incendis forestals. És doncs en aquest enfocament multidisciplinar, incipient, costós però molt necessari, on hi té cabuda aquesta tesi d'enginyeria industrial, una disciplina de recent incorporació en aquest àmbit –si més no al nostre país– però amb arguments prou sòlids i vàlids per a ser-hi.

En aquest primer capítol es pretén donar una dimensió objectiva de la problemàtica dels incendis forestals a Catalunya, a partir d'estadístiques històriques prou il·lustratives. A més a més, s'hi inclou una breu referència sobre la situació actual d'un dels països de l'arc mediterrani més afectats pels incendis com és Portugal, que, a banda, hi és pertinent pel fet que ha estat una zona on s'hi ha desenvolupat part d'aquest treball. Seguidament i per a donar una visió del tot global, es fa esment de la situació a altres països d'Europa i a altres zones del món on hi és present el problema dels incendis forestals. A continuació es presenten alguns aspectes bàsics i conceptes científics i tècnics necessaris per a la comprensió i el desenvolupament de la tesi, tant pel que fa al fenomen físic dels incendis com a les tècniques i als agents extintors i, finalment, s'aborden amb cert detall els objectius finals d'aquest estudi.

1.1. Els incendis forestals a Catalunya. Anàlisi històrica i conjuntural

El nostre país és un cas molt il·lustrador de la situació plantejada, en tant que l'ecosistema que hi habita és clarament el mediterrani. Els incendis forestals han devastat greument Catalunya durant els darrers anys, ocasionant danys a nivell humà i al medi ambient i destruint 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 1.1). Si bé en el període comprès entre els anys 1970-1985 els petits i mitjans incendis eren

els més freqüents, en aquests darrers dinou anys la seva incidència ha estat considerablement menor, degut a 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.

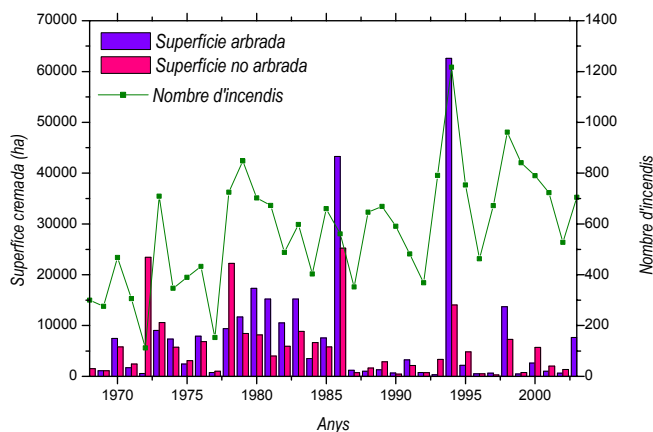


Figura 1.1. Nombre d'incendis i superfície cremada a Catalunya (període 1968-2003). Font: Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil. Generalitat de Catalunya.

Estadístiques publicades recentment pel Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya (Gencat, 2004), reflecteixen que el Cos de Bombers aconsegueix un èxit contundent en més del 96% dels incendis, ja que evita que cap d'aquests s'estenguin més d'10 ha. Nogensmenys, perd el control del 4% restant, responsables del 96% de la superfície total que anualment es crema. Així, l'acumulació de biomassa al bosc a conseqüència tant de la manca dels aprofitaments forestals i de l'abandonament de les terres creat per l'absentisme en les zones rurals, com de la pràctica desaparició dels petits i mitjans incendis que actuaven de fragmentadors deixant àrees netes de combustible, propicia la recurrència d'incendis tan devastadors com el del Berguedà-Solsonès l'any 1994 (prop de 40.000 ha cremades), el de Cap de Creus a l'Alt Empordà al 2000 (6.600 ha) o el de Sant Llorenç Savall al Bages l'any 2003 (4.600 ha cremades).

La situació de les àrees rurals juntament amb les condicions climàtiques que es donen els mesos d'estiu, fan de Catalunya un territori propici al desenvolupament d'incendis. A més, l'origen del foc ve provocat per causes degudes sobretot a negligències de la població, cosa que en dificulta enormement la predicció.

Crems agrícoles, forestals i de pastures, puntes de cigarreta i focs d'esbarjo entre d'altres, representen més d'un 40% de les causes que originen els incendis i un alarmant 22 % respon a la intencionalitat humana (taula 1.1).

Taula 1.1 Percentatge d'incendis segons les causes a Catalunya, durant el període comprès entre 1986-2001. Font: Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya.

Grup de causa	Causa	Incendis (%)
Causa Natural	Llamp	8,8
Negligències	Abocadors	2,5
	Crema pastures	3,5
	Crema agrícola	11,3
	Treballs forestals	2,9
	Fumadors	8,5
	Focs esbarjo	2,1
	Crema de deixalles	0,4
	Altres negligències	10,2
Accidents	Ferrocarril	0,8
	Línies elèctriques	5,1
	Motors/Màquines	2
	Maniobres militars	0,3
	Altres accidents	1,0
Intencionats	Intencionats	22,3
Causa desconeguda	Causa desconeguda	17,4
Revifats	Revifats	0,8

Totes aquestes dades són senzillament un recull per a reflectir de manera breu i clara la situació a Catalunya, i deixen en evidència el focus més important d'aquest problema al nostre país.

1.2. Breu apunt sobre els incendis forestals a Portugal

La situació a Portugal és certament encara més crítica. De fet, en els dos darrers estius (2003 i 2004), Portugal ha estat protagonista dels episodis d'incendis forestals més greus de les darreres dècades a l'arc mediterrani. Això, lligat al fet que part d'aquesta tesi ha estat desenvolupada al Centre d'Estudis d'Incendis Forestals de la Universitat de Coimbra, fa merèixer un breu esment sobre la situació d'aquest país.

Portugal té, de la mateixa manera que Catalunya, una conjuntura propícia a l'esdeveniment de grans incendis forestals. El col·lapse del seu sistema agro-forestal ve lligat en aquest país per una delicada fragilitat de la seva estructura de protecció civil (Viegas, 2004). Aquests fets, juntament amb les condicions meteorològiques extremes que s'esdevingueren durant l'estiu de 2003, donaren lloc als grans incendis que devastaren prop de 430000 ha i provocaren 21 víctimes mortals. La figura 1.2 recull l'estadística dels darrers 25 anys pel que fa a la superfície cremada i el nombre d'incendis i s'hi observa la tendència vertiginosa de l'increment d'ambdues dades provocada, en gran mesura, pels episodis ocorreguts recentment. La figura 1.3 il·lustra un instant dels dramàtics episodis de l'estiu de 2003.

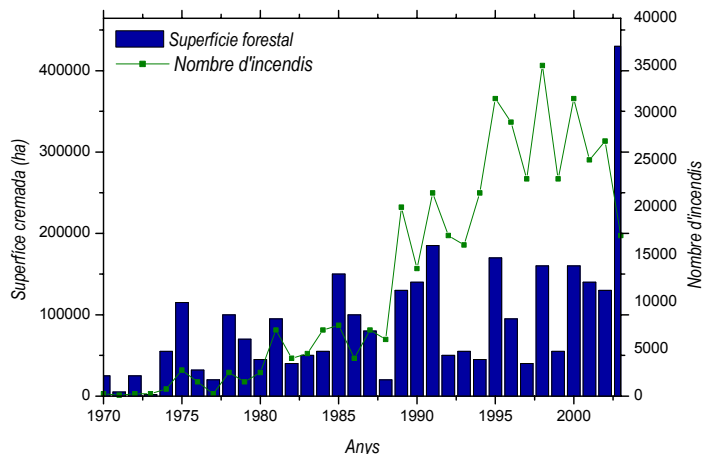


Figura 1.2. Nombre d'incendis i superfície cremada a Portugal (període 1970-2003). Font: Viegas (2004).



Figura 1.3. Incendi a Portugal el mes d'agost de 2003 (Font: D.X. Viegas).

1.3. Els incendis forestals, una problemàtica global

Catalunya i Portugal són només dos exemples il·lustradors del problema actual dels incendis forestals en el nostre planeta. Malauradament són diverses i molt nombroses les àrees afectades arreu del món pels incendis. Pel que fa a Europa, a banda de la península ibèrica, tot l'arc mediterrani d'aquest continent pateix en major o menor grau les conseqüències dels incendis. França, Itàlia i Grècia conformen conjuntament amb Espanya i Portugal aquesta àrea compartida d'alt risc.

Sense intenció de fer una anàlisi extensa sobre cadascun dels territoris mundials afectats, tant sols a tall il·lustrador és interessant veure la gran diversitat d'àrees i països conjunturalment diferents que viuen la problemàtica dels incendis forestals. D'aquesta manera senzilla, es pot intuir el seu abast mundial. A nivell

d'exemple, cal mencionar les zones tropicals d'Àsia, Àfrica, Amèrica i Oceania, que amb episodis del fenomen meteorològic de "El Niño", veuen devastades amb una recurrència esfereïdora milers d'hectàrees forestals. Els boscos equatorials del sud-est asiàtic i de Sud Amèrica també han lamentat greus incidents en els darrers anys, així com les regions septentrionals de boscos temperats del centre i l'est d'Àsia. Particularment, han estat afectades àrees siberianes, xineses i russes degut a episodis de sequera extrema. Seguint tot aquest recorregut cal fer especial esment també al continent nord-americà. Les estadístiques de les dues darreres dècades del segle XX en quant a àrees cremades a Canadà i a l'oest dels Estats Units, no són gens esperançadores pel que fa a la tendència que es pot esperar en aquesta entrada de segle.

Aquests són senzillament uns exemples puntuals que ajuden a entendre fins a quin punt els incendis forestals representen un problema global al nostre planeta, afectant a una immensa diversitat d'ecosistemes naturals i, òbviament, a una gran fracció de la població mundial.

1.4. Conceptes generals sobre incendis forestals per al seu estudi científic

Un incendi forestal és un fenomen termodinàmic complex on interactuen una gran diversitat d'actors i factors. L'estudi dels incendis, en qualsevol de les seves múltiples facetes, implica doncs també aquest cert grau de complexitat, creixent, d'altra banda, a mesura en què s'hi pretén aprofundir. Per tal de facilitar la comprensió de tots els punts abordats en aquesta tesi, tot seguit s'inclouen una sèrie de conceptes referits als incendis, de gran utilitat en aquest sentit. D'aquesta manera es pretén clarificar a base de senzilles definicions i classificacions diversos aspectes sobre la temàtica d'estudi, per tal d'assentar les nocions bàsiques sobre les quals parteix aquesta tesi.

1.4.1. Els incendis forestals. Definició i classificació

Un incendi forestal és un foc violent que es desenvolupa descontroladament en un espai obert afectant superfície vegetal. Es classifica genèricament en funció del combustible que en facilita el seu avanç i n'assegura el seu sosteniment. Discretitzant la vegetació, els incendis que involucren els diferents estrats corresponen a incendis de sòl, incendis de superfície o incendis de capçada. Tot seguit se'n defineixen les seves particularitats. Tanmateix, degut al gran nombre de variables que afecten el desenvolupament d'un

incendi, existeixen altres categories de classificació ben diverses, tals com la morfologia, el grau d'intensitat o el patró de comportament.

Incendi de sòl

Consumeixen matèria orgànica que es troba entre la superfície i la capa mineral del sòl, composta per virostes, fulles mortes, arrels, residus vegetals en descomposició, humus i torbes. Es detecten únicament per l'emissió de fums ja que normalment cremen sense flama. Avancen lentament degut a la manca d'oxigen, però la combustió es manté fins i tot amb continguts elevats d'humitat (Frandsen, 1987) durant dies o setmanes ocasionant danys considerables en el cicle ecològic; el consum de combustible és molt elevat causant lesions considerables. Es donen sobretot a alta muntanya i són poc freqüents. De tota manera cal considerar-los amb especial atenció, perquè en condicions particulars poden propagar-se a estrats superiors de vegetació, fet força comú en la fase decadent d'incendis que no han estat completament extingits.

Incendi de superfície

Es consumeix qualsevol tipus de material combustible disponible, situat immediatament per sobre de la superfície del terra i delimitat superiorment per les capçades dels arbres. Aquesta capa comprèn majorment fullaraca, branques mortes, agulles, troncs caiguts, restes de tala, vegetació herbàcia i matolls. El comportament d'un incendi de superfície és molt diferent en funció de la tipologia de vegetació involucrada. Incendis en prats, pastures, matollars i sotabosc entren dins d'aquesta categoria. En el decurs de la seva propagació, un incendi de superfície pot arribar a cremar arbusts, matolls alts i arbres petits, com passa tot sovint en incendis de garriguers, màquies mediterrànies i landes atlàntiques. Nogensmenys, aquests casos també s'inclouen dintre dels incendis de superfície. Finalment, cal apuntar que els incendis de superfície són els més comuns i també els més estudiats, ja que del seu estudi en deriven generalment els coneixements bàsics i essencials sobre els fenòmens termodinàmics que ajuden a entendre el comportament del foc.

Incendi de capçada

Anomenats també incendis de copes, són els típics en boscos de coníferes que incorporen, en major o menor grau, la combustió de les capçades dels arbres. La probabilitat d'ocurrència d'un foc de capçades més o menys violent dependrà, a banda de les condicions meteorològiques i topogràfiques, de la posició relativa del combustible en els diferents estrats, de la quantitat i disposició del combustible aeri i del

percentatge de combustible sec i fi present a les capçades (Trabaud, 1992). En aquest sentit es classifiquen atenent la següent terminologia.

Incendis de capçades passius

Les capçades (fulles, branques i tronc) d'un grup reduït d'arbres s'encenen de manera intermitent degut a la calor procedent del front d'un incendi que transcorre pel sotabosc. Aquest fenomen s'anomena també foc de torxa o foc de capçades discontinu i és bastant freqüent en pinedes clares amb matollar dens.

Incendis de capçades actius

La combustió té lloc al mateix temps en el combustible superficial i en les capçades. La calor i les flames provinents del foc a la superfície proporcionen l'energia necessària per sostenir la propagació també per les capçades dels arbres. Així, tot el front avança alhora amb una flama que abasta tots els estrats. Aquest fenomen també s'anomena incendi de capçades continu o dependent.

Incendi de capçades independent

El front avança ràpidament per les capçades amb independència de la combustió del combustible de superfície. Es donen en boscos molt densos, amb un recobriment de capçades superior al 75% de la superfície del sòl (Trabaud, 1992). Són molt perillosos però poc freqüents a l'Europa mediterrània.

1.4.2. La combustió en incendis forestals. Propietats dels combustibles

La reacció de combustió

La combustió es defineix com aquella reacció química on, amb la presència simultània d'uns reactius (combustibles i comburent) i una aportació de calor externa inicial, es formen noves substàncies anomenades productes de combustió, acompanyades d'un despreniment energètic. Els comburents són substàncies oxidants, com l'oxigen present a l'aire, i els combustibles són qualsevol substància capaç de reaccionar amb un oxidant per donar diòxid de carboni i aigua. Tota vegetació forestal és combustible i, a més, està permanentment en contacte amb l'aire. Per tant només cal aportar una determinada quantitat de calor (guspira, llumí, elevació de la temperatura, etc.) per tal que s'iniciï la combustió. Sovint, les condicions en què té lloc la reacció de combustió fan que no sigui possible que aquesta es dugui a terme de forma

completa. En aquest cas a més de diòxid de carboni i aigua es poden obtenir molts altres compostos derivats de la descomposició parcial del combustible. El procés de combustió de la matèria vegetal, sobretot quan la combustió no és controlada (com és el cas d'un incendi forestal), acostuma a produir-se de manera incompleta.

Fases de la combustió amb flama

La reacció de combustió que es produeix genèricament en els incendis forestals és amb presència de flama. Aquesta transcorre en tres fases diferenciades. La primera d'elles correspon a la ignició, ve seguida de la combustió pròpiament dita i finalment desapareix en la fase d'extinció. La fase d'ignició, definida genèricament com aquella en la que es duu a terme l'aportació externa de calor per a l'inici de la reacció de combustió, és probablement la més complexa sobretot en el cas dels incendis forestals, on el combustible es troba en fase sòlida. Així, aquesta fase d'ignició comença amb la deshidratació del combustible a una temperatura al voltant de 373 K, en la que s'evapora la humitat present en aquest. Seguidament, s'inicia la fase de piròlisi, on la calor aportada és utilitzada per a la descomposició tèrmica del combustible i l'evaporació de substàncies volàtils. Aquest procés comença aproximadament sobre els 473 K. Finalment, té lloc la inflamació, quan ja és garantida una presència suficient de combustible en fase vapor barrejat amb oxigen. Així, aquesta darrera aportació de calor serveix per activar la reacció de combustió, i la temperatura a la que això ocorre, es troba propera als 600 K (Pyne *et al.*, 1996; Dupuy, 1997; Mercer i Weber, 2001).

La fase de combustió correspon pròpiament a l'interval de temps en què té lloc aquesta reacció de manera continuada, consumint-se el combustible i el comburent. Es manté en tant en quant es garanteix la presència d'ambdós reactius i la calor alliberada és suficient per a sostenir l'evaporació del combustible. Quan manqui tant sols alguna d'aquestes dues condicions necessàries, la reacció s'anirà detenint donant lloc a la tercera i darrera fase, l'extinció. Així s'atura la reacció de la combustió en presència de flama i, si es donen les condicions adequades, poden tenir lloc altres tipus de combustió sense presència d'aquesta. És el cas de l'anomenada combustió lenta, típica dels incendis de sòl o el cas de la combustió incandescent, que correspon a la reacció residual que té lloc en els últims estadis d'un incendi pràcticament extingit.

Propietats dels combustibles forestals

Els combustibles forestals es poden caracteritzar des d'un punt de vista microscòpic i macroscòpic. L'anàlisi macroscòpica es refereix a la caracterització de la disposició del combustible en el medi, ja sigui natural o experimental, mentre que l'anàlisi microscòpica tracta principalment les característiques tèrmiques, geomètriques i químiques de les partícules de combustible, és a dir, les propietats intrínseques de l'espècie. Tot seguit es defineixen les propietats que s'engloben dins aquests dos grups.

Composició química

Els teixits de les plantes estan constituïts majoritàriament per molècules orgàniques de cadena llarga (polímers) amb un contingut aproximat del 50 % de carboni, 44 % d'oxigen i 5 % d'hidrogen (% en massa). Les molècules quantitativament més importants són la cel·lulosa (un polisacàrid de llargues cadenes lineals de β -D-Glucosa), l'hemicel·lulosa (carbohidrat de cadena més curta, basat en pentoses i hexoses) i la lignina (polímer aromàtic de cadena ramificada consistent en quatre o més monòmers de fenilpropà per molècula), però les plantes tenen també altres compostos que tot i ser quantitativament molt menys importants, tenen un paper rellevant en la inflamabilitat dels vegetals, com els terpens i les resines. Els terpens són hidrocarburs polímers de l'isoprè. Són substàncies oloroses amb un punt d'ebullició baix, per la qual cosa volatilitzen fàcilment. El seu contingut en fulles i tiges varia generalment entre el 0 i el 2 %, tot i que algunes espècies (com els cedres) poden arribar fins el 6 %. Les resines són compostos poc volàtils formats per àcids grassos, alcohols grassos, àcids resínics i fitoesterols. En darrer lloc, altres components minoritaris que poden afectar la inflamabilitat són els minerals. La fusta conté generalment menys del 2 % de cendres, mentre que les fulles poden tenir entre el 5 i el 10 % (excepte en arbustos de zones àrides i salines que pot arribar al 40 %). Els minerals actuen de catalitzadors en la piròlisi de la cel·lulosa afavorint la formació de carbó en detriment dels compostos volàtils inflamables (quitrans). Els vegetals rics en minerals cremaran amb més dificultat i formaran flames més petites que els que són pobres en minerals.

Contingut d'humitat (H_s , %)

El contingut d'humitat present als combustibles es defineix com la massa d'aigua per unitat de massa de combustible totalment sec (H_s), tot i que de vegades també pot ser expressada en referència a la massa total humida del combustible.

Les condicions ambientals que afecten el contingut d'aigua dels combustibles forestals morts són múltiples; la pluja, el vent, la temperatura i la humitat de l'aire, la radiació solar a la que estan exposats i la topografia del terreny on es troben.

Aquesta gran dependència fa que la variabilitat de la humitat sigui igualment gran, fet que en dificulta la seva determinació. Quan un combustible s'exposa a l'aire a una temperatura i humitat relativa determinades, perdre o guanyarà aigua fins que s'estableixin unes condicions d'equilibri entre el material i l'ambient. Considerant unes condicions ambientals no estacionàries, se'n dedueix també un valor fluctuant del punt d'equilibri, Això fa que la humitat del combustible es trobi també en un estat transitori permanent.

El contingut d'humitat dels combustibles forestals és un factor molt important a considerar en la propagació dels incendis, ja que part de l'energia alliberada durant la combustió s'empra per evaporar l'aigua del material contigu disponible. Si aquesta energia no és suficient per evaporar l'aigua, no es produirà la ignició, amb la qual cosa el foc s'anirà extingint.

Densitat (ρ_m , kg/m³)

La densitat (massa per unitat de volum) dels combustibles vegetals varia en funció de la humitat, ja que dependent d'aquesta, tant la massa com el volum variaran. És per això que la designació de la densitat s'ha de fer en qualsevol cas indicant si es computa en base seca o en base humida. La densitat acostuma a ser diferent d'una espècie a una altra, per tant, cal caracteritzar-la degudament si es vol estudiar l'efecte d'aquest paràmetre en la propagació de l'incendi sobre diferents tipologies de combustible.

Conductivitat tèrmica (k , W·m⁻¹·K⁻¹)

La conductivitat tèrmica o calorífica és una mesura de la capacitat de conducció tèrmica d'una substància, de valor igual al quocient entre la densitat de flux tèrmic i el gradient de temperatura existent. La conductivitat tèrmica de la fusta –d'entre 0,1 i 1,4 W·m⁻¹·K⁻¹ aproximadament– és molt més petita que la dels metalls –216 W·m⁻¹·K⁻¹ l'alumini, 45 W·m⁻¹·K⁻¹ l'acer– i entre dues i quatre vegades superior a la dels materials aïllants –0,035 W·m⁻¹·K⁻¹ la llana de roca. Hi ha diversos factors que poden afectar el valor de la conductivitat tèrmica, entre ells, la densitat, la humitat, la direcció del flux de calor (longitudinal, radial o tangencial respecte el creixement dels anells), les irregularitats que hi pugui haver (com els nusos) i la

temperatura. En general augmenta amb la densitat, la humitat i la temperatura. La seva caracterització és interessant sempre i quan es requereixi comptabilitzar la calor de conducció com a un fenomen de transferència de calor a considerar en la propagació d'un incendi.

Calor específica del combustible (C_p , $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

La capacitat calorífica (també anomenada calor específica) –designada normalment amb la lletra C_p – és la quantitat d'energia necessària per incrementar la temperatura d'una unitat de massa (kg) en un grau. En la fusta, depèn bàsicament de la temperatura i la humitat essent pràcticament independent de la densitat i de l'espècie. Per tal de distingir la nomenclatura referida a la calor específica pròpiament del combustible, s'utilitzarà un subíndex diferent a l'habitual. Així, la calor específica dels combustibles forestals es designarà amb C_f .

Calor de combustió (ΔH_c , kJ/kg)

La calor de combustió –designada normalment per ΔH_c – és la quantitat d'energia que s'allibera durant la reacció de combustió per unitat de massa. Aquesta energia varia d'una espècie a una altra, d'una part del vegetal a una altra i en funció també de la humitat. El càlcul de ΔH_c per a combustibles forestals és molt complex, degut a que aquests estan formats per moltes substàncies (de fórmula exacta desconeguda) que intervenen en diferents proporcions segons les espècies. Llavors, l'única manera que existeix per a conèixer la calor de combustió és experimentalment, i és en aquest cas quan s'utilitza el terme de poder calorífic. La determinació del poder calorífic dels combustibles forestals és cabdal per tal de quantificar amb exactitud la potència calorífica despresa en un front d'incendi.

Inflamabilitat

La inflamabilitat és la característica que determina la facilitat amb què un determinat combustible entra en combustió en presència d'una font d'ignició. S'avalua a partir de l'anàlisi de diferents paràmetres. D'una banda, a partir dels límits d'inflamabilitat, entesos com les concentracions mínimes i màximes de combustible en comburent dintre de les quals pot tenir lloc la reacció de combustió. Seguidament, mitjançant les temperatures d'inflamació i d'autoignició. La primera d'elles es defineix com el valor en què pot començar la reacció de combustió amb flama, mentre que la segona fa referència a la temperatura necessària que ha

d'assolir la mescla combustible/comburent per tal que s'activi la reacció de combustió sense una aportació d'energia addicional.

Combustibilitat

La combustibilitat es defineix com la facilitat d'un combustible per a sostenir la reacció de combustió, és a dir la facilitat de continuar cremant una vegada ja s'ha inflammat i, per tant, de facilitar l'avanç del front. Òbviament això depèn de multitud de factors i, per tant s'utilitza com a paràmetre de referència per a classificar genèricament el combustible segons el grau d'intensitat en què el foc s'hi propagarà. La manera de tipificar la combustibilitat en funció de l'estructura de la vegetació és a partir de la modelització del combustible, és a dir, de la classificació d'aquest segons els diferents valors de les propietats intrínseques i extrínseques més sensibles a la propagació del foc. El sistema de modelització més conegut i emprat en la gestió forestal fou desenvolupat per Rothermel (1972). Classificà les disposicions naturals de combustible en 13 categories, valorant la càrrega, la grandària i forma, l'altura del combustible i la relació d'empacament; paràmetres que tot seguit es descriuen.

Càrrega de combustible (C_s , kg/m², g/m², tn/ha)

La càrrega de combustible es defineix com la quantitat de combustible (mesurat en base seca) present per unitat de superfície. Expressar la massa en base seca permet caracteritzar un combustible independentment del seu estat. Cal tenir en compte que la humitat de la vegetació depèn bàsicament de les condicions ambientals i aquestes varien diàriament i estacionalment. Aquest paràmetre s'expressa habitualment en g/m² o kg/m² o tn/ha, depenent de l'ordre de magnitud de la càrrega. No obstant, habitualment també s'utilitzen altres maneres d'expressar la càrrega de combustible, com per exemple nombre de peus o soques d'arbre per hectàrea en zones de vegetació arbòria.

Grandària i forma del combustible

La forma i grandària dels combustibles vegetals s'expressa normalment en termes de la seva relació superfície/volum (m²/m³) –sovint s'expressa amb la lletra σ , com més petit sigui el combustible més gran serà aquesta relació. Com que les partícules petites tenen una superfície gran comparada amb el seu volum (σ gran) s'assequen més ràpidament i també són més fàcils de cremar. És per això que sovint tenen una gran influència en la propagació de l'incendi.

Densitat aparent del combustible, compacitat i porositat

La densitat aparent es calcula amb la massa de matèria vegetal dividida pel volum que ocupa en una determinada distribució. També s'obté a partir de la càrrega de combustible, dividint-la per l'altura (h) que assolix el llit. La densitat aparent és sempre menor que la densitat del material ja que aquesta no inclou aire, mentre que en la densitat aparent, part del volum està ocupat per aire. S'expressa, de la mateixa manera que la densitat del combustible, indicant si la mesura s'ha realitzat en base seca o en base humida. Pel primer dels casos, en aquest treball s'empra la designació ρ_{aps} mentre que pel segon, s'utilitza el paràmetre ρ_{aph} .

La compacitat s'acostuma a mesurar en termes de relació d'empacament, es designa amb el paràmetre β , i és entesa com la relació entre la densitat aparent i la densitat del material. Per tant, és una mesura del volum del llit de combustible ocupat realment per material.

De la mateixa manera, la densitat aparent és un bon indicador de la porositat. Aquesta darrera es designa amb la lletra η i és una mesura de l'espai existent entre la vegetació. Com menys espai hi hagi, menor és la porositat i més difícil és, en general, la propagació de l'incendi ja que l'aire entra amb més dificultat. Si la vegetació està més separada serà més sensible als canvis d'humitat i l'aire penetrarà amb més facilitat, fet que acostuma a facilitar la propagació de l'incendi. Òbviament, la suma de la porositat i la compacitat equival a 1.

Disposició del combustible

La manera com la vegetació es disposa sobre el terreny té una influència molt important en el comportament del foc. En general es poden distingir dues disposicions diferents segons l'orientació; la disposició horitzontal i la disposició vertical. L'herba, els arbusts o els arbres tenen una disposició vertical sobre el terreny, mentre que branques i troncs morts caiguts, fulles mortes i brossa en general tenen una disposició horitzontal.

Els combustibles disposats horitzontalment són un factor determinant en la propagació de l'incendi. Si es troben molt dispersos, serà difícil la propagació de l'incendi; per contra, si estan distribuïts contínuament i uniforme, la propagació estarà pràcticament assegurada. La disposició vertical dels combustibles determina quina part d'ells es veuen involucrats en l'incendi. Si hi ha continuïtat vertical, l'incendi pot passar fàcilment del sotabosc cap a les capçades, fet que pot comportar un canvi significatiu en el comportament de l'incendi.

1.4.3. Mecanismes de transferència de calor en els incendis forestals

Tot incendi presenta com a característica la transferència de calor. El tipus i la quantitat de calor transportada influeixen en la velocitat de propagació d'un incendi i, d'altra banda, la combustió no es pot mantenir sense un transport continu de calor. La transferència de calor s'efectua mitjançant tres mecanismes fonamentals: conducció, convecció i radiació. La conducció es considera com la transferència d'energia de les partícules més energètiques a les menys energètiques d'una substància, per mitjà de la interacció molecular present en aquesta. La convecció correspon a la transferència de calor mitjançant la combinació de dos mecanismes diferenciats, la difusió degut al moviment molecular aleatori (conducció) més el que transfereix energia mitjançant el moviment global o macroscòpic d'un fluid. Finalment, la radiació fa referència a l'energia transportada per ones electromagnètiques, emesa per la matèria que es troba a una temperatura finita. Aquests tres mecanismes succeeixen de forma simultània en el transcurs d'un incendi. Ara bé, la importància de cadascun varia en funció de la intensitat i magnitud de l'incendi, així com de la configuració del sistema que l'envolta.

Quan un combustible crema, la conducció –al contrari que la convecció i la radiació que, pràcticament, transporten l'energia des de la superfície del combustible– pot considerar-se com un mecanisme de transport de calor cap a l'interior de cadascuna de les parts del combustible. És per això, que per a l'estudi de la propagació dels incendis forestals, generalment, es pot negligir l'aportació de calor al medi combustible per conducció (Chandler *et al.*, 1983). Així, una gran part de calor generada en un incendi es transmet per convecció, i l'altra gran aportació en el transport ve donada per la radiació. El pes específic de cadascun d'aquests mecanismes és variant en funció de les característiques de l'incendi. Incendis que es propaguen sense o contra el vent, ho fan clarament gràcies al preescalfament per radiació que experimenta el combustible disponible per davant del front. En aquestes condicions, per bé que existeix un cert moviment d'aire ascendent que es dona per convecció natural des de la zona de combustió, la transferència de calor d'aquest aire cap al combustible posicionat per davant del front és considerablement menor a la transferència de calor per radiació emesa des de la zona de combustió i des del front de flames. Per altra banda, en incendis empesos pel vent o que transcorren sobre pendent, es dona conjuntament i de manera prou important la interacció entre els dos mecanismes. L'allargament de les flames i la major proximitat d'aquestes al combustible no cremat, incrementa la transferència de calor per radiació i a més, aquest combustible és escalfat també per convecció forçada. En darrer lloc, cal fer esment a la participació

d'aquests mecanismes en l'inici de focs de capçada. En aquest sentit, és cabdal l'escalfament del combustible aeri per part de la columna de convecció que es forma en superfície.

Aquests són alguns exemples senzills que ajuden a il·lustrar la complexitat del fenomen de la transferència de calor en la propagació d'incendis forestals, una qüestió tan important com difícil de modelitzar, fins i tot en els casos de major simplicitat.

1.4.4. Característiques geomètriques i físiques dels incendis forestals

El coneixement de les diferents característiques geomètriques i paràmetres físics és imprescindible per a descriure'n i entendre'n el seu comportament. En aquest apartat es presenta primerament la terminologia més emprada pel que fa a la descripció de la geometria d'un incendi i tot seguit s'incideix amb més detall en les definicions dels paràmetres físics que tenen un paper cabdal en el desenvolupament de la tesi.

Morfologia i geometria de l'incendi

L'estudi de la morfologia de l'incendi forestal, des del seu inici fins al seu estadi final, permet plantejar correctament i en tot moment l'emplaçament i l'atac de les brigades d'extinció. En general, els incendis forestals no adquireixen formes regulars, ja que la seva progressió ve marcada per un gran nombre de factors, tals com les condicions meteorològiques (direcció i velocitat del vent, temperatura i humitat atmosfèriques), topogràfiques (pendent, orientació) i ecològiques (disposició i espècies vegetals). Així, generalment es desenvolupen seguint geometries irregulars, com el perímetre representat en la figura 1.4.

En aquesta figura s'hi distingeixen les diferents parts que conformen la totalitat del perímetre. S'hi observa el front, que correspon a la part que avança amb major velocitat i intensitat, la cua, just la part oposada, i els flancs, referits a la part esquerra i dreta del perímetre, situats entre el front i la cua. Amb tot, la irregularitat d'aquesta figura es dona per la presència de dits o entrants o, fins i tot d'illes no cremades en el seu interior o prolongacions completament independents d'aquest, definides com a focus secundaris.

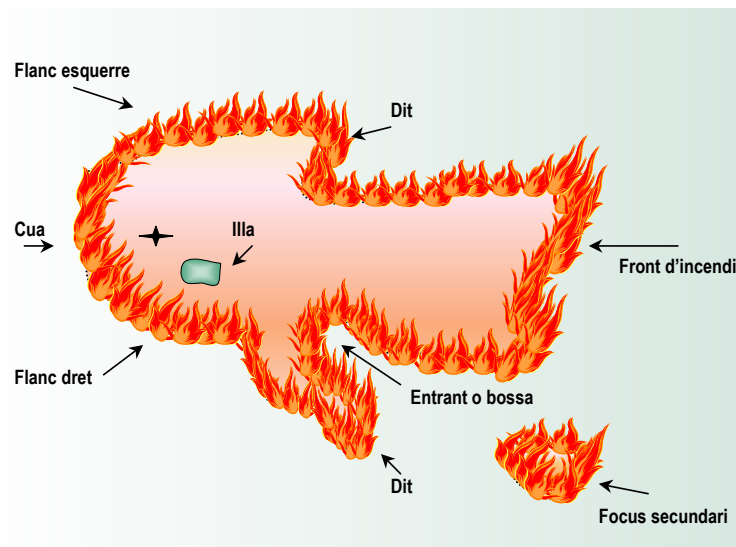


Figura 1.4. Perímetre d'un incendi forestal.

Una anàlisi més detallada del perímetre de foc, permet distingir-ne alhora les diferents característiques geomètriques d'aquest. Així se'n defineix l'altura, com l'extensió vertical mitjana màxima de les flames, mesurada des de la superfície del terreny fins a la punta d'aquestes; el gruix, com la zona dins la qual es produeix una combustió amb flama de forma continuada; la longitud, com la distància existent entre la punta de la flama i el punt mig del seu gruix; i finalment l'angle, com la inclinació de la flama respecte la superfície del terreny.

Característiques físiques

Els paràmetres emprats per a l'estudi del comportament dels incendis són múltiples, atesa la gran diversitat de fenòmens que ocorren en un foc forestal. Tot seguit es defineixen breument aquells que són d'especial interès en el treball desenvolupat en aquesta tesi. En posteriors capítols s'incideix amb més detall en tots ells.

Velocitat de combustió (V , $g \cdot s^{-1} \cdot m^2$, $g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)

La velocitat de combustió (V) es defineix com la quantitat de combustible que es crema per unitat de temps. Aquesta pot expressar-se en funció de la superfície ($g \cdot s^{-1} \cdot m^2$) o de la longitud del front de flames ($g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$).

Aquesta darrera designació és la utilitzada en aquesta tesi, i les seves unitats s'expressen en $\text{g s}^{-1} \text{m}^{-1}$. La velocitat de combustió, també anomenada per certs autors com la velocitat de pèrdua de massa, està relacionada directament amb la velocitat d'alliberació d'energia del front d'incendi.

Taxa de cendres (χ , %) o de combustió (η , %)

La taxa de cendres o de residu es defineix com el percentatge en càrrega de matèria no cremada respecte la càrrega de combustible sec inicial. Dóna idea de la qualitat i la completesa de la reacció de combustió que ha tingut lloc en el llit de combustible. Aquest concepte també pot ser avaluat a partir de la taxa de combustió, definida com la fracció d'àrea cremada respecte la totalitat del llit de combustible. Ateses aquestes definicions, les dues taxes esdevenen doncs complementàries.

Velocitat de propagació (R , cm/s, m/min)

La velocitat de propagació d'un incendi es refereix a l'espai recorregut pel seu front per unitat de temps. Les unitats amb les que s'expressa són diverses, segons la magnitud del paràmetre. En aquest sentit les unitats emprades en aquesta tesi són dues, cm/s i m/min en funció del front d'incendi estudiat. És certament el paràmetre més conegut i utilitzat per a descriure el comportament dels incendis, ja que està directament relacionat amb la intensitat i perillositat del foc, a banda de ser amb tota probabilitat la magnitud més intuïtiva de totes.

Potència calorífica radiant (Q, W), poder emissiu ($E, \text{W/m}^2$) i temperatura (K)

La potència calorífica es defineix genèricament com la quantitat d'energia alliberada en un front d'incendi per unitat de temps. Aquesta potència també pot anar referenciada a les dimensions del front. D'aquesta manera es pot expressar la quantitat total d'energia alliberada per metre lineal de front, anomenada genèricament intensitat lineal, o bé per metre quadrat de zona de combustió. D'altra banda, també es pot diferenciar el mecanisme de transferència d'energia al què fa referència aquesta potència. Així es distingeix, per exemple la potència calorífica radiant (Q, W), entesa com l'energia emesa per radiació per un front d'incendi per unitat de temps, i, seguint la mateixa particularitat, aquesta potència pot anar també expressada en relació a la superfície radiant. En aquest cas, es parla de poder emissiu del front d'incendi (E) i les seves unitats s'expressen en W/m^2 . Estretament lligada a aquests paràmetres, la temperatura de la superfície radiant

considerada també hi té un pes específic important. Les unitats de temperatura utilitzades en aquest sentit són K.

1.4.5. Factors que influeixen en el comportament dels incendis forestals

Les característiques que configuren el comportament d'un incendi forestal, atenent diferents escales temporals i espacials i englobant múltiples categories, venen 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, o mesurada a partir de les conseqüències directes que en deriven com poden ser el nombre d'hectàrees cremades, el nombre de vides humanes perdudes 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.

D'aquesta manera, en l'estudi de les causes, l'evolució i els efectes dels incendis es veuen relacionats de manera més o menys directa elements tan diferents com el règim de pluges i vents, les actuacions preventives, l'orografia del territori, la composició química del combustible o les dotacions dels equips d'extinció, per exemple.

Aquest apartat descriu, únicament a nivell exemplificatiu, alguns dels factors més determinants en l'evolució termodinàmica de l'incendi; el seu origen, les seves interrelacions i els seus efectes directes en el front de flames. Òbviament, representen únicament un petit sector de tots els condicionants que interactuen globalment en el fenomen, però són la part essencial per a entendre el desenvolupament dels incendis forestals en termes científics. La figura 1.5 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 observen un gran nombre de connexions entre elements d'un mateix grup i entre grups diferents, fruit de les interrelacions existents entre els mateixos. En l'apartat 1.4.2 ja s'ha exposat extensament les particularitats dels combustibles forestals, i com aquestes actuen en l'inici i desenvolupament d'un incendi. Tot seguit es donen algunes pinzellades sobre l'efecte de la meteorologia i la topografia en aquest mateix sentit.

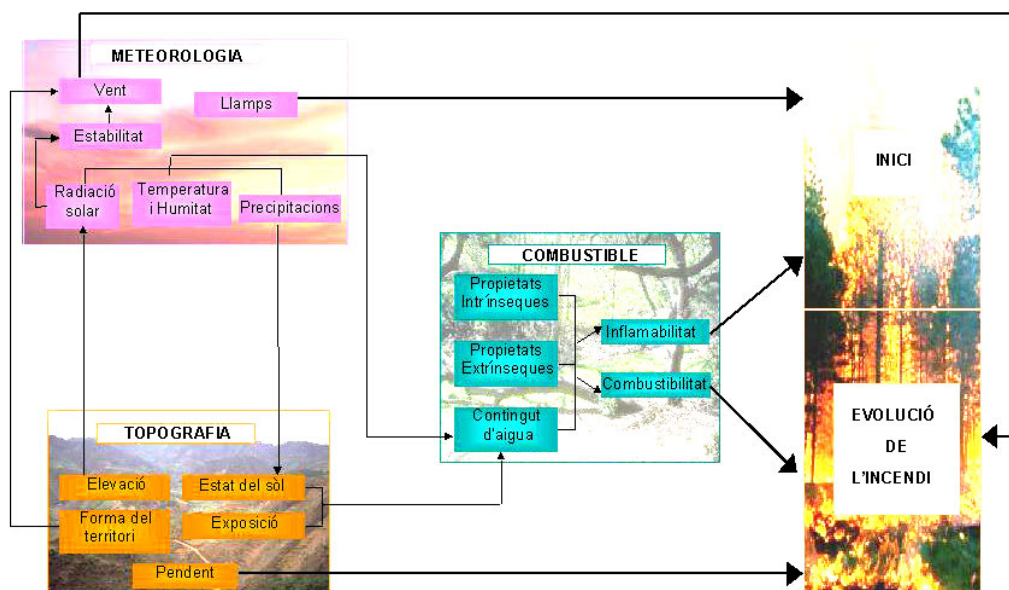


Figura 1.5. Representació esquemàtica de la influència de la meteorologia, la topografia i el combustible en l'inici i l'evolució d'un incendi forestal.

Factors meteorològics

Dins els elements ambientals que influeixen en el comportament de l'incendi forestal, el clima i les condicions meteorològiques són factors que condicionen la ignició i el desenvolupament d'un incendi forestal. Ambdós estudien un mateix fenomen des de diferents escales temporals; el clima analitza estadísticament les característiques de l'atmosfera a llarg termini mentre que la meteorologia estudia els fenòmens atmosfèrics i el seu comportament amb el temps. Totes dues branques aporten informació sobre un conjunt de variables que exerceixen una influència determinant en el decurs d'un incendi forestal. A tall il·lustrador, cal esmentar l'efecte de la radiació solar i la temperatura de l'aire en la inflamabilitat dels combustibles, la humitat de l'aire en la ignició i la propagació, l'estabilitat atmosfèrica en la intensitat del front i el comportament de l'incendi i finalment el vent, possiblement el factor més determinant. Aquest actua directament en la propagació de l'incendi, sobre la reacció de combustió, sobre la preponderància d'uns o altres mecanismes de transferència de calor i sobre el transport de gasos i partícules incandescentes en la columna de convecció implicades en la formació de focus secundaris i en determina, conjuntament amb la interacció d'altres factors, la morfologia final del perímetre d'incendi i la geometria de les flames.

Factors topogràfics

La topografia és un dels factors que més influeix en el comportament de l'incendi, tant per la seva relació directa en la propagació del front de flames (afecta directament a l'actuació d'uns o altres mecanismes de transferència de calor i a la reacció de combustió) com per la seva connexió amb la vegetació i amb certs factors meteorològics. En comparació amb aquests darrers, els factors topogràfics són els més constants, i, en conseqüència, la seva influència en l'incendi és més fàcil de preveure. El pendent és el paràmetre que té una influència més gran en la majoria d'incendis, respecte la resta de paràmetres topogràfics. El seu efecte és similar al del vent (Pyne, 1996; Trabaud 1992). Igualment el pendent provoca una inclinació i un allargament de les flames i la columna de convecció, que es tradueix en un increment de la velocitat de propagació. La diferència principal rau en la magnitud de l'efecte; un incendi empès per forts corrents de vent s'estén 100 vegades més ràpid que en absència de vent mentre que la influència corresponent al pendent no excedeix un factor de 20 (Viegas, 1998a). D'altra banda, existeixen altres aspectes de la topografia del territori que poden intervenir de manera important en el desenvolupament d'un incendi. La orientació de les vessants, la configuració del relleu i l'elevació poden ser cabdals a l'hora de determinar la propagació del foc.

1.5. Aspectes bàsics sobre tècniques d'extinció i agents extintors

L'extinció d'incendis forestals és una tasca molt complexa i requereix la combinació adequada d'estratègies, mitjans i agents extintors, en funció de cada escenari. La posada en pràctica conjunta de diferents tècniques d'atac –directe sobre el perímetre de l'incendi o indirecte sobre les zones de combustible properes a les flames–, del treball dels diferents equips humans i materials –terrestres i aeris– i de la utilització dels diferents productes extintors disponibles, és francament costosa i presenta una gran diversitat de variants.

Per bé que la pràctica en l'extinció d'incendis ha evolucionat enormement durant les darreres dècades, encara són molts els interrogants presents en aquest sentit. D'entre tots ells, un dels que suggereix més interès per part de les diferents brigades que actuen a la conca mediterrània és la utilització de productes químics que reforcin la capacitat extintora de l'aigua. De fet, fa més de setanta anys que es coneixen quins són els additius que incrementen l'efecte de l'aigua sobre les flames (Barret, 1931; Traux, 1939; Tyner, 1941) i en fa prop de cinquanta que s'utilitzà als Estats Units la primera formulació en la lluita contra

incendis, en l'anomenada *Operation Fire Stop* (1955a, 1955b). Tanmateix, manca encara un cert grau d'optimització d'aquest recurs per part dels cossos de bombers.

1.5.1. Retardants per a l'extinció d'incendis forestals

Es defineix com a retardant del foc aquella substància o barreja de substàncies que dipositada sobre la superfície d'un material –directament o bé diluïda amb aigua– o mesclada amb aquest, en fa disminuir la inflamabilitat i/o la combustibilitat. Els retardants emprats en l'extinció d'incendis forestals poden classificar-se de diverses maneres. D'una banda, atesa la seva aplicació; ja sigui directa sobre les flames o indirecta sobre el combustible proper amenaçat per aquestes, aplicant-hi franges químiques tallafocs. Així es parlarà d'*agents extintors* en el primer cas i d'*agents retardants* pròpiament, en el segon. Finalment, quan la utilització es duu a terme sobre les brases que resten després del pas d'un front, s'utilitzarà el terme d'*agents de prevenció*.

D'altra banda, aquests productes també es classifiquen en funció del temps de durada de la seva acció sobre l'incendi. D'aquesta manera, es classifiquen com a *retardants a curt termini*, o *retardants a llarg termini*. El primer grup correspon a aquells productes l'efecte dels quals és pràcticament nul després d'una hora aproximadament d'haver estat aplicats. Això és degut a que llur mecanisme d'actuació està subjecte a la presència de l'aigua en què hi són dissolts. Així, quan aquesta s'evapora, els retardants a curt termini deixen d'actuar. Pel que fa als retardants a llarg termini, es classifiquen d'aquesta manera perquè encara són efectius després de diverses hores de la seva aplicació, per bé que aquests compostos perden part de la seva eficàcia extintora quan s'ha produït l'evaporació total de l'aigua de dissolució. Aquesta denominació, però, pot induir a confusió (Vélez, 2000), de tal manera que, actualment, la classificació més emprada en la terminologia de l'àmbit forestal és la següent:

- *Escumògens*. Considerats com a retardants a curt termini i emprats com a agents extintors o preventius. Dins aquest grup s'hi inclouen els compostos denominats comunament com a detergents: surfactants, humectants i tensoactius.
- *Viscosants*: Considerats com a retardants a curt termini i emprats com a agents extintors o preventius. El silicats de magnesi, les gomes i els mucílegs en són els principals compostos.

- *Retardants a llarg termini.* Classificats com a tals pel seu llarg efecte i emprats com a agents extintors i retardants. Es consideren dins aquest grup diverses sals amòniques, en concret sulfats, fosfats i polifosfats.

Tot seguit, se'n descriuen amb detall les seves particularitats.

Escumògens

Els escumògens són concentrats líquids d'agent emulsionant (detergent) que barrejats amb aigua formen solucions escumejants, generadores doncs d'escuma. L'acció dels escumògens sobre l'extinció de les flames és doble. Per a una part, aïlla el combustible vegetal de l'aire –i per tant de l'oxigen que actua de comburent– mitjançant una capa resistent i continua de bombolles, l'espuma, que cobreix la superfície de la vegetació tractada. I per altra part, millora la humectació de l'esmentat combustible, ja que l'aigua barrejada amb l'escumògen té una tensió superficial més petita i això facilita la seva penetració a través dels porus del material combustible. Així, aquest material està més humit emprant menys aigua. A més, l'aigua barrejada amb l'espuma en penetrar dins del combustible reté més la humitat, això es deu a que l'aigua a l'interior dels teixits vegetals s'evapora més difícilment.

Una de les característiques més importants relacionada amb els escumògens és la capacitat d'expansió que poden donar a les dissolucions escumejants que formen. Quan més gran sigui la capacitat d'expansió millor serà l'escumògen i es necessitarà menys aigua en les tasques d'extinció. Els escumògens emprats normalment al nostre país donen uns coeficients d'expansió a les dissolucions escumejants que varien entre 7 i 10. Això implica una efectivitat en l'extinció de l'incendi de 2 a 4 vegades més que si s'empra únicament aigua com a agent extintor; per tant, només caldrà de la meitat a una quarta part de l'aigua que caldria per apagar l'incendi amb aigua sense escumògen.

La seva aplicació pot ser terrestre –mitjançant equips motoritzats tals com camions cisterna, vehicles patrulla i primer atac o amb equips manuals del tipus motxilla extintora– o aèria, amb avions, helicòpters o hidroavions. En el primer cas, la concentració recomanable és del 0,5% en volum, mentre que en l'aplicació aèria la dilució ha de ser menor, de tal manera que es recomanen concentracions properes a l'1%.

Finalment, pel que fa a la seva acceptació, cal dir que aquests productes assoliren el seu màxim reconeixement durant la dècada dels vuitanta. Tanmateix, de seguida se n'observaren els seus

inconvenients, derivats de la curta durada del seu efecte. Avui en dia, tant pels escumògens emprats, però sobre tot pels equips d'aplicació utilitzats, ha millorat notablement el temps d'estada de l'espuma sobre el combustible forestal. Aquest està entre 30 minuts i 1 hora (Vélez, 2000) en condicions meteorològiques normals.

Viscosants

Els agents viscosants són compostos que incrementen notablement la viscositat de l'aigua o de dissolucions aquoses, de tal manera que aconseguen evitar-ne la dispersió quan se'n produeix una descàrrega amb finalitats d'extinció. A més, asseguren també una bona adhesió del líquid sobre el combustible i garanteixen la homogeneïtzació i l'estabilització de la mescla on hi són presents.

Aquests són o bé argiles o bé compostos de tipus orgànic com gomes, polímers, derivats de la cel·lulosa, etc. Quan s'utilitzen viscosants orgànics cal introduir amb ells un inhibidor per evitar la seva descomposició bacteriana, per exemple el formaldehid, en el cas dels derivats de la cel·lulosa. De tots aquests compostos, els més utilitzats són l'argila d'attapulgita i la goma de guar. L'argila d'attapulgita és un silicat de magnesi $((H_2O)_6Mg_5Si_8O_6)$ molt emprat, perquè les seves suspensions no pateixen variacions importants de viscositat. La goma de guar és un polisacàrid format per manosa i galactosa, i les seves dissolucions són susceptibles a variacions de viscositat amb el temps; com que és un compost orgànic, el seu ús requereix l'addició d'un inhibidor bacterià.

L'aplicació d'aquests productes s'ha de fer sempre en funció del mullat òptim que es vulgui obtenir de la zona a tractar, el qual depèn del medi d'aplicació utilitzat. Si s'utilitzen medis terrestres motoritzats o manuals s'ha de procurar que la viscositat del líquid emprat estigui per sota dels 1000 cP, per evitar excessives pèrdues de càrrega en les bombes i mànegues dels equips, així com la seva obturació. En canvi, si s'utilitzen medis aeris la viscositat del líquid ha d'estar per sobre dels 1000 cP, perquè el producte arribi al terra d'una forma més efectiva (Hardly, 1977). Per assolir aquests nivells de viscositat cal diluir aquests compostos en un 0,5-2% en volum. Un altre paràmetre a tenir en compte és la densitat de la mescla que s'obté per l'addició de l'agent viscosant. Aquesta densitat no pot ser superior a 1200 kg/m³, ja que amb densitats més grans el pes de la descàrrega per medi aeri pot ser massa elevat i fer mal bé el bosc tractat; a més, en cas d'extinció d'un incendi, pot representar un perill pels medis terrestres.

En referència a l'acceptació per part dels equips de bombers, cal assenyalar que tingué el seu màxim durant els anys setanta, deixant lloc als escumògens en la dècada següent, tal i com ja s'ha apuntat. Nogensmenys, durant els darrers anys ha aparegut una nova generació de viscosants, els anomenats gels superabsorbents que, a banda de l'acció inherent a aquesta categoria, també tenen propietats refrigerants i ignífugues. De tota manera, la seva actuació segueix essent a curt termini.

Retardants a llarg termini

El mecanisme d'actuació de les sals retardants sobre un front d'incendi és múltiple i molt més complet que el de les altres dues tipologies de productes descrits. Per tal de comprendre el seu efecte és necessari interpretar les reaccions químiques que tenen lloc en el retardant en presència d'una font de calor (figura 1.4).

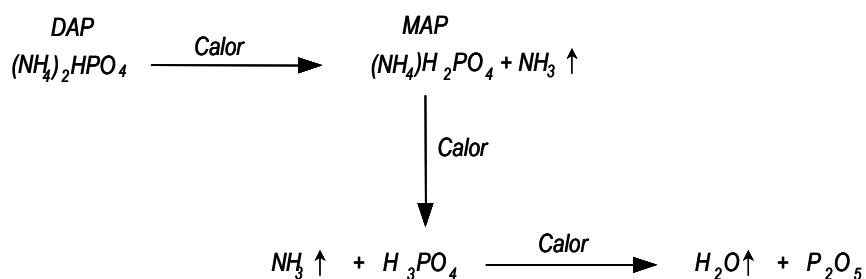


Figura 1.4. Descomposició en cadena del fosfat de diamoni en presència d'una font de calor.

En la figura precedent s'observa la descomposició en cadena del fosfat de diamoni (DAP) –una de les sals típiques emprades en les formulacions comercials– en presència d'una font de calor. Aquesta segueix els següents passos. En primer lloc quan el DAP és escalfat per la proximitat d'un front d'incendi es descompon en amoníac i fosfat de monoamoni (MAP). Amb més aportació d'energia, el MAP, per la seva banda, dóna lloc a més amoníac i a àcid fosfòric i aquest darrer, també per acció de la calor, produeix vapor d'aigua i pentòxid de difòsfor. Aquesta sèrie de reaccions de descomposició de la sal retardant és la responsable de l'efecte múltiple sobre la inflamabilitat i la combustibilitat del material exposat a un incendi. En primer lloc, la formació de P_2O_5 , component actiu del retardant, impedeix i interfereix la formació dels gasos de piròlisi combustibles, responsables de la combustió amb flama. Per altra part, els vapors d' NH_3 i H_2O refreden el

combustible, la qual cosa provoca la seva descomposició a una temperatura més baixa, donant lloc a una combustió sense flama. El productes d'aquest tipus de combustió són, d'una banda, el carbó –que crea una capa protectora que aïlla el material combustible– i per altra banda, el vapor d'aigua, que incrementa encara més l'efecte de refrigeració.

Cal remarcar que, depenent del tipus de retardant emprat, aquests mecanismes es desenvolupen amb més o menys grau. Així, el sulfat d'amoni, emprat com a salt retardant durant molt temps però actualment en desús, potencia el mecanisme d'acció durant la fase d'ignició (combustió amb flama) reduint la formació de gasos combustibles. Mentre que, si s'utilitzen fosfats o polifosfats la seva acció és igual d'efectiva per a qualsevol de les fases de combustió, amb flama o sense. Les figura 1.5 il·lustra les diferències entre aquestes sals, mitjançant la representació gràfica de les corbes de descomposició tèrmica del sulfat d'amoni i el fosfat d'amoni. S'observa que el sulfat es descompon ràpidament a partir dels 300°C i que, sobre els 425°C ja no queda agent retardant, mentre que el fosfat d'amoni es descompon molt més lentament i desapareix als 700°C.

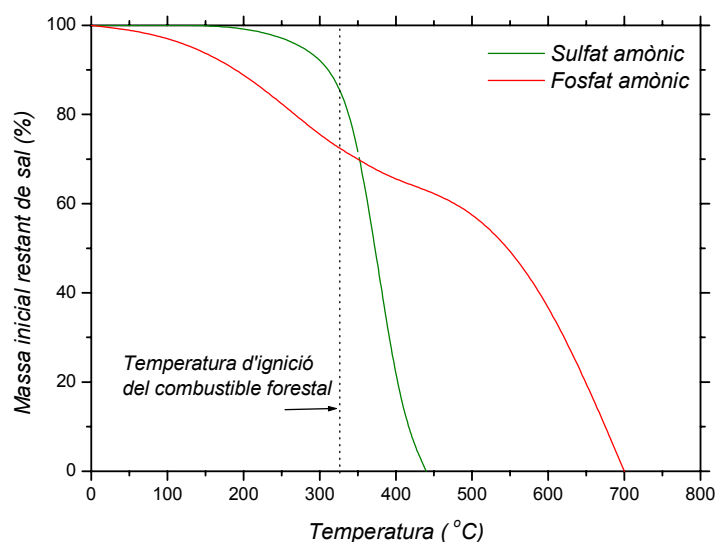


Figura 1.5. Corbes de descomposició tèrmica del sulfat amònic i del fosfat amònic.

Aquestes sals es comercialitzen habitualment en forma de líquid concentrat o en pols i, de manera genèrica, per tal de potenciar encara més la seva eficàcia, s'hi inclou també en la formulació agents viscosants com

els descrits en el punt precedent, a banda d'anticorrosius i colorants per tal de protegir els equips d'aplicació i fer-los visibles en el seu ús com a agents retardants.

En referència a l'aplicació d'aquestes sals, es realitza en dissolució aquosa (d'un 20% en volum) tant per mitjans terrestres com aeris i la seva dosificació oscil·la entre els 0,5 i els 5 l/m² en funció de l'altura de la vegetació a tractar així com de l'amplada del tallafoc. Pel que fa a la seva utilització, aquesta ha estat continuada al llarg dels darrers trenta anys, degut a la seva major eficàcia respecte els escumògens i els viscosants, no exempta, però, de polèmiques referents a llur toxicitat, impacte ambiental i cost. Per bé que diversos estudis corroboren el mínim impacte d'aquests productes sobre les persones, la vegetació, la fauna i el medi aquàtic, la discussió està essent en els darrers anys tan intensa com controvertida, la cosa ha derivat fins i tot en sancions legals pels fabricants d'aquests productes (Oegema, 2004). A més, el debat també té un fort component econòmic a causa del desconeixement generalitzat d'aquest aspecte entès pròpiament com una mesura de la capacitat d'extinció de l'incendi (Giraud i Picard, 2000).

1.6. Conclusions. Abast genèric de la tesi

De les reflexions i els conceptes fins aquí exposats en deriven unes conclusions prou òbvies. Els grans incendis forestals representen un problema de primer ordre a l'Europa Mediterrània. La lluita contra aquest fenomen és molt costosa, tant a nivell preventiu com pel que fa a l'extinció pròpiament dita, tanmateix existeixen mecanismes que en faciliten el combat.

La construcció de tallafocs químics amb retardants és considerat un dels recursos més efectius en la lluita contra els grans incendis forestals, per damunt de la utilització d'escumògens i viscosants. Tots tres tipus de productes poden ser utilitzats directament com a agents extintors de fronts d'incendis de menor magnitud, tant amb mitjans terrestres com aeris. No obstant això, quan el foc transcorre amb una gran producció de fum i amb flames molt altes i extremadament intenses, es fa pràcticament impossible aquest atac directe. És en aquestes situacions en què és indicat l'ús de tècniques indirectes d'extinció, com les barreres químiques tallafocs que s'apliquen al combustible a una certa distància del front de l'incendi.

Per bé que la tècnica té una eficàcia provada, encara existeixen molts interrogants respecte la seva utilització òptima en el sentit més ampli. La recerca en aquest punt és cabdal degut a les implicacions

econòmiques i mediambientals inherents als retardants a llarg termini. És per això que l'abast d'aquesta tesi s'emmarca en aquesta direcció; en la d'aportar nous coneixements sobre els productes retardants i els seu efecte en l'extinció del foc, per tal de contribuir a la complexa però important tasca que representa la lluita contra els incendis forestals en els ecosistemes mediterranis.

2. ANTECEDENTS

L'estudi de l'eficàcia dels retardants en l'extinció d'incendis forestals implica necessàriament l'anàlisi de dades referents a les principals variables que descriuen el comportament del foc sota l'efecte d'aquests productes. L'extracció d'aquestes dades en emergències d'incendi reals és una tasca certament complexa i arriscada. És per això que des de fa més de cinquanta anys, els productes químics que presenten propietats retardants s'han avaluat sota condicions experimentals controlades. Ha estat així, òbviament, en la recerca i desenvolupament dels productes, però també en els estudis més específics d'eficàcia, qualitat, sistemes d'aplicació i impacte mediambiental.

Per altra banda, l'estudi d'una tècnica d'extinció d'incendis forestals demana, prèviament i en qualsevol cas, un coneixement aprofundit del fenomen. Cal conèixer abastament el comportament del foc, per tal d'avaluar correctament els efectes que en deriven a l'aplicar-hi un mecanisme inhibidor.

Aquests antecedents s'enfocaren doncs en ambdues direccions. En primer lloc, s'estudiaren els principals treballs –basats essencialment en tècniques de modelització matemàtica– dirigits en aportar nous coneixements sobre el comportament d'un incendi i, seguidament, es feu el mateix pel que fa a la recerca en termes d'efectivitat de retardants.

En aquest capítol es resumeixen aquests dos esforços i se n'extreuen les conclusions principals d'on en deriven finalment els objectius específics de la tesi. Prèviament, però, s'incideix genèricament en el marc

global de la recerca científica en incendis, del qual parteixen aquestes dues línies sobre les que es pretén aprofundir.

2.1. La recerca científica en incendis forestals

La recerca en el camp dels incendis forestals ha perseguit ja des dels seus inicis una intenció i uns objectius clars i difinits. Els problemes inherents als incendis, breument comentats en el capítol introductori, han representat el motiu més evident per a què la recerca científica hagi dedicat un gran esforç a què, de la seva activitat, en derivin eines útils, aplicables i operatives per a la prevenció i l'extinció del foc. És per aquest motiu que ja des de principis del segle XX conviuen i interactuen els primers científics i tecnòlegs amb els actors principals del bosc i els gestors del territori. Aquesta comunió no únicament s'ha mantingut fins a dia d'avui, sinó que s'ha vist clarament reforçada, en tant en quant la problemàtica ha arribat a situacions de greu insostenibilitat i ha implicat a multitud de sectors. A més, el desenvolupament tecnològic i la gran especialització professional ocorreguda durant les darreres dècades en diversos camps científics i tècnics hi ha afavorit clarament. És així com, partint dels anys vint –amb programes de recerca senzills i embrionaris focalitzats d'una banda en millorar les tècniques d'extinció de l'època i per l'altra en intuir els principals fenòmens físics del foc–, a dia d'avui es compten una gran diversitat de línies de recerca amb objectius específics i gualment diferenciats però perseguint una mateixa fita, contribuir a la millora de cadascuna de les tasques de prevenció i extinció que han de dur a terme els diferents professionals involucrats.

Els objectius primordials en la prevenció i l'extinció d'incendis consisteixen en reduir-ne el risc d'inici, limitar-ne els efectes i facilitar i optimitzar les operacions de supressió (Castelló, 1999). La metodologia emprada per assolir-los és diversa i complexa, però amb tot, pot quedar resumida en quatre tasques bàsiques:

- Registrar característiques diverses del territori: orografia, tipus de combustibles amb els seus trets diferencials, xarxa viària, habitatges, punts d'aigua, àrees d'oci, etc.
- Analitzar la perillositat de la zona, tant pel que fa a l'inici d'incendis com al seu posterior desenvolupament.

- Aplicar els canvis corresponents en la infraestructura territorial preventiva, per tal de reduir la perillositat, duent a terme actuacions com reparacions i manteniment de pistes, construcció de nous punts d'aigua, reducció de combustible mitjançant tallafocs, cremes prescrites, clarejats, desbrossaments, entre d'altres.
- Dissenyar plans d'atac al foc, coordinar-los i executar-los de manera eficient, procurant una minimització dels danys amb una optimització dels recursos.

Considerant aquest procediment, les principals línies de recerca en incendis forestals sobre les què s'està treballant en l'actualitat, poden quedar classificades igualment en quatre grans grups (Pastor *et al.*, 2000):

- *Desenvolupament de tècniques i instruments per a l'elaboració de la cartografia on s'inventariïn dades territorials.* La utilització de sistemes d'informació geogràfica, l'elaboració de models de classificació de combustible i el disseny de programes d'experimentació per a determinar-ne les propietats, són algunes de les accions que es duen a terme dins aquest àmbit.
- *Millora del coneixement referent al risc i a la propagació d'incendis.* La modelització matemàtica de les principals variables que intervenen en els diferents tipus de focs forestals des del seu inici fins a la seva extinció, és una tècnica que ajuda a comprendre la dinàmica del fenomen. Models atmosfèrics, de propagació per superfície i capçades, de creació de focs secundaris, de risc d'ignició i d'eficàcia d'agents extintors, entre d'altres, són els mitjans que s'empren per aquest efecte.
- *Recerca i desenvolupament d'equips i tècniques d'extinció.* És un camp molt extens on s'hi engloben diverses àrees com l'estudi de materials ignífugs, la recerca en substàncies extintores i les seves tècniques d'aplicació o el desenvolupament i la millora d'eines i vehicles d'extinció, entre d'altres.
- *Desenvolupament i implantació de procediments operatius que proporcionin una ajuda concreta i directa a l'hora de dissenyar estratègies de gestió preventiva i d'extinció.* Això comprèn l'ús de paquets informàtics, programes de càlcul o nomogrames que integrin les dades necessàries i els

instruments d'anàlisi adequats pel disseny eficient de plans de prevenció, vigilància i emergència i per la posada en pràctica d'operacions d'atac. A tall d'exemple, alguns resultats finals corresponents a aquesta línia, són els sistemes d'anàlisi de risc, els simuladors de propagació del foc i els programaris per a la direcció de les actuacions d'extinció.

Aquest és doncs l'abast global de l'activitat recercadora en matèria d'incendis forestals que es duu a terme en l'actualitat. L'activitat desenvolupada en aquest treball quedaria inclosa de manera genèrica en el tercer dels quatre grups mencionats, car el seu enfocament és clarament dirigit cap a l'estudi dels productes retardants. Nogensmenys, no es pot dir en cap cas que cap programa de recerca no inclogui diverses tasques que puguin ser classificades en altres grups, ja que el fenomen dels incendis forestals és tan complex que així ho requereix en la gran majoria dels casos. En aquesta tesi es pretén abordar la temàtica dels productes retardants a llarg termini des d'un prisma tant experimental com teòric, per tant és òbviament necessari tenir sempre present la dinàmica del foc en tant que fenomen físico-químic si es vol fer una aportació seriosa en aquest sentit.

La dinàmica dels incendis, entesa com la interacció dels fenòmens físics, químics i termodinàmics que hi ocorren, ha estat estudiada en clau de modelització matemàtica, ja que és precisament la matemàtica el llenguatge bàsic de la física i de les seves aplicacions en totes les disciplines de l'enginyeria. Més concretament, la modelització matemàtica contribueix a entendre millor la realitat física, ajuda a descobrir estructures organitzades i nous comportaments en els sistemes i permet el desenvolupament d'eines de càlcul com a suport per a la presa de decisions en matèria de prevenció i extinció. És per tot això que un primer estadi de recerca bibliogràfica es dirigí cap a aquest sentit. S'estudiaren els principals models matemàtics –teòrics, semi-empírics i empírics– que aportaren nous coneixements sobre el fenomen dels incendis o bé que significaren un revulsiu important per la seva operativitat i difusió. En el proper apartat es resumeix l'evolució d'aquesta línia de recerca, pel que fa a les tendències històriques i actuals.

La segona part de la recerca bibliogràfica tingué ja un enfocament clar dirigit cap als productes retardants i més concretament cap a als esforços dedicats en matèria de l'avaluació de llur eficàcia. S'exposa amb detall en l'apartat 2.3.

2.2. Estudi bibliogràfic sobre la modelització matemàtica per a l'estudi dels incendis forestals

La modelització d'incendis forestals, i especialment la dedicada als incendis de superfície, ha estat la principal activitat de recerca per a la millora i l'ampliació dels coneixements referents a la dinàmica del foc, sobretot en la seva línia més teòrica. A partir del desenvolupament matemàtic de les equacions que regeixen els fenòmens de transferència de calor que s'esdevenen en un incendi, s'han extret valuoses relacions entre els paràmetres mediambientals implicats (característiques del combustible, del terreny i de la meteorologia) i les principals variables que controlen el comportament del foc (velocitat de propagació, velocitat de combustió, temperatures, etc.). Nogensmenys, diverses aportacions empíriques i semiempíriques han donat com a resultat eines pràctiques d'anàlisi del comportament dels incendis que, amb un ús precís i adequat, han facilitat les tasques d'extinció en les agències forestals d'arreu. Tot seguit es duu a terme una revisió històrica dels principals treballs en aquest sentit (Pastor, *et al.* 2003) que es classifiquen cronològicament en la taula 2.1.

Taula 2.1. Models de propagació d'incendis de superfície (període 1964-1985).

Referència	Tipus	Origen	Referència	Tipus	Origen
Fons (1946)	Teòric	Estats Units	Pagni i Peterson (1973)	Teòric	Estats Units
Emmons (1964)	Teòric	Estats Units	Telisin (1974)	Teòric	Rússia
Hottel <i>et al.</i> (1965)	Teòric	Estats Units	Steward (1974)	Teòric	Estats Units
McArthur (1966)	Empíric ¹	Austràlia	Konev i Sukhinin (1977)	Teòric	Rússia
Van Wagner (1967)	Teòric	Canadà	Cekirge (1978)	Teòric	Estats Units
Thomas (1967)	Teòric	Regne Unit	Fujii <i>et al.</i> (1980)	Teòric	Japó
McArthur (1967)	Empíric ¹	Austràlia	Grishin <i>et al.</i> (1983)	Teòric	Rússia
Anderson (1969)	Teòric	Estats Units	Griffin i Allan (1984)	Semiempíric	Austràlia
Frandsen (1971)	Semiempíric	Estats Units	Huang i Xie (1984)	Teòric	Estats Units
Rothermel (1972)	Semiempíric ¹	Estats Units	Sneeuwjagt i Peet (1985)	Semiempíric	Austràlia

Taula 2.1 (continuació). Models de propagació d'incendis de superfície (període 1985-2000).

Referència	Tipus	Origen	Referència	Tipus	Origen
Albini (1985, 1986)	Teòric	Estats Units	Catchpole <i>et al.</i> (1998a)	Semiempíric	Austràlia
De Mestre <i>et al.</i> (1989)	Teòric	Austràlia	Catchpole <i>et al.</i> (1998b)	Semiempíric	Austràlia
Weber (1989)	Teòric	Austràlia	Fernandes (1998)	Semiempíric	Portugal
Burrows <i>et al.</i> (1991)	Semiempíric	Austràlia	Vega (1998)	Semiempíric	Espanya
For. Cn. Fire. Dn.Grp. (1992)	Empíric ¹	Canadà	McCaw (1998)	Semiempíric	Austràlia
Croba <i>et al.</i> (1994)	Teòric	Grècia	Viegas <i>et al.</i> (1998b)	Empíric	Portugal
Marsden-Smedley i Catchpole (1995)	Semiempíric	Austràlia	Cheney <i>et al.</i> (1998)	Empíric	Austràlia
Grishin (1997)	Teòric	Rússia	Larini <i>et al.</i> (1998)	Teòric	França
Dupuy (1997)	Teòric	França	Margerit i Sero-Guillaume (1999)	Teòric	França
Santoni i Balbi (1998)	Teòric	França	Burrows (1999a i b)	Semiempíric	Austràlia
Linn (1997)	Teòric	Estats Units	Hargrove <i>et al.</i> (2000)	Empíric ¹	Estats Units

¹ Models que constitueixen la base d'eines operatives emprades actualment en agències forestals.

2.2.1. Els inicis, modelització teòrica embrionària

La investigació científica del fenomen dels incendis forestals tingué el seu origen com a tal als Estats Units, a mitjans dels anys quaranta. Així, el primer model en aquest sentit fou el desenvolupat per Fons (1946). Es tractà d'una aportació teòrica certament senzilla on, aplicant l'equació de la conservació de l'energia en un volum uniformement discret en partícules sòlides i immers en un front ideal d'incendi, se n'obtenia la velocitat de propagació expressada en funció del creixement, suposadament logarítmic, de la temperatura al llit de combustible. Va ser validat mitjançant experimentació en laboratori en una distribució contínua d'agulles de pi, donant resultats relativament bons, tot i els errors implícits en la formulació del model (Fons obvià la quarta potència en l'expressió de la transmissió de calor per radiació). Tot i les seves mancances, va ser el

precursor del desenvolupament d'una primera línia de recerca en modelització eminentment teòrica que es desenvolupà durant les dècades posteriors.

Del període comprès entre 1960 i 1990 sorgiren una sèrie de models basats en raonaments similars per a la descripció del sistema físic però divergents en l'aplicació dels principis teòrics en el plantejament dels balanços. En la seva majoria, aquests models es construïren sobre la hipòtesi de la propagació unidimensional i estacionària d'un front d'incendi –representat per una flama inclinada, isoterma, plana i rectangular i per una interfase de combustió–, avançant sobre un llit de combustible caracteritzat, de manera homogènia i sota condicions ambientals constants, per la humitat, la compacitat i per la relació superfície-volum de les seves partícules distribuïdes de manera contínua en tota la seva dimensió.

No obstant, certs models diferiren d'aquest plantejament inicial. En aquest sentit són rellevants les aproximacions de Huang i Xie (1984) i Albini (1985, 1986) en la discretització i la bidimensionalitat del combustible respectivament; el model de Thomas (1967) on es considera un gradient de temperatura en l'interior de les partícules i els suggeriments de propagació no estacionària de Cekirge (1978), Fujii *et al.* (1980), Grishin *et al.* (1983) i Weber (1989), on procuraren, sense èxit, trobar una solució dinàmica per l'avanç del front de l'incendi.

La formulació de les equacions fou el tret diferencial dels diversos models, divergint en la consideració i la preponderància d'uns o altres mecanismes de transferència de calor, així com en la determinació de les condicions de contorn i en la fixació dels volums de control. Pràcticament la totalitat dels autors prengueren la radiació com el procés dominant en l'aportació de calor al combustible no cremat. Aquest terme, però, rebé tractaments diversos en funció de la font d'emissió observada, superficial o volumètrica segons es considerés la flama o la zona de combustió, i en funció de les característiques radiants de les partícules. Un exemple il·lustrador en aquest sentit és el treball desenvolupat per Albini (1985). Per contra, els models tractaren generalment la contribució del terme convectiu de manera confusa, – exceptuant els treballs de Pagni i Peterson (1973) i d'Albini (1986) – degut a l'exclusió en els balanços de termes d'aportació de calor lligats a la presència de gasos calents en el sí del combustible, considerats únicament de manera qualitativa com a font d'oxigen per a la combustió.

El resultat de tots ells, malgrat les seves divergències, foren un conjunt d'equacions diferencials, amb les condicions de contorn com a límits per a la temperatura del combustible, el pendent topogràfic o el vent i amb la velocitat de propagació com a solució analítica o numèrica, segons la dificultat d'avaluació. No estigueren exempts, però, de components empírics, imprescindibles per a completar el model. Valors referits a la temperatura de la flama i a la seva alçada foren extrets inevitablement de l'experimentació. Tot i el rigor pretès en el desenvolupament de la majoria d'aquests exemples, cap d'ells fou conclusiu i en conseqüència implementat de manera operativa per a tècnics en prevenció i extinció. Per aquest motiu i degut a la dificultat, encara vigent actualment, d'interpretar correctament les aportacions parcials de cada mecanisme de transferència de calor en la propagació del foc, sorgiren paral·lelament línies de recerca en modelització semiempírica i empírica, on, sense intenció d'aportar nous coneixements en la termodinàmica dels incendis, es buscaren mètodes més senzills i aproximats però realment pràctics per a l'exercici quotidià de les tasques forestals.

2.2.2. Models empírics i semiempírics

Seguint el treball començat per Frandsen (1971) en la modelització semiempírica d'incendis de superfície aplicant balanços globals d'energia, Rothermel (1972) va crear el model matemàtic de major difusió i operativitat fins avui. Segons l'autor, la introducció d'aquest model "*permetria l'ús de tècniques sistemàtiques d'anàlisi per a la resolució de problemes en gestió del territori*", referents a prevenció, principalment. Degut a l'èxit que tingué en la majoria d'oficines nord-americanes de gestió forestal on fou implementat, els intents d'aplicació d'aquest sistema a Europa no es van fer esperar. L'estudi de Rothermel va ser desenvolupat seguint tendències semiempíriques, subordinat per tant a les condicions de l'experimentació a partir de la qual fou validat. L'extrapolació del model a la vegetació mediterrània no va donar resultats immediats, degut a la gran dificultat de calibratge que presentà. Tanmateix, ha estat integrat en eines complexes per a l'anàlisi d'incendis aplicables actualment a l'Europa mediterrània.

Pel que fa a la modelització empírica que s'anà desenvolupant en la mateixa direcció, va tenir el seu precedent en McArthur (1966) a Austràlia. Aquest autor confeccionà uns àbacs de càlcul per a determinar els principals paràmetres d'incendis de superfície, desenvolupats a partir de relacions estadístiques extretes de cremes experimentals. Posteriorment, Noble *et al.* (1980) els perfeccionaren per ajustar-ne les prediccions, assolint graus de fiabilitat molt alts. Amb tot, l'extrapolació d'aquest model a altres tipus de territoris amb vegetació diferent a l'australiana continuà tractant-se amb molta prudència.

A Canadà se seguí així mateix la línia de modelització matemàtica empírica. Després de l'observació de més de quatre-cents focs experimentals i amb extensa documentació d'incendis reals, el *Forestry Canada Fire Danger Group* (1992) dissenyà la versió final d'un model de predicció de comportament d'incendis, desenvolupat durant els anys vuitanta. L'aplicació d'aquest model a les agències forestals canadenques donà resultats satisfactoris, convertint-se en una eina indispensable en la gestió del bosc.

2.2.3. Tendències actuals en modelització teòrica

Les tendències semiempíriques i empíriques en modelització d'incendis de superfície han donat resultats contrastats en les dues darreres dècades, però l'afany per desenvolupar eines operatives derivades de la modelització teòrica no ha minvat entre els grups de recerca forestals. Per bé que el procés fisicoquímic bàsic que governa la propagació d'un front de foc de superfície hagi estat bastant estudiat, manquen encara estudis per a resoldre moltes qüestions químiques i termodinàmiques que influeixen en el comportament de l'incendi. Des de l'Europa mediterrània, els Estats Units, Canadà i Austràlia, s'han començat programes de recerca ambiciosos i innovadors amb l'objectiu de desenvolupar models completament teòrics que puguin predir el comportament de tots els tipus d'incendis, entre ells, evidentment, els incendis de superfície. Grishin (1997), Dupuy (1997), Larini *et al.* (1998) i Marguerit i Sero-Guillaume (1999) són, entre d'altres, autors de treballs que segueixen aquesta nova línia de modelització teòrica, caracteritzada per una descripció complexa del sistema físic i un plantejament molt més ampli i detallat de les equacions de transferència.

Aquesta línia de recerca està sotmesa a una sèrie de limitacions, fruit de trobar-se encara en les primeres fases del seu desenvolupament. Les dificultats rauen en la utilització indispensable de mètodes llargs de càlcul i costosos per a la resolució numèrica de sistemes d'equacions de gran complexitat, i la inclusió en la modelització d'aspectes termodinàmics i químics poc o mal coneguts. Dupuy (1997) fa referència en aquest sentit al tractament de dos qüestions claus, la turbulència i les consideracions de la cinètica de les reaccions químiques, una problemàtica que caldrà resoldre paral·lelament a la modelització d'incendis al llarg dels propers anys.

2.3. Estudi bibliogràfic sobre la recerca en productes retardants

Durant les darreres set dècades, s'han pogut comptar nombroses línies d'investigació i disciplines implicades en l'estudi de retardants, abordades des de diferents centres de recerca. Les primeres passes es donaren òbviament en la formulació de productes i l'avaluació de llurs propietats fisicoquímiques. En els seus inicis, la investigació va ser focalitzada en la recerca de les substàncies idònies que addicionades a l'aigua reduïssin la inflamabilitat i la combustibilitat de la matèria forestal provocant a més una major eficiència extintora i conseqüentment un menor requeriment d'aigua per a l'atac d'incendis. Barrett (1931), Traux (1939) i Tyner (1941) són els treballs més representatius d'aquesta primera època. A partir de proves en laboratori, testaren diferents compostos i classificaren els paràmetres més influents en la seva experimentació. De totes les substàncies assajades, els fosfats, polifosfats i sulfats d'amoni foren els que els donaren millors resultats.

A partir d'aquests estudis, sorgí durant la dècada dels cinquanta la possibilitat d'emprar productes retardants en emergències d'incendis forestals. La utilització de les primeres sals comercials tingué lloc dins el marc de l'anomenada Operació Fire Stop (USDA, 1955a i b), realitzada pel Servei Forestal del Departament d'Agricultura dels Estats Units. Fou una operació prou exitosa, tanmateix, d'aquesta en derivaren nous interrogants d'aspectes més operacionals. Així, es detectà, d'una banda, la necessitat d'estudiar la incorporació d'additius per tal de pal·liar l'efecte corrosiu de les sals sobre els equips de mescla i bombeig (Davis, 1959; Johansenn i Shimmel, 1963; Davis i Phillips, 1965 i Bradford, 1973). A més, calgué estudiar en profunditat el procés d'alliberació del retardant sobre el combustible per tal d'optimitzar-ne la impregnació. S'estudià la metodologia de descàrrega aèria (McPherson, 1968; Swanson i Helvig, 1973 i 1974 i Us Air Force, 1973) i les característiques del núvol retardant en l'aire, pel que fa a reologia, dispersió i mida de gotes (Storey *et al.*, 1959; Davis, 1960; Grigel, 1970, 1971, 1972; Newstead, 1973 i Andersen *et al.* 1976). Amb tot això, els dubtes pel que fa a l'impacte ambiental d'aquests productes foren raonables, ja des de llavors. Phillips i Miller (1959), Johnason i Sanders (1977) i Larson i Duncan (1982) foren, entre d'altres, els precursors d'aquesta línia de recerca, encara a dia d'avui molt important i polèmica alhora. En darrer lloc i en paral·lel amb totes aquestes línies, també fou necessari incidir en el càlcul de l'efectivitat real dels retardants com a agents extintors del foc i, per bé que era imprescindible avaluar la capacitat inhibidora d'aquestes sals per tal de justificar tots els altres esforços de recerca, paradoxalment fou la línia menys estudiada. En l'extens recull bibliogràfic exposat a Giménez *et al.* (2004) hi queda palès clarament. Així, els treballs

orientats en aquest sentit foren desenvolupats amb més intensitat durant les dècades dels setanta i vuitanta però no foren suficients per a desvetllar tots els interrogants que aquesta línia específica planteja. Recentment ha estat abordada de nou aquesta problemàtica des d'una nova perspectiva i òbviament amb millors mitjans, fruit del desenvolupament científic i tecnològic. Els recursos destinats a projectes de recerca a nivell europeu així ho demostren. En qualsevol cas, no es pot afirmar que a dia d'avui se n'hagin trobat les solucions, però si més no s'han plantejat de nou les inquietuds i els dubtes que suscita aquest aspecte. Tot seguit i per tal de corroborar aquesta afirmació, s'analitzen amb detall els treballs més importants realitzats fins a dia d'avui per a estudiar l'eficàcia dels retardants.

2.3.1. Avaluació de l'eficàcia dels productes retardants

Les aportacions primigènies en l'estudi de l'eficàcia dels retardants foren certament interessants, degut a la gran desconexença del potencial d'aquests productes. Els estudis més incipients corresponen a Phillips i Miller (1959), Muraro (1960), Dibble *et al.* (1961) i Hardy *et al.* (1962). Aquests autors focalitzaren llur recerca en l'estudi del flux d'energia radiant, la temperatura de la columna de convecció i l'altura de les flames de llits de combustible sota l'efecte de diferents dosis de productes, en experiències de laboratori. En les dues dècades següents, els esforços en aquest sentit s'incrementaren i es recullen essencialment en George i Blakely (1970 i 1972) i en Blakely (1983, 1985, 1988 i 1990) on s'hi exposen amb tot detall les particularitats d'aquests treballs essencialment experimentals. Durant tots aquests anys, a banda de dur a terme comparatives ja més concloents entre les diferents sals amòniques amb propietats retardants, s'anaren dissenyant i millorant metodologies d'assaig i tècniques d'avaluació per tal de quantificar l'eficàcia de diferents productes. L'evolució observada en aquest sentit fou clarament positiva. Així, les proves inicials realitzades per George i Blakely (1970) consistiren en tres senzills assajos de laboratori on es provà l'acció del fosfat de diamoni i del sulfat d'amoni –concentrats al 10% en volum i aplicats manualment– sobre agulles de *Pinus ponderosa* en un túnel de vent sota condicions ambientals controlades. Hi observaren qualitativament una reducció de la velocitat de combustió i de propagació, però no arribaren més enllà, degut sense dubte al reduït nombre d'assajos. En posteriors estudis incrementaren el rang de treball pel que fa a concentracions aplicades (del 2,5% al 20%) i combustibles (empraren també encenalls de pollancre) i milloraren el sistema d'aplicació de les dissolucions, implementant un sistema de ruixadors automàtics. Quantificaren com a variables d'estudi la velocitat de combustió i de propagació del llit i observaren la seva reducció en funció de les diferents concentracions de retardants, mantenint constant la càrrega de combustible. D'aquestes proves en sorgí un primer índex d'avaluació de l'eficàcia (USDA, 1986), tanmateix

desenvolupat amb pretensions més comercials que científiques. S'emprà com a criteri d'homologació de formulacions i es calculà a partir de l'avaluació de la velocitat de propagació i combustió d'un front d'incendi experimental sobre un llit de combustible determinat, tractat amb el producte en qüestió. El procediment emprat, encara avui d'ús habitual, consisteix en dur a terme dues sèries experimentals de sis assajos. En la primera sèrie, es prova la formulació a avaluar sobre un llit d'agulles de *Pinus ponderosa* (2,4 kg/m² de combustible en base seca) i sobre encenalls de pollancre (1,6 kg/m² de càrrega seca) amb una cobertura de 0,4 l/m² i a la concentració que especifica el fabricant. Seguidament, es repeteixen els assajos amb un producte estàndard (polifosfat de diamoni al 10,6% en volum) i en darrer lloc es duen a terme sengles assajos amb agulles de pi i encenalls, sense l'efecte de cap tractament retardant. En la segona sèrie es repeteix el procés diferenciant-ne la dosificació (0,8 l/m²). Dels vuit assajos amb tractament, se'n calcula l'anomenat factor de superioritat, seguint la següent expressió:

$$SF = 0,5 \left(\frac{R_0 - R}{R} + \frac{V_0 - V}{V_0} \right) \quad (2.1)$$

On:

- SF Factor de superioritat
- R_0 Velocitat de propagació del llit combustible sense tractar, m/min.
- R Velocitat de propagació del llit de combustible amb tractament retardant, m/min.
- V_0 Velocitat de combustió del llit combustible sense tractar, g/min.
- V Velocitat de combustió del llit combustible amb tractament retardant, g/min.

Aleshores, si en tots els casos el factor de superioritat del producte a homologar és com a mínim equivalent al factor de superioritat de l'estàndard, l'avaluació és favorable. Amb aquest criteri es pretén classificar els retardants en funció del seu efecte sobre la inflamabilitat del combustible. Així, un valor de SF equivalent a 0,8 significa que, en conjunt, l'ús del retardant en qüestió redueix la inflamabilitat del combustible en un 80% (Arnaldos *et al.*, 2004).

Els requeriments experimentals per a l'obtenció d'aquest paràmetre posen de manifest la seva simplicitat així com la necessitat d'un estudi més aprofundit de l'acció dels retardants sobre altres variables que descriuen el comportament del foc. D'altra banda, d'aquest càlcul tampoc se n'obté una anàlisi crítica de la resposta dels productes sota diferents condicions d'incendi, és a dir amb diverses tipologies de combustible i

variacions de condicions ambientals o topogràfiques. Nogensmenys, els criteris d'homologació emprats en d'altres indrets actualment no són pas més elaborats i difereixen en metodologies i criteris de càlcul en funció del laboratori d'assaig (Mans i González, 2002). Aquest fet explica en gran mesura part de les carències existents en la recerca per a l'estudi acurat del paràmetre de l'efectivitat dels retardants. Una de les conseqüències més evidents d'aquesta mancança és que a dia d'avui les recomanacions específiques de l'ús d'aquests productes en emergències d'incendi pel que fa a concentracions, dissolucions i tipologies de foc, són purament orientatives (Vélez, 2000).

De l'impuls generalitzat que ha sofert la recerca mundial en la temàtica d'incendis forestals durant els darrers anys, especialment en els països de la Conca Mediterrània, se n'ha vist també clarament beneficiada l'àrea referida a l'estudi de retardants. Des de diversos centres de recerca europeus, ja sigui dins un marc conjunt o autònom, s'han desenvolupat nous programes d'investigació per dinamitzar aquesta línia. En aquest sentit són d'especial esment, tant els estudis puntuals i concrets sobre la inflamabilitat i la combustibilitat de diversos tipus de combustible tractats amb diferents formulacions duts a terme recentment per Viegas (1999), com les contribucions de més envergadura dels projectes europeus ACRE (*Additifs chimiques rheologie evaluation*, ENV-4980729) i ERAS (*Extention Retardant Application System*, EVG1-CT-2001-00039) on un consorci de grups d'investigació ha estudiat conjuntament diversos aspectes de la utilització de retardants a llarg termini per a l'extinció d'incendis forestals. A tal efecte, s'han dut a terme proves a escala de laboratori i a camp en diversos centres i àrees experimentals. Per bé que aquests projectes han tingut resultats molt satisfactoris en l'estudi de la reologia i les metodologies d'aplicació de productes (Giroud, 2000), han servit també per detectar un cop més les deficiències en l'avaluació del paràmetre de l'efectivitat (Oegema, 2004) sense poder-hi aportar encara noves vies de resolució.

2.4. Conclusions

De la revisió bibliogràfica realitzada pel que fa a la modelització matemàtica dels incendis se'n poden extreure les següents conclusions. L'anàlisi bibliogràfica de modelització d'incendis forestals ha permès, primerament, prendre bona consciència de la gran importància d'aquesta tasca per a una millor comprensió del comportament dels incendis forestals. En aquest sentit, és d'especial rellevància la modelització teòrica bàsica, com a eina indispensable per a la interpretació dels fenòmens físics i termodinàmics principals que ocorren en els incendis.

Per altra banda, també ha estat avaluada la capacitat predictiva dels diferents tipus de models desenvolupats; des dels models empírics i semiempírics, de formulació senzilla i resultats acceptables per a situacions particulars, fins als models teòrics, de gran complexitat i grau d'extrapolació també elevat.

La segona vessant de la bibliografia analitzada, referida amb més detall a la recerca en el camp dels productes retardants, aporta per la seva banda unes altres reflexions. D'aquest segon estudi bibliogràfic se'n desprèn amb tota claredat que la utilització dels retardants com a agents extintors ha suscitat tota mena d'interrogants dins la comunitat científica. Han estat abordades diferents línies de recerca amb resultats certament relatius. L'estudi de l'eficàcia dels productes és potser la menys reeixida. En aquest sentit, han estat detectades diverses mancances, exposades breument tot seguit.

No ha estat estudiat amb prou rigor l'efecte dels productes retardants sobre el comportament del foc. Manquen esforços dedicats a la modelització matemàtica dels fenòmens que hi ocorren (semi-empírica, i teòrica per descomptat) que permetin descriure amb més exactitud l'efecte dels productes sobre les diverses variables que controlen l'incendi, així com preveure'n l'eficàcia. Les proves realitzades amb retardants efectuades arreu durant les darreres dècades, malauradament no estan enfocades en aquest sentit. S'han anat duent a terme tests de laboratori per a validar formulacions comercials, mitjançant procediments molt simplificats i criteris diversos que en cap cas són resultat d'una anàlisi aprofundida de les diferents variables que veuen el seu comportament alterat per l'efecte dels retardants.

Així doncs, és necessària una metodologia nova i estandaritzada per estudiar l'eficàcia dels retardants. Aquesta ha de permetre, a banda d'homologar productes, interpretar amb detall l'efecte particular de les formulacions en els diversos aspectes del foc (velocitat de combustió, propagació, potència calorífica, temperatures, etc.) així com donar una idea global i conjunta de tots ells per mitjà de paràmetres que així ho contemplin. A banda, ha de considerar d'alguna manera l'enorme diversitat de tipologies d'incendi que poden ocórrer, extrapolant-les en diferents condicions experimentals. En aquest sentit, són requerides proves amb combustibles, condicions ambientals i topogràfiques i escales experimentals diverses per tal d'avaluar-ne les possibles diferències i interrelacions d'aquests paràmetres amb l'efectivitat.

Aquest fet s'evidencia en diversos aspectes. En primer lloc, no existeix un criteri conclouent que determini les especificacions de l'extinció amb retardant ateses les tipologies de l'incendi. Aquesta es una greu mancança,

donats els condicionants econòmics i mediambientals implicats. Per altra banda, ha quedat reflectit en el nou impuls de recerca que ha experimentat aquest camp, conduït de manera global als països de la Conca Mediterrània per la Unió Europea. Cal dir que aquesta aportació és esperançadora, ja que inclou dins els seus objectius fer front a aquesta gran carència. Així, els programes experimentals inclosos en aquest marc són més novedosos (tant pel que fa a tècniques d'anàlisi com a escales de treball i condicions experimentals), per bé que llurs resultats són encara desconeguts.

2.5. Objectius específics de la tesi i metodologia

En base a les conclusions dels estudis bibliogràfics exposats, els objectius específics d'aquesta tesi quedaren fixats en els següents punts:

- Estudiar el comportament d'un front de flames bàsic –és a dir sense vent ni pendent– a partir de l'anàlisi de les variables cabdals en aquest sentit (la velocitat de combustió, la velocitat de propagació, les temperatures i la potència calorífica emesa) sobre diferents tipologies de combustible fi.
- Dissenyar, en base a una comparació crítica de procediments clàssics, una nova metodologia experimental per a l'estudi de l'efecte dels retardants sobre un front d'incendi que permeti dur a terme les següents tasques:
 - Avaluat l'efecte de diversos productes retardants comercials sobre els principals paràmetres que descriuen el comportament del foc.
 - Analitzar les diferències d'aquests efectes per diverses tipologies de combustible fi i per diverses formulacions de productes.
 - Modelitzar l'efecte del producte retardant sobre el comportament del foc, ateses les variables estudiades.
- Contribuir a l'estudi de l'efecte dels retardants en focs experimentals a camp, preservant al màxim l'analogia amb el treball de laboratori, pel que fa a mètodes i objectius.

Per a la consecució d'aquests fites calgué, en primer terme, dissenyar i posar en funcionament una instal·lació de laboratori al CERTEC (Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Universitat Politècnica de Catalunya) amb la finalitat d'executar-hi part del programa experimental requerit per assolir els objectius plantejats. Seguidament, fou necessari aprendre amb detall i implementar les metodologies clàssiques d'estudi amb retardant al laboratori. Aquesta tasca fou duta terme al centre de recerca CEIF-ADAI (*Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, Associação para o Desenvolvimento de Aerodinamica Industrial*) de la Facultat de Ciències i Tecnologia de la Universitat de Coimbra (Portugal). Durant l'estada en aquest centre de recerca, també es pogué dur a terme el treball experimental a camp per tal d'estudiar l'efecte dels retardants a aquesta escala.

En els capítols següents s'aborden amb detall cadascun dels passos que es dugueren a terme per a arribar a les fites plantejades.

3. EXPERIMENTACIÓ A ESCALA DE LABORATORI, INSTAL·LACIÓ I METODOLOGIES

L'experimentació a petita escala es dugué a terme a les instal·lacions de la E.T.S. d'Enginyeria Industrial de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya (ETSEIB) i a la Facultat de Ciència i Tecnologia de la Universitat de Coimbra, a Portugal. En els dos períodes s'assajaren diverses tipologies de combustible i de productes retardants, per tal d'avaluar-ne l'eficàcia en el seu sentit més ampli. A banda, les instal·lacions on es realitzaren les proves així com les metodologies d'assaigs emprades diferiren en ambdues fases. Això permeté estudiar-ne les principals avantatges i inconvenients i les possibles relacions de dependència del mètode amb els resultats, un treball imprescindible per tal de proposar possibles estàndards en aquests tipus de proves.

En aquest capítol es presenta amb detall i a tots els nivells la instal·lació que calgué construir a l'ETSEIB, passant pels estadis de concepció i disseny dels seus elements, pel seu muntatge i per la seva posada en funcionament. A continuació, es fa referència als equipaments de Coimbra, amb especial esment a les seves similituds i diferències amb els utilitzats a Barcelona.

Seguidament, es descriuen els combustibles i els productes retardants testats en l'experimentació, incidint en els seus trets més rellevants. S'esmenten en ambdós casos les proves prèvies de caracterització que es dugueren a terme per tal de determinar certes propietats poc o mal conegudes i necessàries per l'anàlisi de resultats.

Conclou aquest capítol l'exposició de les diferents metodologies experimentals establertes per a l'execució de cadascuna de les proves i, en darrer lloc, la descripció dels criteris de disseny i de tot el banc experimental.

3.1. La instal·lació experimental de la Universitat Politècnica de Catalunya

3.1.1. Descripció general

Fou concebuda per a estudiar, a una escala reduïda, el comportament dels incendis forestals sota l'efecte de tallafocs químics. Es dissenyà amb la finalitat primordial de prendre les dades necessàries de les variables més importants en aquest estudi, però també amb l'objectiu que fos suficientment versàtil per a esdevenir una eina experimental d'utilitat en qualsevol temàtica relacionada amb els incendis forestals. S'ubicà a la planta pilot del Departament d'Enginyeria Química a l'ETSEIB i consta, en termes generals, dels següents mòduls:

- *Taula de combustió.* És el mòdul essencial del sistema experimental. Es compon d'una taula d'assaigs equipada amb tota la instrumentació necessària per a l'adquisició de les dades, com ara una càmera de vídeo, una càmera de termografia infraroja, una balança i un xarxa de termoparells. Fou sobre d'aquesta taula on es dugueren a terme els incendis, per això també va estar dotada d'una campana extractora de fums de tiratge natural.
- *Zona de control.* Emplaçada just al davant de la taula de combustió, és la zona des d'on s'enregistraren totes les dades dels experiments. Per mitjà d'un ordinador portàtil connectat a tots els equips posicionats a la taula i amb els programaris específics per a aquesta aplicació, es controlà i s'emmagatzemà tota la informació generada en les proves.
- *Estació de mescla i dosificació de producte.* Consisteix en un petit laboratori amb l'instrumental necessari per a dur a terme anàlisis bàsiques dels retardants i per a preparar-ne les diferents dissolucions que requerien els experiments. Una part d'aquesta zona es reservà per a l'emmagatzematge dels productes en condicions controlades.

- *Àrea d'aprovisionament de combustible.* Destinada a l'emmagatzematge de les diferents espècies forestals emprades en les proves. Es dotà de sensors d'humitat relativa i temperatura i de dos instruments de pesatge (balança analítica i balança analitzadora d'humitat).

En la figura 3.1 es representa la disposició en planta de la instal·lació.

3.1.2. Descripció de la taula d'assaigs

La concepció i la posterior construcció de la taula d'assaigs va ser una de les activitats més importants i alhora més complexes de tot el treball que s'exposa en aquesta tesi. Els requeriments que imposa una experimentació com la que es va realitzar, inherents a qualsevol assaig que es dugui a terme amb foc, juntament amb les especificacions particulars de la instrumentació que calia integrar a la taula, implicaren un esforç considerable de disseny i dimensionament. A banda, es va tenir particularment present el cost que suposaria la seva construcció amb tots els elements, la qual cosa derivà en la recerca de les solucions més econòmiques.

Disseny conceptual

Qualsevol test que es vulgui dur a terme en el camp dels incendis forestals –ja sigui a petita o gran escala– té un impediment gairebé insalvable que condiona, ja d'entrada, tota la fase experimental; des del seu disseny fins a la seva execució. La heterogeneïtat del combustible dificulta en certa manera el transcurs de les proves, en aquells casos en què és desitjable assolir un estat estacionari. En la majoria dels experiments –i en aquests s'hi inclouen els plantejats en aquest capítol–, és inevitablement necessari treballar en condicions d'estabilitat, per tal de facilitar l'anàlisi de les diferents variables a controlar. És per això que aquest condicionant es va tenir molt present ja en la fase inicial de disseny, la qual cosa es traduí en un especial interès per evitar, en la manera que fos possible, que qualsevol altre particularitat interferís en aquest sentit.

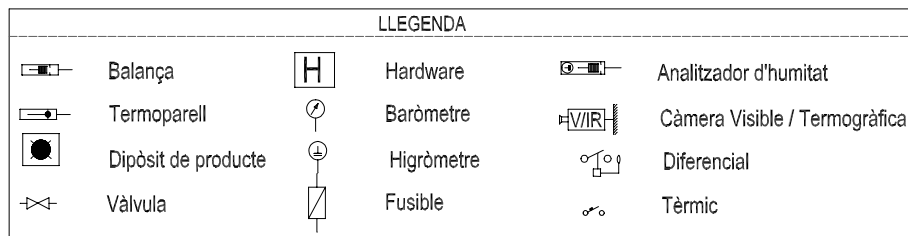
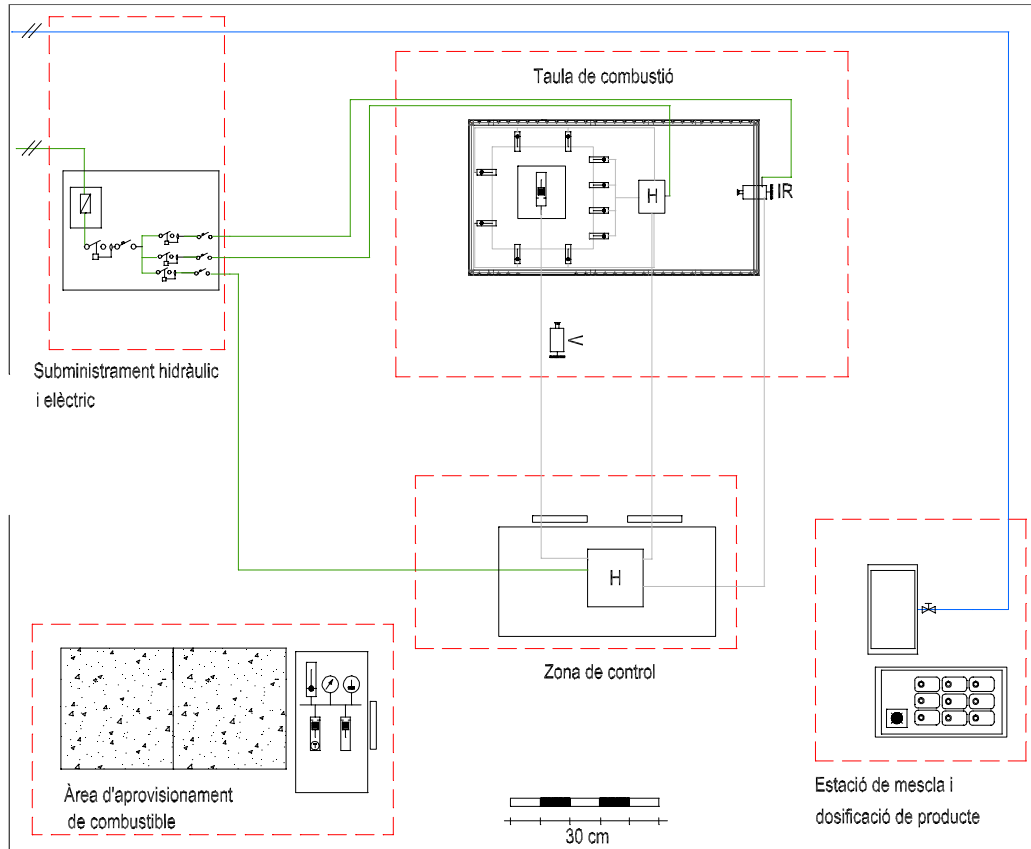


Figura 3.1. Plànol de la instal·lació experimental.

Tal i com s'ha vist en el capítol anterior, a partir de l'estudi bibliogràfic es prengué la determinació de treballar amb fronts de foc lineals propagant-se naturalment, és a dir, sense simular cap efecte de pendent ni de vent. En aquestes situacions, el mecanisme de transferència de calor dominant que en facilita la propagació és la radiació (Pagni i Peterson, 1973 i Albini 1985, 1986). Així, un element infinitesimal de combustible situat per davant del front d'incendi, rep calor per la radiació que emeten les flames i la zona de combustió pròpiament dita, és a dir, el gruix de llit de combustible incandescent on ocorre la reacció. Cal dir però, que la gran part d'aquesta radiació prové únicament d'una part relativament petita de l'amplària total del front, així es considera que, a partir d'una cert valor d'aquesta amplària, la línia d'incendi és quasi-infinita i en conseqüència la seva propagació és teòricament lineal. S'han fet diversos estudis per a determinar quin és el valor d'aquesta amplària (Fons, *et al.*, 1962; Anderson, 1964; Cheney i Gould, 1995) i d'entre tots ells, el que es desenvolupa sobre una base científica més sòlida, i per tant, el que permet major grau d'extrapolació, és el dut a terme per Wotton *et al.* (1999). D'aquest treball se'n pot concloure que aquells fronts de flama l'amplària dels quals sigui com a mínim quatre vegades major que llur altura, es propagaran linealment. Aquesta regla fou extreta per altures de flama de l'ordre de desenes de centímetres, i per tant és aplicable en assaigs a petita escala.

Aquesta fou la primera relació de disseny per a dimensionar l'ample de la taula i, per tant, calgué fer un estudi previ més aprofundit sobre les altures de flama que podien obtenir-se experimentalment a escala de laboratori. Es calcularen altures teòriques mitjançant les expressions recopilades en la bibliografia (Arnaldos, *et al.*, 2004). Aquestes equacions (Byram, 1959; Thomas, 1963; Nelson, 1980 i Nelson i Adkins, 1986) relacionen l'altura de flama amb la càrrega i el poder calorífic inferior del combustible i amb la velocitat de propagació del front. Són expressions basades en el concepte d'intensitat lineal de Byram (1959), la qual dóna una idea molt sobreestimada de la potència calorífica total que es desprèn en un front de flames (Alexander, 1982). Amb tot són útils per a determinar ordres de magnitud d'altures de flames. S'adoptaren valors que permetessin un ample marge de treball. Així, es prengué per la càrrega el valor màxim utilitzat habitualment en aquest tipus d'experimentació (1 kg/m^2), el poder calorífic inferior de l'ordre de 18000 kJ/kg (Rothermel, 1972), i una velocitat de propagació considerablement elevada en tests al laboratori, corresponent a 1 cm/s . En cap dels casos analitzats s'arribà a altures de flama superiors als 90 cm. Amb aquests resultats i donades les especificacions inicials de les proves a realitzar, es considerà que l'atura de flama mitjana que s'assoliria en la majoria de les proves no superaria els 40 cm, la qual cosa implicava

aproximadament una superfície de crema de 1,5 m d'amplària. Amb 5 cm per banda per tal d'evitar l'efecte de vora, la dimensió transversal de la taula es fixà en 1,6 m.

Pel que fa a la dimensió longitudinal, l'única possible restricció a tenir en compte fou l'espai disponible per a situar la taula, que en cap cas esdevingué limitant. S'optà per duplicar el valor de l'amplària, a fi d'assegurar una longitud suficient per a dur a terme un ventall ampli de proves. D'aquesta manera es decidí construir una taula de 3 m de llargada, amb una superfície útil d'assaig de 4,5 m².

Disseny estructural

La superfície de la taula d'assaigs es construï amb platines de xapa metàl·lica de 5 mm. Se soldaren a una estructura feta de tub d'acer del mateix gruix, de secció quadrada (50 mm x 50 mm), disposada en escaire amb quatre elements de 1,6 m i 3 m respectivament. Per evitar el possible vinclament de la xapa, l'estructura es reforçà longitudinalment cada 55 cm en una de les seves meitats i es permeté una llum màxima de 100 cm en l'altre, que es deixà al descobert, sense xapa. Aquesta obertura, de secció quadrada de 1m² –falcada amb dos elements més, a 30 cm dels laterals cadascun d'ells– facilità la instal·lació del sistema de pesatge dissenyat per a l'estudi de la velocitat de combustió. Es tancà tot el perímetre amb perfils angulars normalitzats, de 50 mm d'ala i 5 mm de gruix, i s'aixecà a 80 cm del terra mitjançant sis elements de tub disposat en vertical, on s'hi soldaren unes rodes de plàstic de 8 cm de diàmetre per a permetre'n la mobilitat. Altres sis elements de les mateixes característiques es disposaren com a pilars, sobre la superfície d'assaig, conformant el segon nivell de la taula. Serviren per a subjectar-ne els tancaments, necessaris per a dur a terme les proves amb la menor interferència de corrents d'aire. Els sis perfils es tancaren també amb tub metàl·lic perimètric soldat a l'extrem superior, per tal de donar major rigidesa a l'estructura.

Elements complementaris

Tot aquest conjunt que conformà la taula (figura 3.2), es complementà amb d'altres elements d'acer, la funció dels quals no fou estrictament estructural, sinó de suport a la integració de certs elements per a la mesura de dues de les principals variables d'estudi, la velocitat de propagació i la velocitat de combustió.

Existeixen diferents metodologies per a determinar experimentalment la velocitat de propagació, algunes molt complexes i d'altres més senzilles. Pel que fa al primer grup, corresponen a tècniques basades en el tractament d'imatges –bé en el rang visible o en l'infraroig– enregistrades durant el pas del front. Per a

desenvolupar-les, cal l'ús d'instrumentació tecnològicament avançada així com de programari específic. Dins el segon grup de mètodes, s'hi inclouen aquells procediments experimentals, de ràpida execució i resultats immediats, a partir dels quals es pot obtenir la velocitat de propagació pràcticament a temps real amb l'experiment. Es basen senzillament en comptabilitzar el temps que triga el front d'incendi a recórrer certes distàncies conegudes. Per tal que aquest còmput es realitzi de la manera més objectiva possible, són integrats en el conjunt sistemes d'avís –de tipus acústic, mecànic, elèctric o simplement visual– que s'activen i donen senyal durant el pas del front, al llarg de tot el seu recorregut.

Durant el procés de disseny de la instal·lació, es decidí mesurar de diverses maneres la velocitat de propagació, per tal de comparar resultats entre els dos grups de mètodes descrits. Pel que fa als procediments senzills, s'integrà un sistema àmpliament utilitzat arreu, que consisteix en enregistrar aquesta variable observant el trencament d'una sèrie de fils de cotó tensats –disposats sobre del llit de combustible a distàncies iguals en direcció paral·lela a l'avanç del front– a mesura que el foc hi va passant. Per a la subjecció d'aquests fils, s'utilitzaren petites barres cilíndriques col·locades a tot el llarg de la taula. S'adoptaren com a dimensions de les barres 8 mm de gruix i 12 cm d'altura i es col·locaren cada 10 cm, soldades just a sobre dels perfils angulars perimètrics. Tal i com ja s'ha apuntat, també s'utilitzà un sistema més complex per a calcular la velocitat de propagació. Se'n farà menció en punts posteriors d'aquest mateix capítol, ja que no calgué cap element complementari per unir-lo físicament a la taula.

Pel que fa a la velocitat de combustió, el sistema dissenyat per a la seva mesura precisava, entre d'altres coses, d'una superfície rígida, per sota del nivell de la taula, sobre la qual recolzar-hi tots els elements que en formaven part. Aquesta superfície es construí quadrada, d'1 m² de secció i 5 mm de gruix, igualment d'acer. Se sostingué per sota de l'obertura practicada a la taula, per mitjà de quatre pernys d'ancoratge de 2 cm de diàmetre. Es reforçà per la cara de sota amb dos perfils massissos de 4,5 cm, de secció quadrada, disposats en diagonal.

En darrer lloc, per concloure el disseny estructural, cal esmentar la construcció d'una campana extractora de fums, que es disposà 40 cm per damunt de la taula d'assaigs. Es construí amb forma piramidal, de seccions inferior i superior de 2,4 m² i 8 m², amb peces de xapa metàl·lica soldades. S'uní a un dels conductes d'evacuació de fums, de 30 cm de diàmetre, ja existents a la planta pilot. No calgué introduir-hi cap mecanisme de tiratge forçat, donades les dimensions de la campana.



Figura 3.2. a) Vista general dels elements estructurals de la taula de combustió. b) Detall de les barres cilíndriques i la xapa. c) Detall de la superfície rígida i un peu d'ancoratge.

Les figures 3.3 i 3.4 són esquemes dels plànols que s'hagueren de dibuixar per a la seva construcció. La primera d'elles fa referència als dos alçats i a la planta general de la taula, mentre que la segona representa els elements estructurals dissenyats. A més, inclou una secció de detall on s'hi observen els principals components del cos de la taula i les seves unions. Les cotes en ambdues figures són en centímetres.

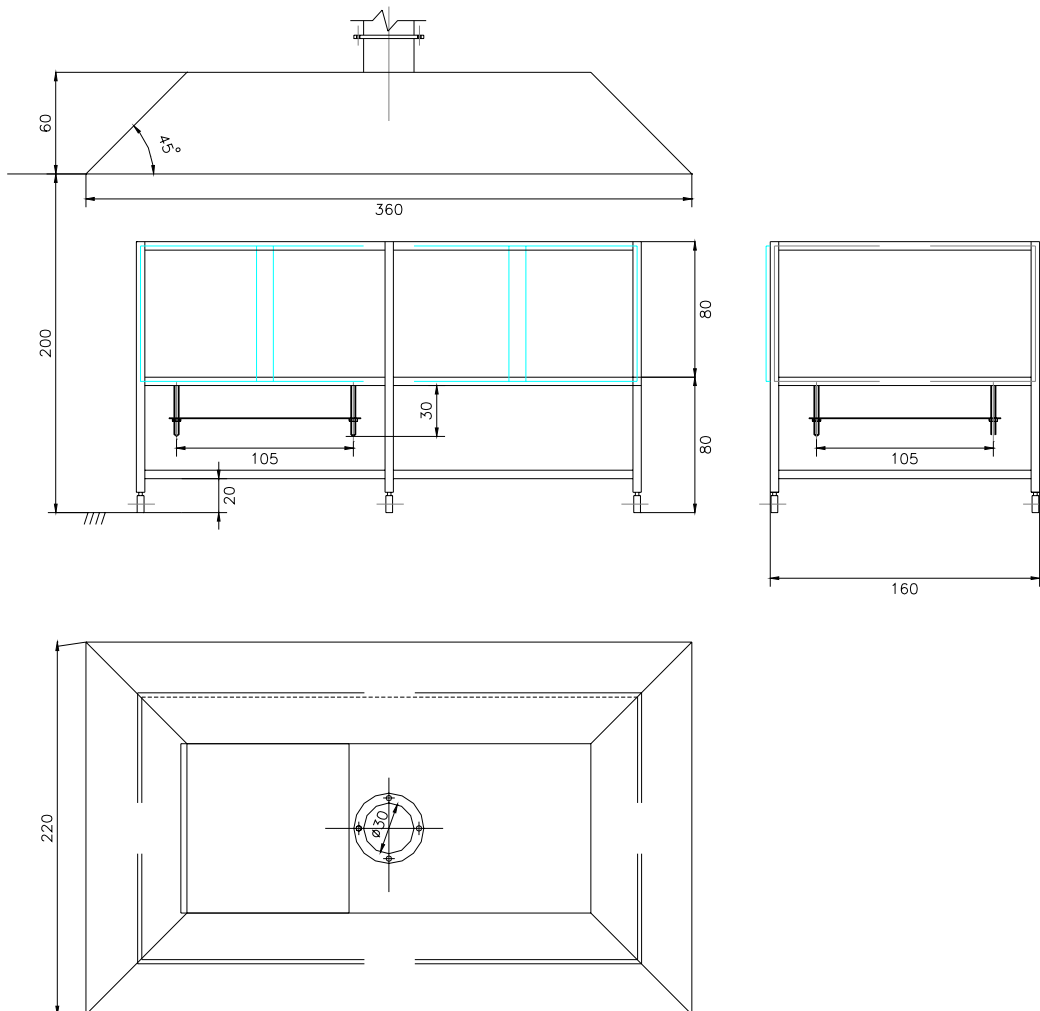


Figura 3.3. Alçats i planta general.

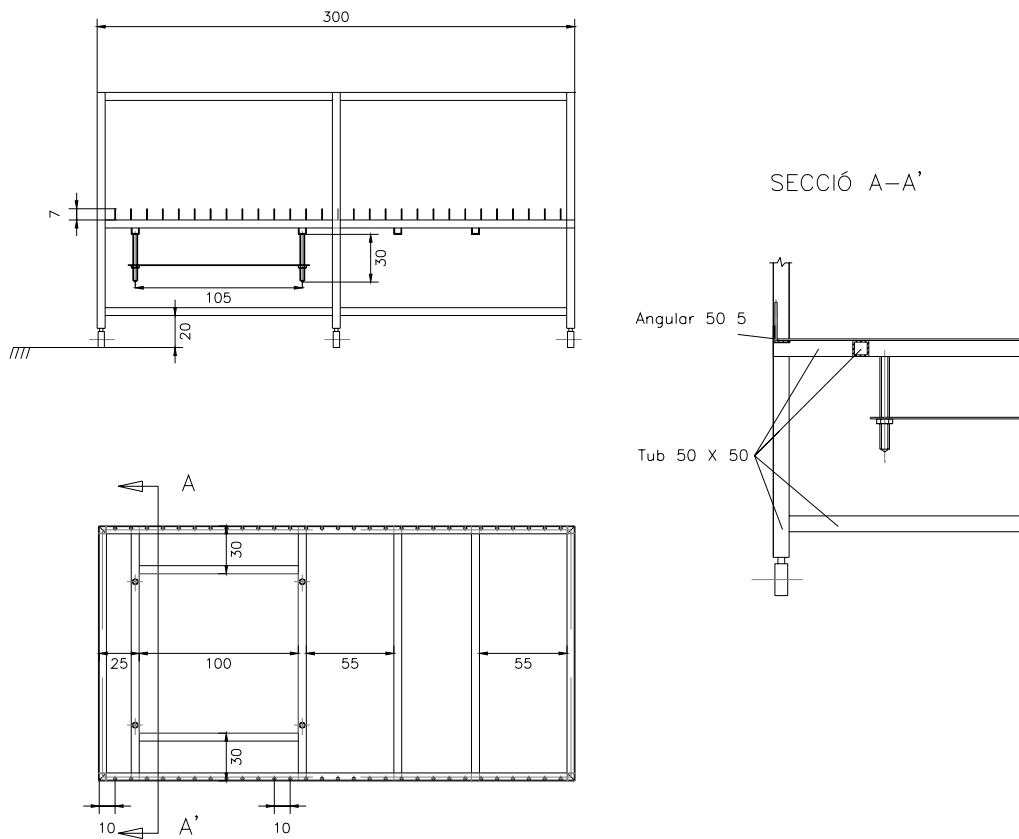


Figura 3.4. Elements estructurals i detall d'una secció.

Revestiments

A banda dels elements estructurals, calgué dissenyar també els revestiments de la taula, és a dir, els tancaments verticals de la superfície de treball i la seva pavimentació. Pel que fa als primers, el condicionant principal que s'hagué de tenir en compte fou el fet que les proves que s'havien de dur a terme assolirien temperatures considerables i, a més, que havien de ser enregistrades i seguides visualment durant la seva execució. Això significava que, en totes les cares de la taula a revestir, s'havien d'escollir materials resistents a la calor i que alguna d'aquestes cares havia de ser completament transparent. D'aquesta manera es decidí tancar la taula frontalment amb quatre vidres plans trempats, de 78,5 cm d'alt, 75 cm d'ample i 6 mm de

gruix, corredissos sobre unes guies d'alumini, per a facilitar l'operació de càrrega de combustible de la taula (figura 3.5). Les altres tres cares, és a dir les dues laterals i la oposada als vidres, foren tancades amb panells metàl·lics de xapa de 7 mm de gruix, regulables en altura. Es recobriren amb pintura tèrmica aplicada en esprai, de color negre mat, els interiors –a fi d'evitar possibles reflexions que dificultessin l'ús dels equips d'adquisició d'imatges– i vermell brillant, els exteriors (figura 3.6).



Figura 3.5. Muntatge dels quatre vidres corredissos.

Pel que fa a la pavimentació de la superfície d'assaig, a banda de tenir en compte que s'havia de conformar amb un material amb certes propietats tèrmiques –ja que just al seu damunt correria el front d'incendi–, es tingué en consideració que havia de ser adequada pel sistema de pesatge dissenyat per a la mesura de la velocitat de combustió.

Els sistemes per mesurar la velocitat de combustió més emprats en aquest camp estan formats bàsicament per un sensor o conjunt de sensors de pes ubicats sota d'una secció flotant de la superfície d'assaig. És a dir, una part de la superfície que, tot i estar perfectament inserida en ella, no n'està unida físicament. Recolza tot el seu pes sobre cel·les de càrrega o balances, de tal manera que, quan el front passa per sobre d'aquesta secció, aquests sensors enregistren la pèrdua de pes de combustible deguda al consum en la reacció de combustió. El sistema de pesatge utilitzat en l'experimentació fou d'aquesta tipologia i, ateses les seves

característiques, calgué dissenyar amb especial atenció la secció flotant, limitant el seu pes per no saturar la capacitat de càrrega del sistema. Això implicà doncs una selecció de materials molt acurada, tant pel que fa a la capa inferior d'aquesta secció com a la superior de revestiment, per a aconseguir una peça rígida, sòlida, resistent al foc i, a més, molt lleugera. D'aquesta selecció en derivaria també la solució del revestiment de la resta de la superfície d'assaig, per tenir unes condicions uniformes en aquest sentit, en tot el curs del foc.

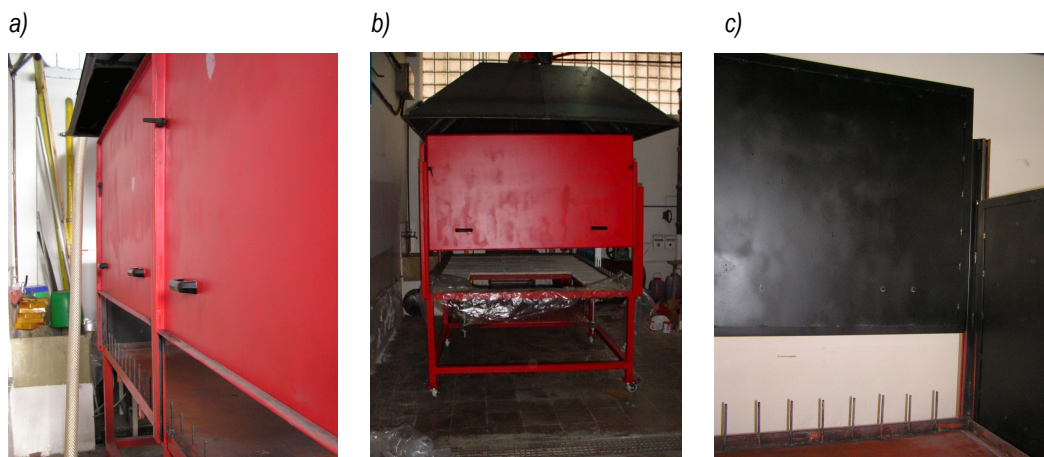


Figura 3.6. a) i b) Vistes exteriors dels panells de xapa metàl·lica. c) Cares interiors.

Disseny de la secció flotant de pesatge

Aquesta secció s'inserí en l'espai practicat en la superfície d'assaig, per tant es construí d'1 m² d'àrea. La capacitat de càrrega del sistema de pesatge, donada per les especificacions del sensor, estava limitada a 12 kg. Considerant una càrrega màxima de combustible tractat de producte de 2 kg per a permetre un rang d'experimentació ben ampli, el pes màxim de la secció es fixà en 10 kg. Amb aquestes especificacions s'estudiaren diverses alternatives, considerant diferents materials disponibles al mercat. Es realitzà la cerca centrada bàsicament entre plaques de fibra ceràmica, morters ignífugs projectables i ceràmiques refractàries conformades. Tots aquests tipus de materials presentaren inconvenients que feren desestimar-ne l'elecció.

Pel que fa a la fibra ceràmica, es trobaren fàcilment al mercat plaques d'una peça de les dimensions necessàries i amb densitats i propietats tèrmiques acceptables (a partir de 300 kg/m³ i fins a 1260°C de temperatura de treball). A més, les característiques d'aquestes plaques permetien que un sol element fes

les funcions de suport i revestiment. Però la limitació de pes imposada, implicava l'elecció de gruixos molt petits, la qual cosa es traduïa en una pèrdua considerable de rigidesa. A banda, aquest material generalment és cobert per una capa molt fina de dextrines combustibles, la qual cosa provocaria la degradació de la placa a mesura que s'anessin duent a terme les proves.

Els morters ignífugs projectables foren la segona opció a considerar. Aquests morters es poden aplicar sobre un ventall força ampli de superfícies i constitueixen un bon recobriment contra el foc. Com que les propietats eren adequades (densitats des de 350 kg/m^3 i estabilitats al foc de l'ordre de 180 minuts), s'estudià l'opció d'aplicar el gruix desitjat de morter sobre d'una superfície plana de fullola d' 1 m^2 –material de baixa densitat i amb bones propietats mecàniques– per a formar la superfície flotant, i tot seguit projectar el material sobre la resta de la superfície d'assaig d'acer. El cost elevat i el procediment complex d'aplicació feren declinar aquesta opció. No obstant això, es prengué com a vàlida la solució de conformar el suport de la superfície flotant amb una fullola de fusta prima d' 1 cm de gruix, de 480 kg/m^3 de densitat, sempre i quan se'n trobés el revestiment adequat. Es decidí d'aquesta manera perquè, amb el material seleccionat, s'assolien les dimensions de disseny amb un bon compromís de rigidesa i lleugeresa.

Així doncs, seguidament s'analitzà la possibilitat de cobrir la secció flotant i la resta de la taula, de ceràmica refractària conformada. Existeixen moltes marques comercials que fan ceràmica refractària ben diversa, tan pel que respecta als seus components com a les seves propietats. La gamma alta d'aquest tipus de producte, és a dir peces molt lleugeres, d'entre 400 i 500 kg/m^3 , i excel·lents propietats tèrmiques i mecàniques, s'ajustava perfectament a les necessitats experimentals. A banda, aquestes rajoles podien ser muntades fàcilment sobre la taula, i si es feia sense lligant, permetia un desmuntatge igualment senzill. Òbviament però, resultà ser la opció menys econòmica de totes.

D'aquesta manera es prengué la decisió d'elaborar un lot curt de ceràmiques a partir de l'adquisició de la matèria primera. S'estudiaren amb detall les propietats dels diversos components de les ceràmiques comercials i finalment es decidí manufacturar-les amb morter ignífug –fet a base de pols de vermiculita, pols de perlita i morter convencional– mesclat amb gra de vermiculita expandida. La perlita i la vermiculita són dos minerals amb molt bones propietats tèrmiques. El primer és d'origen volcànic i el segon és una argila micàcia. Ambdós minerals s'expandeixen més de deu vegades el seu volum original quan són escalfats fins

a llurs punts d'ablaniment. És aquest procés d'expansió que els confereix unes notables propietats com a aïllants tèrmics a banda d'una densitat molt baixa, la qual cosa els va fer idonis per a l'aplicació desitjada.

Així, s'adquirí el material a l'empresa PERLITA Y VERMICULITA, S.A. El morter, amb nom comercial PYROK 304, fou servit en pols amb sacs de 10 kg, mentre que la vermiculita es subministrà en gra expandit en sacs de 8 kg (Figura 3.7).



Figura 3.7. Matèria primera per a l'elaboració de la ceràmica de pavimentació.

Es dugueren a terme diverses proves a fi de trobar la formulació idònia. S'elaboraren prototips amb proporcions diferents de morter, vermiculita i aigua i amb tractaments diferents d'assecatge, per a determinar la variació de la densitat i les propietats mecàniques i tèrmiques finals de la peça acabada. Després d'analitzar aquests paràmetres, s'optà per la següent solució:

- *Formulació i conformat:* es manufacturaren les rajoles amb una proporció d'1, 2 i 4 en pes de vermiculita en gra, morter i aigua, respectivament. La pasta resultant de la mescla, fou conformada mitjançant encofrats de llistons de fusta construïts per a donar les dimensions pertinents; 31 cm x 23 cm x 1 cm pel que fa a les rajoles de revestiment de la secció flotant i 31 cm x 23 cm x 2,5 cm per les rajoles de pavimentació de la resta de superfície.

- *Adormiment i assecatge:* Per tal que el lligant prengués consistència i s'endurís, es deixaren reposar les peces en l'encofrat durant una setmana. A més, les rajoles que havien de ser disposades sobre la secció flotant de pesatge, foren sotmeses a un tractament tèrmic consistent en l'escalfament d'aquestes peces a 800°C durant 8 hores seguit d'un refredament lent fins a temperatura ambient, durant 24 h. D'aquesta manera s'assegurà l'eliminació total de l'aigua de la mescla, per tal d'assolir les densitats mínimes requerides.

D'aquesta manera s'aconseguí un material apte pel revestiment de la superfície de pesatge, especialment pel que fa a la seva densitat -350 kg/m^3 - que permeté conformar una secció flotant dins els límits de disseny. Fou igualment útil per la resta de la superfície d'assaig pel que respecta a les seves propietats tèrmiques, ja que les característiques de la matèria primera indicaven unes temperatures de treball superiors als 1000 °C. I en darrer lloc cal fer esment que fou, amb diferència d'entre totes les opcions estudiades, la solució de més baix cost. S'empraren en total quatre sacs de morter i dos de vermiculita, el cost total dels quals fou de 60 €. Pel que fa a la despesa en fusta -la fullola per la superfície flotant i els marcs d'encofrat- ascendí a 20 €. Així doncs, el cost total de la pavimentació quedà fixat en 80 €, ja que l'operació de conformació no implicà cap despesa addicional. A banda, el tractament tèrmic es dugué a terme a les instal·lacions de l'empresa ROCA, S.A. a la localitat de Gavà, per gentilesa del departament d'investigació i desenvolupament.

A la figura 3.8 s'hi inclouen imatges del procés constructiu i del muntatge posterior de les peces.

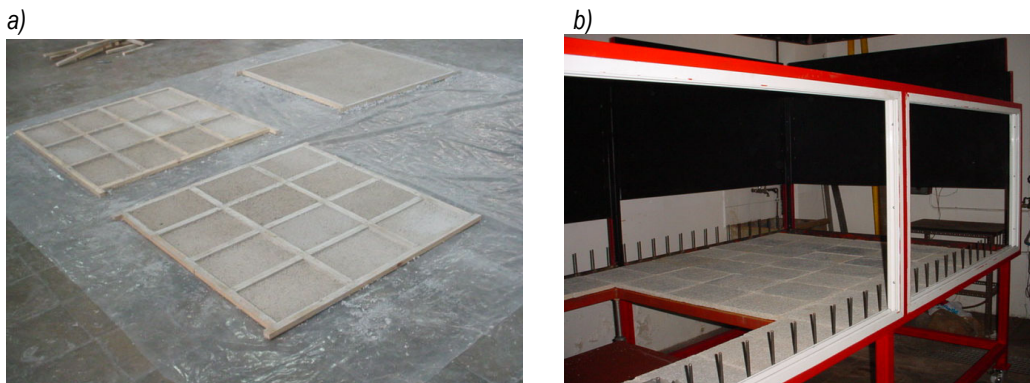


Figura 3.8.a) Adormiment de les peces en l'encofrat de fusta. b) Paviment de la superfície d'assaig.

3.1.3. Equips de mesura

Les variables seleccionades per a estudiar l'eficàcia dels tallafocs químics foren la velocitat de combustió, la velocitat de propagació, la temperatura del llit de combustible i la potència calorífica radiant. A banda, la correcta execució dels experiments, exigia el control d'altres paràmetres com les condicions ambientals d'humitat relativa o temperatura i el contingut d'aigua dels combustibles. En aquest apartat es descriuen tots els equips emprats a tal efecte, esmentant especialment llurs característiques tècniques i il·lustrant amb detall la inserció de tots ells en la instal·lació.

Mesura de la velocitat de combustió

La velocitat de combustió s'obtingué mitjançant un sistema de pesatge dissenyat en funció de les particularitats de l'experimentació i els condicionants econòmics. Es disposà sobre la superfície d'acer construïda per sota del pla d'assaig i constà bàsicament de dos elements fonamentals, la balança i la superfície de pesatge.

La balança electrònica es col·locà just al centre de la superfície de suport, sobre d'una peanya de fusta, per tenir el sistema perfectament equilibrat i a l'altura desitjada i se'n protegí la safata amb una làmina de poliestirè expandit per evitar-ne l'escalfament. El model escollit fou de la marca Satorius, sèrie Basic^{Lite} BL12. S'optà per aquesta elecció per la bona relació entre les seves prestacions –12 kg de capacitat de càrrega i 1 g de precisió– i el seu cost. Se li incorporà una interfase de comunicacions per tal d'enregistrar instantàniament els valors de pesatge per mitjà d'un ordinador, i se'n creà la interfície adequada per a la seva visualització. Aquestes connexions, juntament amb els programaris, es descriuen en detall en l'apartat dedicat al sistema d'adquisició de dades.

Pel que fa a la superfície de pesatge, composta per la làmina de fusta i la ceràmica aïllant, s'ubicà sobre la balança, exactament al mateix nivell que la resta de la superfície d'assaig. El seu pes final fou molt proper als 8 kg, per tant es garantí sobradament que la balança treballaria dins el rang indicat. Per a facilitar les operacions de càrrega i descàrrega de combustible, i per a poder tarar correctament l'equip, es disposaren quatre elevadors d'acer inoxidable a les quatre cantonades. A més, també serviren de repòs per a la superfície flotant quan la instal·lació no estava en funcionament. La disposició de tots aquests elements, queda reflectida en la figura 3.9.

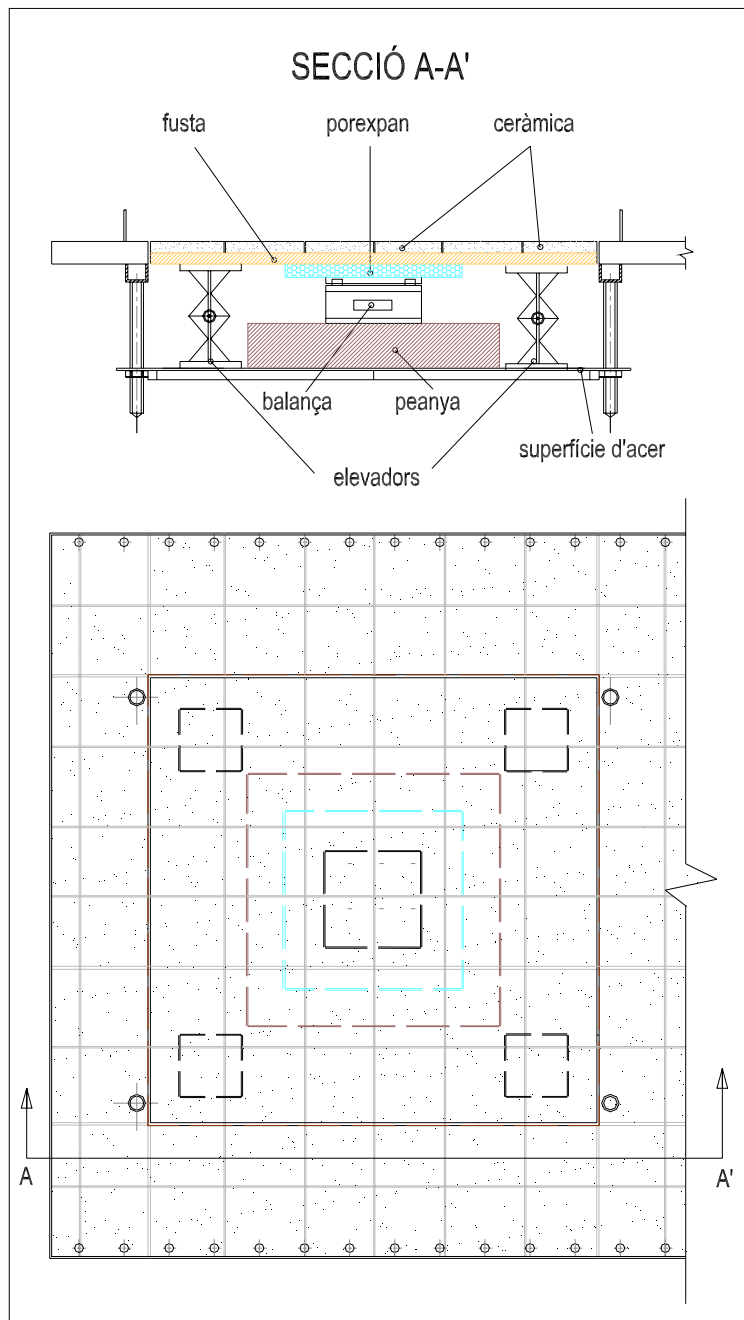


Figura 3.9. Sistema de pesatge per a la mesura de la velocitat de combustió.

Mesura de la velocitat de propagació

Tal i com ja s'ha mencionat, a banda del sistema visual clàssic que s'implementà a la taula d'assaig, la velocitat de propagació fou també mesurada mitjançant metodologies més complexes. S'optà per aquesta duplicitat degut al valor afegit d'aquestes tècniques. Corresponen a sistemes basats en tractament d'imatges i permeten doncs extreure molta més informació addicional referida a aquest paràmetre i, en general, al transcurs del front de flames.

En aquest sentit, es decidí incorporar una càmera de filmació de termografia infraroja. Aquest equip proporciona seqüències d'imatges que representen, en diferents colors o en escala de grisos, la distribució superficial de temperatures de l'objecte que s'està enregistrant. Per bé que la termografia infraroja s'empra habitualment en moltes disciplines de l'enginyeria per analitzar temperatures, l'ús més extès dins el camp dels incendis forestals és precisament l'obtenció d'imatges tèrmiques de l'incendi per a l'estudi del seu avanç. Amb les càmeres termogràfiques s'obtenen imatges en les que es pot visualitzar nítidament la posició del front i la seva interfase amb la zona de combustió. Això no sempre és possible amb imatges enregistrades dins el rang visible de l'espectre, on el fum pot ocultar les flames i aquestes, per la seva part, poden emascarar el llit de combustible.

El model de càmera utilitzada fou AGEMA Thermovision 570-Pro, fabricada per FSI-FLIR Systems. Opera en el rang de l'espectre infraroig comprès entre 7,5 i 13 μm i genera, mitjançant una matriu bidimensional de detectors, fins a un màxim de 5 imatges tèrmiques de 320 x 240 píxels per segon. Tot i que pot semblar una velocitat d'adquisició bastant baixa, és suficient per obtenir una bona seqüència que permeti desenvolupar una metodologia de tractament d'imatges apropiada per a estudiar l'evolució del front. Tal i com es descriu en punts posteriors, aquest equip es connectà a un ordinador que permeté dur a terme el control i l'observació de la gravació.

S'estudiaren dues alternatives per a col·locar la càmera, amb l'objectiu de trobar la posició idònia on les imatges enregistrades proporcionessin la màxima quantitat d'informació. La primera, paral·lela al llit de combustible i per tant, aproximadament perpendicular a les flames i la segona, a una certa altura, proporcionant una visió aèria de la superfície de treball, formant un cert angle d'inclinació respecte la vertical. Després de l'anàlisi d'aquestes dues opcions, fou la segona la que acomplí amb major grau els requisits.

Com a complement a la càmera de termografia, s'instal·la una càmera de vídeo en posició perpendicular al front d'incendi, 2 m endarrerida de la taula de combustió i a 75 cm d'un dels seus extrems. El model escollit fou Handycam Vision CCD-TR840E, de Sony, basat en la tecnologia de gravació analògica de Hi8. Amb la incorporació d'aquest aparell, s'obtingué el registre complet de les proves, filmant des del procés de preparació fins l'avanç complet del front i la seva extinció. D'aquesta manera es tingué un control rigorós de tot l'experiment que permeté identificar i situar els possibles errors d'execució o les irregularitats del front. A banda, amb la posterior captura de la seqüència referida al front d'incendi, es pogueren tractar les imatges, obtenint informació addicional del seu avanç i de la seva geometria.

Les figures 3.10 i 3.11 il·lustren el posicionament de les dues càmeres i s'hi inclouen fotografies dels equips així com una mostra de les imatges que se n'obtenen.

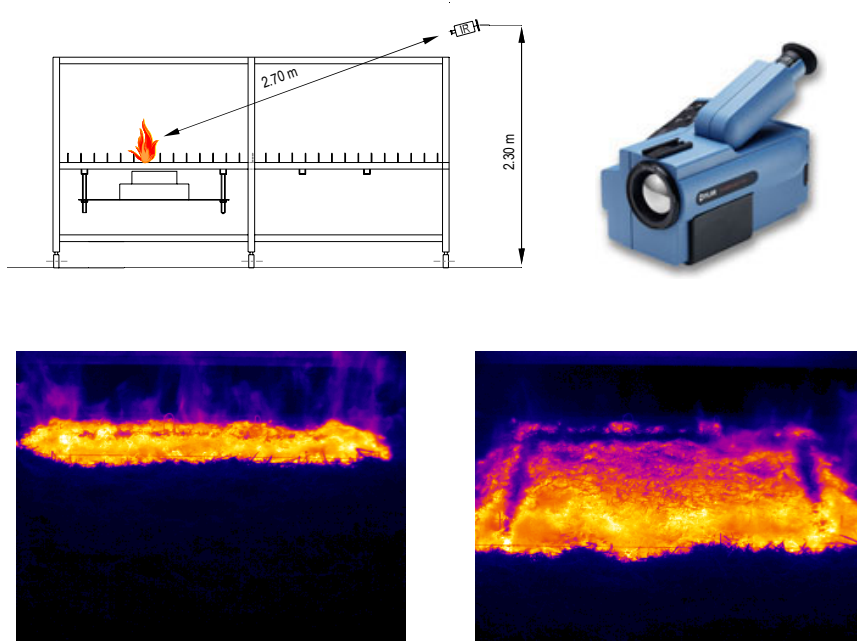


Figura 3.10. Posició i imatges amb càmera termogràfica.

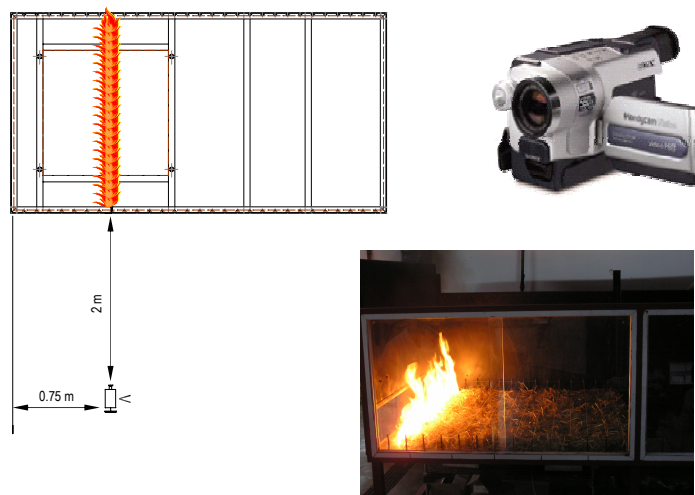


Figura 3.11. Posició i imatges amb càmera de vídeo.

Mesura de la temperatura

A banda d'emprar la càmera de termografia infraroja per a l'estudi de la velocitat de propagació, òbviament també fou utilitzada per a l'extracció de dades referents a la temperatura del llit de combustible. Aquest equip pot mesurar temperatures dintre d'un rang comprès entre -20°C i 1500°C , amb una precisió de 2% i una sensibilitat inferior a $0,15^{\circ}\text{C}$, per tant es tracta doncs d'un aparell amb unes especificacions tècniques excel·lents. Amb tot, per tal que la càmera proporcionés valors d'igual confiança, calgué estudiar i definir acuradament llurs condicions d'operació. Aquest treball es recopila en l'annex I, on, a més a més, s'amplia la informació referent al funcionament i a l'ús de la termografia en general i d'aquest equip en concret, aplicada als incendis forestals i a el cas particular que es tracta en aquesta tesi.

La termometria convencional, que a banda segueix essent la més emprada específicament en aquest camp, es fonamenta en sistemes de mesura per contacte, com ho són els termoparells. Fou per aquesta raó, que s'instal·là una xarxa de 10 d'aquests sensors per a realitzar mesures de la temperatura del llit de combustible que permetessin contrastar la informació proporcionada per la càmera i fins i tot avaluar la velocitat de propagació, en cas necessari per una possible fallada d'algun dels sistemes ja implementats. Es disposaren al perímetre de la superfície flotant tal i com indica la figura 3.12.

S'utilitzaren termoparells tipus K de cromel i alumel, de 3 mm de diàmetre de cable que es connectaren, a través de sengles línies de compensació, al maquinari d'adquisició de dades, situat a la zona de control. El seu funcionament es regí i controlà per mitjà de la interfície creada també pel suport al sistema de pesatge.

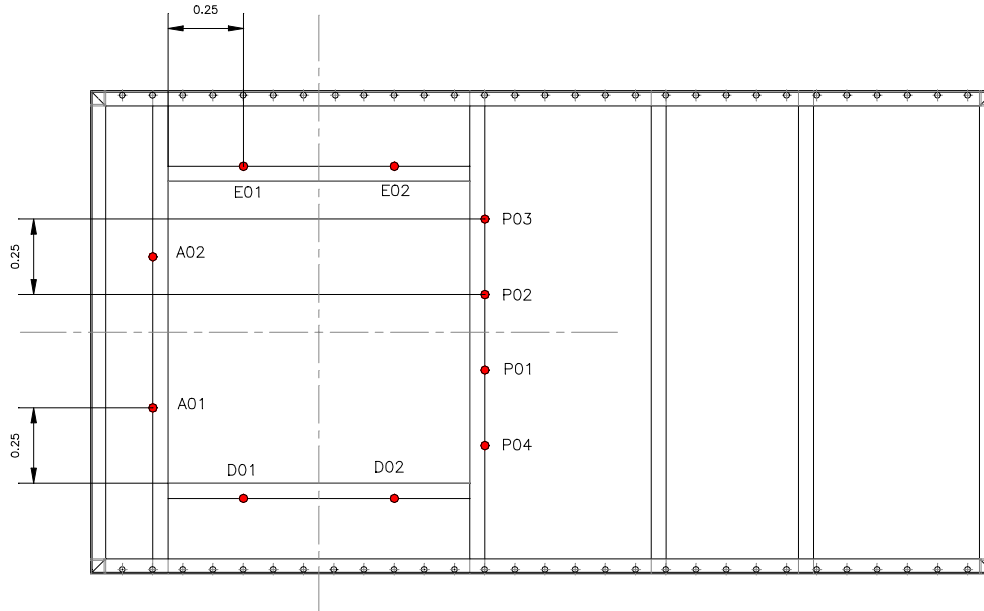


Figura 3.12. Posicionament de termoparells.

Mesura d'altres variables

A banda de la velocitat de combustió, la velocitat de propagació i la temperatura, fou necessari conèixer altres variables que, per bé que no exigien com aquestes un control temporal de la seva evolució durant el pas del front, foren igualment importants per a dur a terme els experiments amb èxit. Així, calgué buscar altres sistemes de mesura per a determinar en la fase prèvia de cada prova l'estat del combustible i les condicions ambientals.

Ja ha estat comentada en el capítol primer, la importància de conèixer l'estat hídric del combustible per a poder avaluar el comportament dels incendis i en particular quan es pretén estudiar l'eficàcia de qualsevol

agent extintor. Fou per aquest motiu que es decidí emprar un equip d'alta precisió per a la determinació d'aquest paràmetre.

L'analitzador d'humitat electrònic Sartorius MA-45 permet determinar la humitat del combustible mitjançant termogravimetria infraroja. Aquest aparell disposa d'una unitat ceràmica calefactorsa emissora de radiació infraroja ($2.8 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$), que incideix directament sobre la mostra a analitzar i l'escalfa. Aquesta desprèn tota la humitat progressivament i en un període de temps molt curt, de tal manera que, en pocs minuts, mitjançant un càlcul bàsic sobre el decrement de pes, l'analitzador proporciona el valor percentual del contingut d'aigua de la mostra. La implementació d'aquest sistema permeté treballar amb unes condicions òptimes de fiabilitat i rapidesa. Amb tot, calgué dur a terme prèviament un procés molt acurat i minuciós de calibratge (Pérez, 2003).

L'analitzador d'humitat fou posicionat a l'àrea destinada a l'aprovisionament de combustible, juntament amb una balança Sartorius Basic^{lite}600 (de 600 g de capacitat de pesada i 0,1 g de precisió) emprada durant el procés de càrrega de combustible sobre la superfície d'assaig. Completà aquest conjunt un termohigròmetre digital, que serví per a mesurar la temperatura i la humitat relativa de l'ambient, just en el moment de dur a terme cada prova. Tot aquest instrumental es pot visualitzar a la figura 3.13.



Figura 3.13. Equips de mesura a l'àrea d'aprovisionament de combustible. Balança, termohigròmetre i analitzador d'humitat.

3.1.4. Sistema d'adquisició de dades

Un cop finalitzada la selecció dels aparells de mesura, calgué a dur a terme la instal·lació i connexió de tots ells, així com el desenvolupament i implementació de programaris per a controlar-los i gestionar-ne la informació. Aquesta fou una tasca d'especial rellevància, ja que, en qualsevol programa experimental, la qualitat i idoneïtat del sistema d'adquisició garanteix en gran mesura la disponibilitat de dades igualment fiables.

Descripció general

El sistema d'adquisició de dades fou integrat pel conjunt de línies de comunicació entre els diferents equips de mesura i els maquinaris, així com per aquests darrers i els programaris utilitzats per a l'aplicació. La figura 3.14 presenta de manera esquemàtica cada un dels seus components i tot seguit se'n fa la seva descripció.

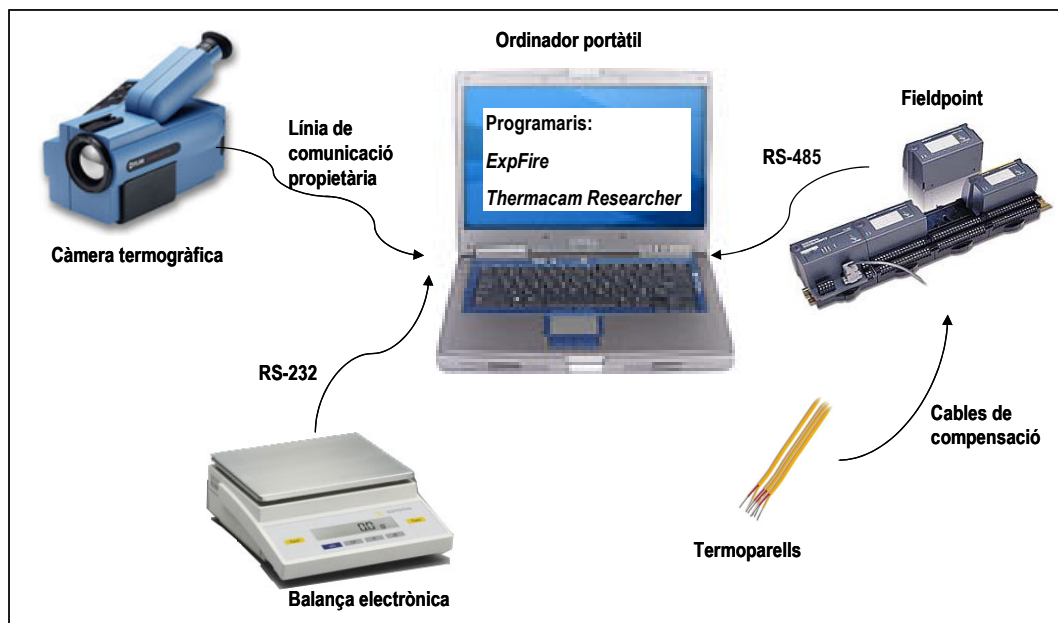


Figura 3.14. Sistema d'adquisició de dades.

Adquisició de dades de la balança

Per tal d'adquirir les dades procedents de la balança per mitjà de l'ordinador, se li incorporà una interfase de comunicacions del tipus RS-232 bidireccional. La configuració d'aquesta línia de comunicació es realitzà atenant els paràmetres subministrats pel fabricant, pel que fa a velocitat de transmissió, el format de les dades i el tipus de sincronització. Aquesta informació es recull a la taula 3.1.

Adquisició de dades dels termoparells

La captura de dades dels termoparells requerí d'un maquinari interfacial entre aquests sensors i l'ordinador, anomenat FieldPoint, subministrat per National Instruments. Es tracta d'un sistema modular de distribució d'entrades i sortides, que centralitza la presa de dades provinents de diversos sensors. La utilització d'aquest equip permet reduir el sistema físic de comunicacions així com simplificar i estandarditzar la lògica i els protocols d'adquisició de dades per part de l'ordinador. Aquest sistema es compongué de diversos elements, dos mòduls d'entrada i sortida de vuit canals cadascun d'ells –deixant doncs sis vies lliures per a possibles ampliacions– i un mòdul de comunicacions, emprat per a connectar els anteriors a través d'un bus local d'alta velocitat amb el port de comunicacions RS-485 de l'ordinador. Les especificacions d'aquesta línia també s'inclouen a la taula anteriorment citada.

Adquisició de dades de la càmera termogràfica

Tot i que aquest equip està preparat per a poder treballar amb una total autonomia, tant pel que fa a l'alimentació com a l'emmagatzematge de la informació –disposa de bateria recarregable de més de 90 minuts de duració i d'una tarja PCMCIA de 170 MB de memòria–, les condicions fixes de treball d'aquest aparell en el laboratori feren més adient incorporar una connexió de l'equip directa a l'ordinador. D'aquesta manera, s'assegurà un control i una gestió a temps real de llurs dades. La transmissió subministrada per FSI FLIR Systems, fou una línia de comunicació pròpia desenvolupada per la mateixa casa comercial.

Programaris de gestió de dades

Tot el procés d'adquisició es regí i controlà per mitjà de dues aplicacions informàtiques d'origen divers. La primera d'elles fou el programari anomenat *ExpFire*, una eina dissenyada en l'entorn de programació Visual Basic, creada específicament per a aquest treball experimental. La segona fou el programa *ThermaCAM™ Researcher 2001*, desenvolupat per FLIR Systems AB, una aplicació comercial per a l'adquisició i l'anàlisi de

seqüències d'imatges termogràfiques. Per a la utilització conjunta d'aquests dos programes, s'utilitzà un ordinador portàtil de 1,56 Hz de velocitat, 256 MB de memòria RAM i amb un mínim de 400 MB d'espai lliure en disc, per a cada sessió de proves.

Taula 3.1 Especificacions de les línies de comunicació.

Línia de comunicació	Velocitat	Format de les dades	Sincronització
RS 232 balança	9,6 kbps	1 bit d'inici, 1 bit de parada, 8 bits de dades, paritat senar	Hardware handshake
RS 485 termoparells	115,2 kbps	1 bit d'inici, 1 bit de parada, 8 bits de dades, sense paritat	Hardware handshake

Expfire permeté la presa sincrònica de les dades provinents de la balança i dels termoparells, la seva visualització instantània en pantalla i, finalment, l'exportació de tota aquesta informació a diversos formats (txt, xls, etc.). Per a poder dur a terme totes aquestes tasques de manera ràpida i fàcil, es dissenyà la seva interfície dividida en quatre quadrants. El superior esquerre, per l'edició i el control de l'adquisició de les dades; el superior dret i l'inferior esquerre per la visualització de l'evolució numèrica de les temperatures enregistrades pels termoparells i els pesos de la balança, respectivament; i l'inferior dret per a la representació gràfica conjunta de les dues variables. La figura 3.15 mostra l'aparença d'aquesta interfície en un instant determinat d'una prova.

El paquet *ThermaCAM™ Researcher 2001*, fou l'altra eina utilitzada en aquesta fase experimental, per bé que la seva gran versatilitat en permeté el seu ús en fases posteriors de càlcul i anàlisi de resultats. Pel que fa a la seva funció d'adquisició d'imatges, cal assenyalar que està desenvolupada per a capturar seqüències de manera senzilla i amb múltiples especificacions referents als formats i la qualitat i quantitat de la informació, i també per a realitzar el control remot de l'òptica de la càmera, opció de gran utilitat atesa la posició de la càmera termogràfica dins el conjunt experimental. La interfase d'aquest programa, pròpia de qualsevol eina desenvolupada per a treballar amb el sistema MS Windows™, s'observa en la figura 3.16.

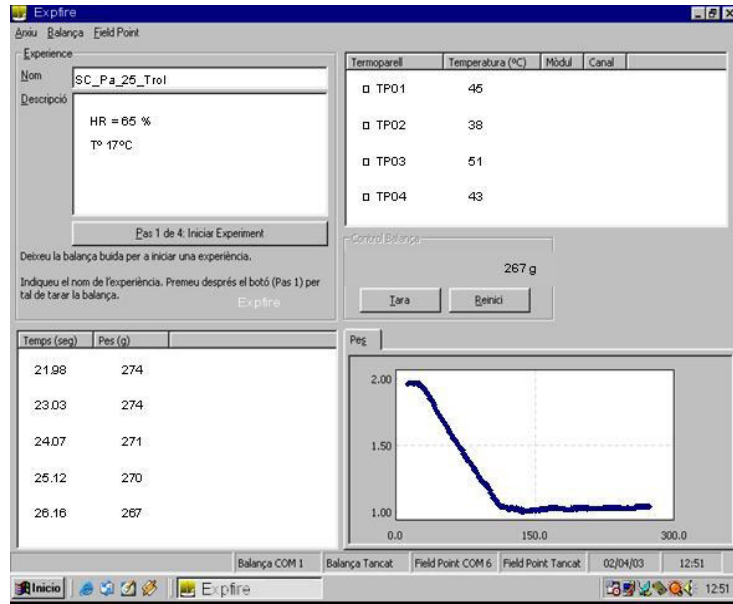


Figura 3.15. Interfície del programa Expfire.

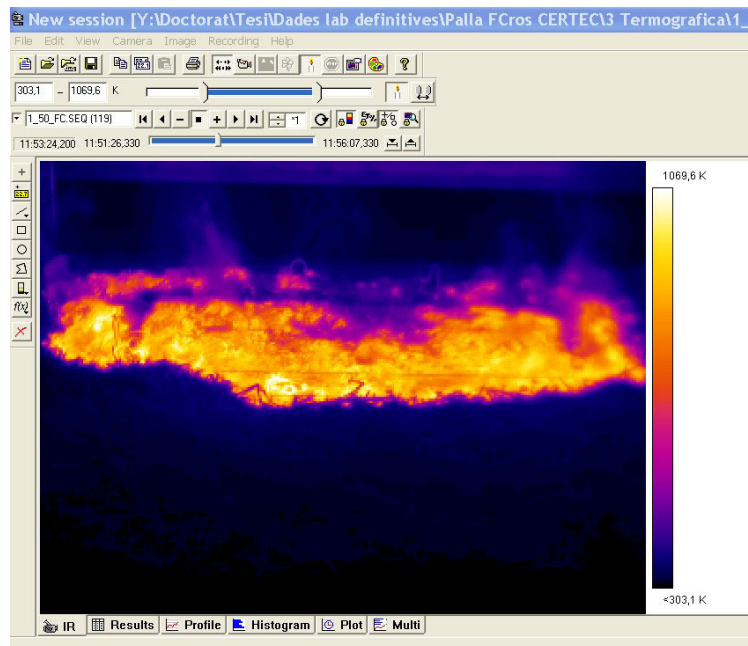


Figura 3.16. Interfície del programa ThermoCAM™ Researcher 2001.

3.2. La instal·lació experimental de la Universitat de Coimbra

La segona fase experimental es dugué a terme al centre de recerca ADAI (Associació pel Desenvolupament d'Aerodinàmica Industrial), vinculat a la Universitat de Coimbra. Aquest grup disposa de diverses instal·lacions dissenyades per a la recerca en incendis forestals i, d'entre totes elles, es decidí treballar en la que reunís unes determinades particularitats. Aquesta instal·lació havia de permetre dur a terme proves conceptualment semblants a les realitzades a Barcelona, però les seves característiques havien de diferir en certs aspectes respecte la instal·lació de la UPC, per tal d'aplicar una nova metodologia d'assaig. Així, s'utilitzà un equipament compost igualment per quatre mòduls (vegeu apartat 3.1.1), però amb una taula de combustió força diferent, tal i com es descriu en el següent apartat.

3.2.1. Descripció de la taula de combustió

Estructura i revestiments

La taula d'assajos emprada a Coimbra fou, pel que fa als elements estructurals, similar a la de la UPC; composta bàsicament per una superfície horitzontal de xapa, recolzada sobre una estructura metàl·lica d'acer i amb els mateixos complements per a la mesura de la velocitat de propagació i de combustió. Nogensmenys, les dimensions d'aquesta taula (1,3 m d'amplària i 2 m de llargada), sensiblement inferiors, li conferiren unes de les singularitats requerides per tal de dur-hi a terme proves diferents a les fetes a Barcelona. Per altra banda, el revestiment quedà conformat per vidre trempat corredís com a tancament frontal de la taula, per panells mòbils de xapa metàl·lica als laterals i per conglomerat de fusta fixat a les cares oposades al vidre. Cal assenyalar que la superfície d'assaig de la taula no es revestí amb cap tipus de pavimentació específica. En la figura 3.17 s'hi observen aquests detalls.

Equips de mesura i adquisició de dades

Aquesta instal·lació permeté obtenir mesures de la velocitat de propagació –mitjançant el mateix sistema visual clàssic que l'implementat a la UPC– i de la velocitat de combustió. La mesura d'aquesta darrera variable es dugué a terme amb un sistema de pesatge integrat a la taula, compost bàsicament per una superfície flotant d'acer –de 0,25 m, en la direcció paral·lela a l'avanç del front, per 0,75 m, en direcció perpendicular– i una balança electrònica AND FW-15K, de 15 kg de capacitat i 2 g de precisió, connectada a través del port RS-232 a un ordinador. El sistema que s'utilitzà per a gestionar aquestes dades, fóu una

senzilla aplicació en MS-DOS que permetia capturar la seqüència de valors de la balança i exportar-la a un format adequat per al seu tractament.

Finalment, cal esmentar que, pel bon desenvolupament de les proves, també es disposà d'un analitzador electrònic d'humitat AND EY-220M i d'una balança AND FW-15KA2 per a carregar adequadament el combustible sobre la superfície d'assaig.



Figura 3.17. Taula de combustió de la Universitat de Coimbra.

3.3. Els productes retardants utilitzats

3.3.1. Selecció de productes

Per a dur a terme l'experimentació a laboratori, es decidí emprar diversos retardants comercials d'utilització habitual per part dels diferents cossos de bombers de la conca mediterrània. Atesa la seva disponibilitat, els productes testats a la instal·lació de Barcelona van ser els retardants líquids FIRETROL 931 i FR CROS

134P. El primer d'ells, és un producte fabricat a Canadà per l'empresa Biogema S.A., utilitzat habitualment pels mitjans aeris de bombers a Catalunya i al País Valencià. Va ser subministrat per gentilesa del Departament d'Interior de la Generalitat de Catalunya, des de la base que la distribuïdora del retardant, Avialsa T-35 S.L., disposa a l'aeroport de Sabadell (figures 3.18 a) i b)). Pel que fa al segon producte, és un retardant que es fabrica i s'empra a la resta de l'Estat Espanyol, tant per mitjans aeris com terrestres. S'adquirí, també gratuïtament, a l'empresa Budenheim Ibérica Comercial S.A.

A la instal·lació de Coimbra s'utilitzà el producte FIRETROL 934, també de Biogema S.A. Gràcies a la participació del grup ADAI en el projecte europeu ERAS (*Extension Retardant Application System*) per a la recerca en l'aplicació terrestre d'aquest retardant, se'n pogué disposar lliurement sense cap tipus de cost ni de restriccions.

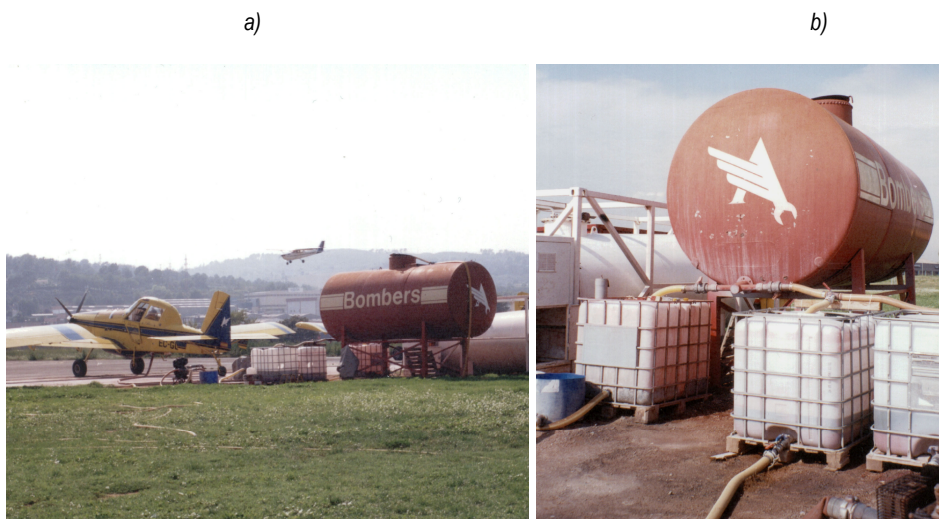





Figura 3.18. a) Base d'Avialsa T-35 S.L. a l'aeroport de Sabadell. b) Detall d'un dels seus dipòsits.

3.3.2. Característiques físiques i químiques

La caracterització dels tres productes seleccionats va ser facilitada per les cases comercials. A la taula 3.2 se'n recullen les propietats físiques i químiques més destacables. Tanmateix, es van dur a terme anàlisis senzilles de laboratori per tal de corroborar i ampliar aquesta informació, sobretot pel que fa al cas de la

densitat i del factor de dilució en aigua dels productes. El recull d'aquestes proves així com llurs resultats i conclusions s'especifiquen en l'annex II.

Taula 3.2. Característiques físiques i químiques dels retardants.

Característiques		FIRETROL 931	FIRETROL 934	FR CROS 134P
				
Component actiu		Polifosfats d'amoni	Polifosfats d'amoni	Polifosfats d'amoni
Additius	Agent espessidor	Argila d'attapulgita	Argila d'attapulgita	Goma de guar
	Inhibidor de la corrosió	Dicromat de sodi	Dicromat de sodi	Ferrocianur de sodi
	Agent colorant	Òxid de ferro	Sense colorant	Òxid de ferro
pH		6,4	6,1	6-7
Viscositat		1000 cps	1000 cps	250 cps
Color		Vermell	Blau fosc	Vermell
Densitat	Especificada pel fabricant	1,38-1,43 kg/l	1,4 kg/l	1,4 kg/l
	Mesurada experimentalment	1,30 kg/l	1,35 kg/l	1,31 kg/l
Dilució mesurada experimentalment		41,63 % de massa d'aigua 58,37 % de massa de producte sec	45,25 % de massa d'aigua 54,75 % de massa de producte sec	42,03 % de massa d'aigua 57,97 % de massa de producte sec

3.4. Els combustibles utilitzats

3.4.1. Selecció de combustibles

Una de les pràctiques més difoses en el camp de la recerca en incendis forestals és l'experimentació a laboratori amb material combustible fi, ja sigui extret directament de formacions naturals o processat industrialment. Així, es pot aconseguir un llit de combustible bastant homogeni i, a més, se'n poden conèixer les seves propietats d'una manera ràpida i senzilla. Les espècies testades inicialment durant el procés de posada a punt de la instal·lació foren diverses; concretament s'empraren dues espècies d'agulles de pi, blanc (*Pinus halepensis*) i pinyoner (*Pinus pinaster*) i dues de palla de cereals, blat comú i dur (*Triticum aestivum* i *Triticum turgidum*) i ordi (*Hordeum vulgare*).

D'entre totes elles, se'n seleccionaren les més apropiades per a dur a terme les proves amb productes retardants. Els criteris utilitzats per a definir la naturalesa del combustible van ser, essencialment, la seva disponibilitat i facilitat de manipulació, així com les propietats del material. D'aquesta manera, es decidí treballar a Barcelona amb palla de blat comú, un combustible de fàcil obtenció a qualsevol establiment d'agrocomerç, molt homogeni i molt senzill de caracteritzar. A Coimbra, a banda d'utilitzar també aquest mateix combustible d'una altra varietat –blat dur–, s'experimentà amb agulles de pi pinyoner, una espècie molt comuna a la zona i freqüentment utilitzada pel grup de recerca ADAI. Les disposicions naturals d'aquests combustibles s'observen a les figures 3.19.

a)



b)



Figura 3.19 a) Camp de cereal. b) Pineda.

3.4.2. Propietats dels combustibles

Els combustibles forestals se solen caracteritzar des d'un punt de vista microscòpic i macroscòpic. L'anàlisi microscòpica ateny principalment les característiques tèrmiques, geomètriques i químiques de les partícules de combustible, és a dir, les propietats intrínseques de l'espècie. L'anàlisi macroscòpica fa referència a la caracterització de la disposició del combustible en el medi, ja sigui natural o experimental.

A la taula 3.3, s'hi engloben els resultats derivats de l'estudi de caracterització del combustible, recopilat en l'annex III, pel que fa a les propietats intrínseques. D'entre totes elles, foren treballades aquelles més necessàries per a l'estudi del comportament dels incendis. Així s'obtingueren dades referents a la geometria de les partícules característiques del material combustible –a partir del paràmetre relació superfície-volum (σ)–, de les densitats (ρ_m) i finalment de les propietats tèrmiques més importants; la calor específica (C_f) i la calor de combustió, aquesta darrera avaluada experimentalment a partir del poder calorífic superior (PCS).

Taula 3.3. Propietats intrínseques dels combustibles emprats en l'experimentació

Propietats intrínseques	Blat comú	Blat dur	Ordi	Pi blanc	Pi pinyoner
σ (m ⁻¹)	7714	4734	16339	10531	979
ρ_m (kg/m ³)	315	258	595	979	686
C_f (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
PCS (kJ/kg)	18976 / 18702*	18868	18251	20999	20593

(*) La inclusió de dos valors és deu a la utilització de dues remeses diferents d'aquesta espècie.

Les propietats macroscòpiques o extrínseques foren analitzades experimentalment considerant les disposicions de combustibles programades per a cada sèrie d'assajos. En l'annex III es detalla aquesta anàlisi, així com llurs resultats.

3.5. Disseny experimental i metodologia a la UPC

Un cop finalitzada la construcció de la instal·lació de Barcelona i el disseny i implementació de tot el sistema d'adquisició de dades, es determinà un programa experimental a partir del qual es pogués estudiar l'efecte dels productes retardants seleccionats sobre llits de palla de blat. En aquesta tasca, es fixaren les condicions de cadascuna de les proves que s'haurien de realitzar al CERTEC per tal de tenir un banc de dades complet. Prèviament però, fou necessari realitzar diverses proves preliminars per tal d'adquirir experiència, –en el maneig de la instal·lació, en l'execució dels assajos i en la posada en funcionament i el control del sistema d'adquisició de dades–, per concretar el rang dels diferents paràmetres característics de les proves i per definir una correcta metodologia d'assaig (Pérez, 2003). Aquestes proves es realitzaren amb diversos combustibles, emprant els més desfavorables en cada cas, per tal de conferir una versatilitat a la instal·lació, imprescindible per posteriors programes experimentals.

3.5.1. Proves preliminars

Ajust de la càrrega de combustible

La quantitat de combustible que conforma el llit té una influència notable en el règim d'un incendi –ja sigui real o de laboratori–, és a dir, en el rang de velocitats de propagació i de combustió que assoleix, en les característiques geomètriques del front i en la potència calorífica i la temperatura de les flames. Aquest va ser doncs, abans que qualsevol altre, el primer paràmetre del disseny experimental que calgué determinar.

Les càrregues de treball seleccionades havien de permetre uns comportaments del foc que reunissin certes particularitats. En primer lloc, els règims d'incendi derivats de cadascuna de les càrregues havien de ser suficientment diferenciats entre ells. D'altra banda, havien d'estar dins d'un rang que garantís, en el seu lílindar superior, dur a terme les proves assegurant la integritat de la instal·lació i, en el seu lílindar inferior, un marge suficient per poder-hi observar adequadament l'efecte dels retardants. El combustible seleccionat per aquest ajust fou l'ordi, degut a la seva baixa densitat aparent. Amb aquests condicionants i amb el resultat d'aquestes primeres proves –les especificacions de les quals es recopilen a la taula 3.4– es fixaren tres càrregues de treball de 0,25, 0,5, i 0,75 kg/m² en base seca.

Regulació d'altures dels tancaments

Els tancaments de la taula de combustió, pel que fa als costats paral·lels a l'avanç del front, van ser dos panells de xapa metàl·lica (vegeu apartat 3.1.2.). Se'ls conferí la particularitat de permetre'n la seva regulació en altura, per tal de facilitar les operacions de càrrega de combustible i per optimitzar la circulació d'aire durant les proves. Aquest darrer, és un paràmetre que requereix un cert control a l'hora de dissenyar aquest tipus d'experiments. La presència suficient d'oxigen és sempre recomanable per tal de garantir un bon rendiment en la reacció de combustió, però, per alta banda, un excés d'aire en moviment pot provocar inclinacions no desitjades de les flames i un règim turbulent i inestable que dificulta la repetibilitat dels experiments i l'obtenció de resultats fiables. Per aquest motiu fou necessari realitzar una sèrie d'experiments variant l'altura dels tancaments (taula 3.4). Així, es practicaren diferents obertures per a facilitar corrents d'aire a favor i en contra de l'avanç del front i se n'observaren els resultats. D'aquest anàlisi se'n va concloure que les altures a les que havien de quedar fixats els tancaments serien 20 cm pel panell més proper a la línia d'ignició i 15 cm pel panell posterior al front, per a tots els experiments que es duguessin a terme en aquesta instal·lació. El combustible emprat fou igualment l'ordi, ja que, per idèntiques càrregues, els llits compostats d'aquest combustible són més alts, la qual cosa implica també flames més altes i més turbulentes.

Aplicació del producte retardant

Els retardants a llarg termini s'utilitzen en les tasques d'extinció d'incendis forestals diluïts en aigua entre un 15% i un 20% en volum i s'apliquen, bé per mitjans terrestres o aeris, en dosificacions d'entre 0,5 l/m² i 5 l/m², segons la formació de combustible a tractar. Aquests poden ser uns valors adequats per la pràctica habitual en incendis reals, però difereixen dels valors òptims per l'experimentació a laboratori, donat l'evident canvi d'escala. L'objectiu d'aquesta sèrie de proves, especificades també en la taula 3.4, va ser doncs fixar una dosificació adequada al lit experimental de combustible i un rang de concentracions de retardant, de tal manera que la conjunció d'aquests dos factors permetés observar una progressió interessant de l'efecte del producte sobre el comportament del foc. Aquestes proves es realitzaren amb pi blanc, ja que d'entre totes les espècies disponibles és la que té una combustió i un avanç més lent. Els resultats d'aquests assajos determinaren les condicions de treball, que quedaren establertes en dosificacions de l'ordre de 30 ml/m² i en concentracions de 0%, a 20% en volum de retardant. Per altra banda, aquesta sèrie experimental va permetre establir la metodologia més idònia d'aplicació del producte, tasca essencial per al bon desenvolupament de les proves.

Taula 3.4. Proves preliminars

Sèrie d'experiments	Especificacions de la prova				
	Nom de l'assaig	Càrrega de combustible	Altures dels panells		Tractament
			P. anterior	P. posterior	
Ajust de la càrrega de combustible	SC-1	0,4 kg/m ²	0 cm	0 cm	--
	SC-2	0,6 kg/m ²	0 cm	0 cm	--
	SC-3	0,8 kg/m ²	0 cm	0 cm	--
Regulació d'altures dels tancaments	ST-1	0,25 kg/m ²	0 cm	0 cm	--
	ST-2	0,25 kg/m ²	0 cm	15 cm	--
	ST-3	0,25 kg/m ²	0 cm	25 cm	--
	ST-4	0,25 kg/m ²	0 cm	33 cm	--
	ST-5	0,75 kg/m ²	0 cm	0 cm	--
	ST-6	0,75 kg/m ²	0 cm	15 cm	--
	ST-7	0,75 kg/m ²	0 cm	25 cm	--
	ST-8	0,75 kg/m ²	0 cm	33 cm	--
	ST-9	0,25 kg/m ²	10 cm	15 cm	--
	ST-10	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	--
	ST-11	0,25 kg/m ²	10 cm	15 cm	--
	ST-12	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	--
Aplicació del producte retardant	SR-1	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	--
	SR-2	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	10 ml/m ² d'aigua
	SR-3	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	40 ml/m ² d'aigua
	SR-4	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	60 ml/m ² d'aigua
	SR-5	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	30 ml/m ² FIRETROL 931 diluït a l'1%
	SR-6	0,25 kg/m ²	20 cm	15 cm	30 ml/m ² FIRETROL 931 diluït al 20%

3.5.2. Disseny d'experiments

Donats els resultats de les proves preliminars, la disponibilitat de material combustible i retardant i els objectius perseguits en aquesta tesi, es dissenyà un banc d'assajos per a realitzar a la instal·lació de la UPC. Aquests assajos s'agruparen per sèries, en funció de la càrrega de combustible utilitzada. La conjunció de les diverses sèries realitzades amb el mateix combustible i retardant, composaren finalment un bloc experimental.

D'aquesta manera es realitzaren un total de quatre blocs. Els dos primers, realitzats amb una primera remesa de blat comú de baixa qualitat, es diferenciaren en la utilització del producte. En la primera, s'emprà el Fire Trol 931 i en la segona el FR Cros 134 P. En els blocs 3 i 4, s'utilitzaren també respectivament el Fire Trol 931 i el FR Cros 134P, però la remesa de blat comú emprat en aquest cas fou de primera qualitat. Les diferències entre aquestes dues classes de blat queden exposades en l'annex III de caracterització del combustible mencionat amb anterioritat i es designaren, per tal de ser diferenciades, com a blat comú vell i blat comú nou.

La configuració dels blocs es recull en la taula 3.5 i els assajos que els composaren, ateses les càrregues, dosificacions i concentracions en les taules 3.6 (blocs 1 i 2) i 3.7 (blocs 3 i 4).

Taula 3.5. Configuració dels quatre blocs experimentals

Bloc	Combustible	Retardant
1	Blat comú vell	Fire Trol 931
2	Blat comú vell	FR Cros 134P
3	Blat comú nou	Fire Trol 931
4	Blat comú nou	FR Cros 134P

Taula 3.6. Bloc experimental primer i segon.

Bloc 1		Bloc 2	
Sèries	Assajos	Sèries	Assajos
$C_s = 250 \text{ g/m}^2$	Assaig control (amb rèplica) 30 ml/m ² al 0% 30 ml/m ² al 5% (amb rèplica) 30 ml/m ² al 10%	$C_s = 250 \text{ g/m}^2$	Assaig control (amb rèplica) 30 ml/m ² al 0% 30 ml/m ² al 10%
$C_s = 325 \text{ g/m}^2$	Assaig control 35 ml/m ² al 3%		
$C_s = 500 \text{ g/m}^2$	Assaig control 30 ml/m ² al 0% 30 ml/m ² al 10% 30 ml/m ² al 20%	$C_s = 500 \text{ g/m}^2$	Assaig control 30 ml/m ² al 0% 30 ml/m ² al 10% 30 ml/m ² al 20%
$C_s = 750 \text{ g/m}^2$	Assaig control 30 ml/m ² al 0% 30 ml/m ² al 10% 30 ml/m ² al 20%	$C_s = 750 \text{ g/m}^2$	Assaig control 30 ml/m ² al 0% 30 ml/m ² al 10% 30 ml/m ² al 20%

Cal destacar de la taula anterior algunes peculiaritats. Primerament, cal apuntar que es designaren com a assajos de control aquells realitzats sense tractament. D'altra banda, s'hi observa la inclusió d'assajos designats amb concentracions al 0%. Aquests, òbviament foren realitzats amb aigua pura, sense presència de retardant. En darrer lloc, s'hi observen en les primeres sèries certs assajos replicats. Això es feu durant els primers estadis de la realització de la fase experimental per tal de poder contrastar resultats i avaluar la robustesa del sistema i metodologia experimentals.

En la taula següent s'hi observen també aquests detalls. Es replicaren també alguns dels assajos per tal de garantir en tot moment la validesa del bloc experimental. El còmput d'assajos inclosos en els quatre blocs correspon a un total de 42 proves.

Taula 3.7. Bloc experimental tercer i quart

Bloc 3		Bloc 4	
Sèries	Assajos	Sèries	Assajos
$C_s = 250 \text{ g/m}^2$	Assaig control 30 ml/m ² al 0% (amb rèplica) 35 ml/m ² al 5% (amb rèplica)	$C_s = 250 \text{ g/m}^2$	Assaig control 30 ml/m ² al 0% 35 ml/m ² al 10%
$C_s = 500 \text{ g/m}^2$	Assaig control 35 ml/m ² al 5% 40 ml/m ² al 5%	$C_s = 500 \text{ g/m}^2$	Assaig control (amb rèplica) 45 ml/m ² al 5%

3.5.3. Metodologia experimental

La posada en pràctica d'una adequada metodologia experimental facilità l'execució de les proves i disminuï la probabilitat d'error en la realització de cadascuna de les tasques. La metodologia es dissenyà de manera que pogués ser duta a terme per dues persones, treballant paral·lelament en tasques on només es requerís la participació d'una d'elles, o conjunta en aquelles feines on fos imprescindible que ambdues en prenguessin part.

Tasca 1. Determinació de la humitat del combustible

Una de les especificacions que marcaren la diferenciació de cada sèrie experimental va ser la quantitat de combustible a disposar sobre la taula. Aquest paràmetre s'expressa genèricament com a massa de combustible sec per unitat de superfície, per tant, és imprescindible conèixer l'estat hídic del combustible per a corregir adequadament el valor de la càrrega especificada. Per aquest motiu la determinació de la humitat de la palla de blat va ser la primera tasca a realitzar. Es calculà amb la mitjana aritmètica dels valors de tres mostres mesurades amb l'analitzador electrònic.

Tasca 2. Posicionament i connexió dels equips d'adquisició de dades

Comprengué, primerament, la col·locació de la càmera de vídeo, la càmera de termografia infraroja i l'ordinador portàtil a les seves posicions establertes als mòduls de la instal·lació corresponents. Seguidament, la posada en funcionament i la connexió d'aquests equips, a més a més de la balança i el mòdul Fieldpoint, permanentment situats a la instal·lació experimental. I, en darrer lloc, la inicialització dels *softwares* d'adquisició de dades i la comprovació del bon estat de tots els sensors.

Tasca 3. Disposició del combustible

Els llits experimentals de combustible que es disposaren a la instal·lació de la UPC cobriren aproximadament 2 m² de la totalitat de la superfície de la taula. Les mesures exactes del llit foren 140 cm d'amplària per 147 cm de llargada. Per determinar la quantitat de combustible a repartir sobre aquesta superfície, calgué calcular la càrrega de material en base humida, mitjançant el valor d'humitat obtingut en la primera tasca, i, seguidament, la quantitat total de palla de blat considerant les dimensions del llit. Aquests càlculs s'efectuen amb les següents expressions:

$$C_h = C_s \left(1 + \frac{Hs}{100} \right) \quad (3.1)$$

$$C_t = C_h A \quad (3.2)$$

On:

C_h Càrrega superficial de combustible en base humida, g/m².

C_s Càrrega superficial de combustible en base seca, g/m².

Hs Humitat del combustible en base seca, %.

C_t Massa total de combustible, g.

A Àrea del llit de combustible = 2,058 m²

Seguidament, es pesà la massa de combustible total calculada i es repartí homogèniament sobre la superfície d'assaig. Un cop disposada, es confirmà que la lectura de la balança posicionada sota la superfície flotant d'1m² mesurava exactament el valor calculat de C_h . D'aquesta manera, es comprovà que la col·locació del combustible s'havia dut a terme correctament i que el sistema de pesatge no donava cap error.

Tasca 4. Muntatge del sistema de mesura de la velocitat de propagació

Aquesta tasca consistí en la col·locació dels fils de cotó al llarg de la superfície d'assaig, subjectats per les barres cilíndriques a banda i banda de la taula (figura 3.20 a) i b)). Tot i que sembla una operació molt senzilla, calia fer-la amb especial atenció, posicionant els fils a l'altura adequada, per tal que no exercissin pressió sobre el combustible. Altrament, s'hagués pogut falsejar la lectura del sistema de pesatge.



Figura 3.20. a) Llit de combustible i disposició dels fils de cotó. b) Detall dels fils.

Tasca 5. Aplicació del tractament al llit de combustible

El disseny d'aquesta etapa va ser molt curós, degut a la seva especial rellevància dins un programa experimental per a l'estudi de retardants. Per condicionants econòmics i pràctics, es decidí aplicar el tractament sobre el combustible manualment. Això implicà la necessitat de dur a terme, en la mesura en què fos possible, un bon control d'aquesta tasca.

Un cop preparada la concentració especificada en la prova, la dosificació de retardant es distribuí sobre tot el llit de combustible mitjançant un polvoritzador manual aforat, de 500 ml de capacitat (figura 3.21 a) i b)). S'aplicà homogèniament, seguint un patró de repartiment de les descàrregues dissenyat per a cobrir cada sector de la superfície de manera uniforme.

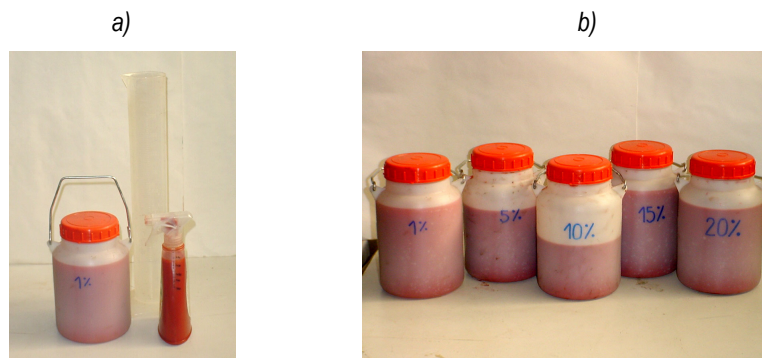


Figura 3.21. a) Polvoritzador manual. b) Dissolucions de producte retardant.

Aquesta operació es controla mitjançant l'observació de l'increment de pes detectat per la balança i de les imatges infraroges capturades per la càmera termogràfica (figura 3.22).

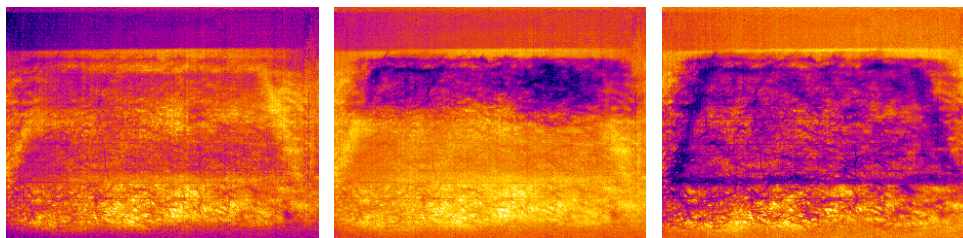


Figura 3.22. Seqüència d'imatges termogràfiques del procés d'aplicació de la dosi de retardant.

Tasca 6. Ajust de la taula de combustió

Després de preparar el llit de combustible, la darrera tasca a realitzar prèviament a l'inici de l'experiment fou, en primer lloc, regular l'altura dels panells de xapa paral·lels a l'avanç del front i, a continuació, assegurar el tancament de les altres cares de la taula, és a dir, dels vidres frontals corredissos i dels panells situats al costat oposat.

Tasca 7. Execució de la prova

Amb tota la instal·lació a punt, s'inicià simultàniament l'enregistrament de totes les dades instantànees abans de procedir a l'ignició. Aquesta es dugué a terme encenent un fil de llana xopat d'una mescla de gasolina i gasoil, col·locat a l'ample de la taula, en un dels seus extrems. Amb aquest tipus de metxa s'assegurà la

formació d'un front rectilini, ja des dels primers segons de la prova. Durant el transcurs del front, s'anotaren els instants de temps en què s'observà el trencament del fil i es tingué cura que tots els equips funcionessin correctament.

Tasca 8. Desmuntatge dels equips i neteja de la instal·lació

Un cop extingit el front, es reinicialitzaren els equips i es preparà un nou llit de combustible si procedia una prova posterior. Altrament, es desmuntaren els equips de mesura i es dugueren a terme tasques de neteja i condicionament per la següent sessió experimental.

3.6. Disseny experimental i metodologia a ADAI

Amb l'experiència adquirida en l'execució del treball al CERTEC i tenint en compte les característiques i la disponibilitat de material de la instal·lació de Coimbra, es dissenyà un nou programa experimental. En aquest cas s'utilitzà com a combustibles el blat dur i el pi pinyoner i, com a retardant, el Fire Trol 934. Els assajos dissenyats s'agruparen dintre de dues tipologies. Els assajos corresponents al primer tipus es dugueren a terme seguint bàsicament la metodologia establerta a Barcelona. Amb tot, alguna de les seves tasques no estigué exempta de modificacions, ja sigui per requeriments de la pròpia instal·lació o per la decisió d'incorporar petites innovacions al mètode amb la finalitat de diversificar lleugerament les proves. La segona tipologia d'experiments es realitzà amb una nova metodologia, pel que fa a una de les tasques essencials en aquest treball. L'aplicació del producte retardant s'executà amb una tècnica conceptualment diferent a la desenvolupada fins aleshores. Així, es pogué comparar ambdós procediments, estudiar-ne la seva interdependència en l'anàlisi de resultats i, en darrer lloc, determinar-ne l'idoneïtat per a l'estudi de l'eficàcia dels productes retardants.

3.6.1. Experiments tipus 1

La metodologia seguida en els experiments tipus 1 estigué composta per cadascuna de les tasques descrites anteriorment en l'apartat 3.5.3, adaptades òbviament als equipaments de què disposà la instal·lació i a la mecànica experimental del grup de recerca ADAI en aquest tipus d'assajos. Així, les principals diferències en aquest sentit van ser la disposició d'un llit de combustible d'1 m per 1 m i l'aplicació de retardant únicament en un sector de 60 cm de llarg d'aquesta superfície –es deixà progressar el front en

els primers 40 cm del seu curs sobre combustible no tractat-. Les figures 3.23 i 3.24 il·lustren dos detalls d'aquesta sèrie d'experiments.



Figura 3.23. Bidó de retardant, polvoritzador i provetes.



Figura 3.24. Prova en curs.

3.6.2. Experiments tipus 2

Tal i com ja s'ha mencionat, la segona tipologia d'experiments diferí de la primera pel que fa a la tasca dedicada al tractament retardant aplicat sobre el combustible. De fet, s'utilitzà una de les metodologies més emprades arreu per a l'estudi de l'eficàcia dels retardants a escala de laboratori. Aquesta tècnica consisteix

en impregnar el llit de combustible amb dosis aproximades a les que s'empren en incendis reals i deixar-lo assecat, ja sigui de manera natural o forçada, per tal que perdi l'excés d'aigua que òbviament impediria la progressió d'un front de foc. Menyspreant l'error evident del canvi d'escala, aquesta tècnica pretén simular l'efecte que es produeix en un gran incendi, en què la calor emesa pel front evapora l'aigua procedent de la mescla retardant abans que aquest arribi a la franja de combustible tractada. No obstant això, és un procediment lent, tant en el cas en què l'assecament sigui natural com si es vol accelerar el procés mitjançant alguna font externa de calor.

Per a distribuir la mescla retardant sobre el llit combustible, s'emprà un aspessor portàtil de 3 l de capacitat (figura 3.25) per a aplicar dosificacions de l'ordre de 250 i 500 ml/m². Seguidament, s'assecà el combustible mitjançant quatre focus halògens (figura 3.26). S'assoliren diferents graus d'assecatge en funció del temps d'exposició del combustible a la calor generada per les làmpades. Així, l'assecatge complet es realitzà deixant enceses les làmpades durant 3 hores aproximadament, en canvi, una duració menor del temps d'exposició, significà una eliminació no total de l'aigua de dilució, amb la qual cosa s'assoliren graus d'assecament únicament parcials. El control d'aquesta fase i, consegüentment el rendiment de l'operació, es controlà, d'una banda, observant la lectura del sistema de pesatge durant el temps en què restaren enceses les fonts de calor i, de l'altra, prenent mesures de la humitat del combustible abans i després d'aquest període. La metodologia experimental, un cop finalitzada aquesta tasca, seguí el seu curs idèntic a l'anterior tipologia d'assajos realitzats a ADAI.



Figura 3.25. Aspessor.



Figura 3.26. Assecatge amb halògens.

3.6.3. Blocs experimentals

Atenent aquests dos tipus d'assajos, es configuraren dos blocs més d'experiments (bloc 5 i bloc 6). El primer d'ells es duqué a terme amb blat dur i tots els assajos realitzats foren de tipus 1 menys un d'ells. Pel que fa al bloc sisè, es realitzà amb pi pinyoner (figures 3.27 i 3.28) i estigué compost per assajos tipus 2, tot i que se n'incloué un de tipus 1. Es dissenyà d'aquesta manera per analitzar la convivència de les dues metodologies durant el procés de tractament de dades. El resum d'aquests dos blocs, amb les seves especificacions pel que fa a càrrega, concentració i quantitat de retardant aplicada en mostren en la taula 3.8. Així mateix, també s'hi inclou una anotació referida al procés d'assecamment (total o parcial) pels assajos tipus 2.

Taula 3.8. Assajos de la sèrie primera

Bloc 5		Bloc 6	
Sèries	Assajos	Sèries	Assajos
$C_s = 400 \text{ g/m}^2$	Assaig control (amb rèplica) 35 ml/m ² al 20% (tipus 1) 70 ml/m ² al 20% (tipus 1)	$C_s = 800 \text{ g/m}^2$	Assaig control (amb rèplica) 30 ml/m ² al 5% (tipus 1) 250 ml/m ² al 5% (assecat parcial) 575 ml/m ² al 13% (assecat parcial)
$C_s = 600 \text{ g/m}^2$	Assaig control 35 ml/m ² al 5% (tipus 1) 500 ml/m ² al 10% (assecat parcial) 40 ml/m ² al 20% (tipus 1) 75 ml/m ² al 20% (tipus 1)		500 ml/m ² al 0,5% (assecat complet) 510 ml/m ² al 1,5% (assecat parcial)* 510 ml/m ² al 2% (assecat complet)* 510 ml/m ² al 2,5% (assecat complet)* 515 ml/m ² al 3% (assecat parcial)*

*Dades extretes de Viegas (2003)

De l'observació d'aquesta taula, se'n desprèn que en els assajos tipus 1, realitzats seguint la mateixa pauta que a Barcelona, s'aplicà un ventall una mica més ampli que en els blocs anteriors pel que fa al rang de dosificacions. S'arribaren a doblar les quantitats, assolint valors fins a 75 ml/m². S'evidencia també la gran diferència d'aquest paràmetre pels assajos tipus 2, de l'ordre de 500 ml/m² pràcticament en la seva totalitat.

Finalment cal anotar que, per complementar el darrer bloc experimental, s'hi inclogueren les dades disponibles de quatre assajos efectuats amb anterioritat a les instal·lacions d'ADAI, seguint la mateixa metodologia (Viegas, 2003).



Figura 3.27. Prova en curs.



Figura 3.28. Detall del front.

4. DESCRIPCIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS EN L'EXPERIMENTACIÓ AL LABORATORI

En aquest capítol es descriuen amb detall els estudis realitzats sobre l'evolució de la velocitat de combustió, la velocitat de propagació, la temperatura i la potència calorífica radiant en els assajos de laboratori.

En cadascun d'aquests estudis es detalla primerament la metodologia de càlcul del paràmetre corresponent. Seguidament, s'analitza el seu comportament pels assajos control, observant-ne les diferències existents entre les diverses espècies combustibles i les interrelacions amb les característiques del material i amb la disposició dels llits. Finalment s'estudia la variació d'aquests descriptors del comportament de foc amb els diferents tractaments retardants aplicats i se n'observen les similituds i dependències entre ells.

En primer lloc, però, es recull un petit estudi efectuat per tal d'avaluar la influència dels paràmetres ambientals en el comportament dels fronts de laboratori, incidint especialment en la característica del combustible més sensible en aquest sentit, com és el seu contingut d'aigua.

4.1. Efectes dels paràmetres ambientals en la humitat del combustible

El control sobre el contingut d'aigua del combustible és cabdal en l'experimentació en incendis, tal i com ja s'ha apuntat en capítols anteriors. A més, cal donar una èmfasi especial en aquest sentit quan s'estudia l'eficàcia de productes extintors, donat que la majoria d'aquests tenen l'aigua com a dissolvent. És per això que fou necessari aprofundir en el coneixement de l'estat hídic dels combustibles emprats en el laboratori i en la seva dinàmica en funció de les condicions ambientals enregistrades (humitat relativa i temperatura), per tal d'avaluar la preponderància d'aquest paràmetre en l'anàlisi del comportament del foc. No es pretengué analitzar de forma genèrica el comportament de la humitat del combustible enfront les condicions ambientals –estudiat específicament en diversos treballs (Anderson *et al.*, 1978; Anderson, 1990)– sinó analitzar aquest comportament en les condicions en les quals es realitzaren les proves experimentals, ja que era aquest el que podia influir posteriorment en els resultats.

Aquest estudi es dugué a terme únicament amb les proves realitzades a Barcelona, degut a que fou aquí on es tingué un registre més complet de les dades ambientals. A més, per tal de poder arribar a conclusions més fonamentades, s'empraren les dades dels experiments previs de posada a punt de la instal·lació, dels de caracterització del combustible i dels d'eficàcia dels retardants pròpiament. Això permeté realitzar una millor anàlisi comparativa de condicions ambientals i espècies.

4.1.1. Humitat relativa i humitat del combustible

La humitat relativa de l'aire (HR) condiciona el contingut d'humitat (H_s) dels combustibles forestals fins, en les disposicions naturals d'aquests. Òbviament, aquest fet també es pot observar en les disposicions artificials, ja siguin d'emmagatzematge o de llits de crema típics de laboratori. En la figura 4.1 es verifica aquesta afirmació. S'hi representen un seguit de valors del contingut hídic de diverses espècies¹ i les humitats relatives ambientals corresponents als instants de mesura d'aquests. Aquestes dades foren recopilades en les diverses proves realitzades durant diferents períodes de temps. La correspondència d'ambdós paràmetres queda palesa en la semblant evolució de les seves corbes.

¹ Els valors d'humitat foren calculats a partir de mostres de combustible extretes de la superfície de les piles d'emmagatzematge disposades al laboratori. Aquest aclariment és pertinent, per tal de considerar de manera adequada les propietats físiques de les partícules que influeixen en la dinàmica d'adsorció-desorció d'aigua.

Amb tot, s'hi observa una certa disparitat, degut, entre d'altres coses, al fet que la corba d'humitat del combustible recull valors de diferents espècies. En les condicions de les mostres de combustible analitzades, el paràmetre de la difusivitat, responsable de l'intercanvi d'humitat amb l'ambient, ve controlat essencialment per la relació superfície-volum (σ) de les partícules combustibles (Nelson, 2001). Així, és evident que certes diferències en el valor d'aquest paràmetre (σ) en les partícules representatives dels combustibles fins, impliquen dinàmiques de pèrdua o guany de contingut d'aigua enfront els canvis d'humitat relativa, també diferents.

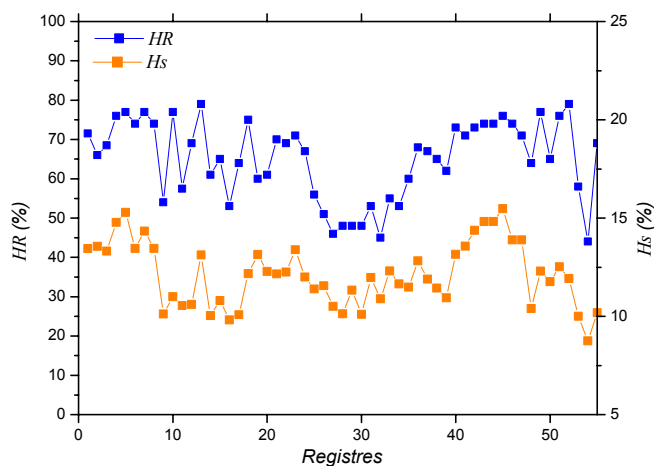


Figura 4.1. Evolució conjunta de la humitat relativa i la humitat del combustible per cinquanta-cinc registres de laboratori.

En la figura precedent es representen conjuntament humitats de partícules de pi blanc, ordi i blat, totes elles caracteritzades físicament en l'Annex III. A més, d'aquesta darrera espècie se'n recolliren mostres de dues remeses diferents, una primera de baixa qualitat, amb tiges velles i bastant humides, i una segona de més bona qualitat, amb tiges noves i més seques.

Tot seguit s'analitzen amb detall les diferències existents en la dinàmica de la humitat enfront dels canvis ambientals, per a cadascuna d'aquestes espècies.

Comportament per espècies

Quan un material s'exposa a l'aire a una temperatura i humitat determinades, aquest guanyarà o perdrà aigua fins que s'estableixin unes condicions d'equilibri. La humitat corresponent a aquest equilibri ($H_{s_{eq}}$),

varia àmpliament amb la humitat relativa. La variació $H_{s_{eq}}$ respecte HR es pot representar com una funció polinòmica de tercer ordre. Acotant el domini d'aquest polinomi dins l'interval $[0,100]$ –essent aquests els valors que pot prendre la humitat relativa–, els valors de la funció queden compresos entre 0 i el punt de saturació de la fibra (P_s). Per als combustibles forestals aquest punt és de l'ordre del 30% –tot i que fluctua en funció de la temperatura i de les propietats físiques de l'espècie– i coincideix amb la humitat d'extinció.

En la figura 4.2.a) es representa la funció $H_s(HR)$ ajustada per a tots els valors experimentals. El punt de saturació de la fibra queda fixat, independentment de les espècies, a 29% (valor que correspon a la fusta, a 293 K), degut a la manca de dades bibliogràfiques en aquest sentit.

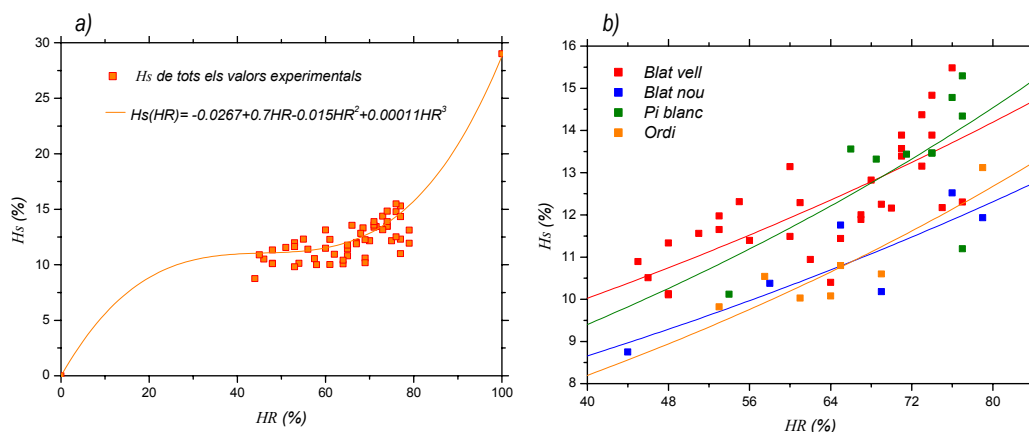


Figura 4.2. a) Evolució conjunta de la humitat del combustible amb la humitat relativa. b) Representació per espècies.

La dispersió que s'observa en el núvol central de punts és deguda a diversos factors. El primer d'ells, tal i com ja s'ha apuntat, correspon a la convivència de diferents espècies. En la figura 4.2.b) s'observa una ampliació del rang experimental de la gràfica anterior. S'hi especifiquen les espècies, tant pel que fa als valors puntuals com a les corbes que s'hi ajusten. Certament, es poden diferenciar els quatre combustibles representats. Amb tot, aquestes corbes tenen també algunes similituds, ja que s'observa un clar paral·lelisme entre les dues classes de blat per una banda, i l'ordi i el pi blanc per una altra. Això significa un comportament similar de cadascuna d'aquestes parelles d'espècies. Aquest fet queda contrastat pels valors de σ_c corresponents a les seccions característiques dels quatre combustibles emprats. Òbviament la relació superfície-volum és idèntica per a les dues classes de blat representades ($\sigma_c = 1270 \text{ m}^{-1}$), fet que explica el

primer dels paral·lelismes observats. Per altra banda, l'ordre de magnitud proper de σ_c del pi blanc i l'ordi, – 10351 m⁻¹ i 6900 m⁻¹ respectivament– justifica també la segona relació de similitud.

Finalment, de l'observació de la inclinació dels dos parells de corbes, se'n desprèn que les humitats del pi blanc i l'ordi tenen una resposta més eficaç davant els canvis d'humitat relativa que no pas el blat. Els valors de σ_c també constaten aquest fet, ja que les σ_c del pi blanc i de l'ordi són sensiblement superiors a les del blat. Això explica el major intercanvi de massa d'aigua amb l'ambient de les dues primeres espècies, enfront la darrera.

Evolució temporal diària de HR i H_s

Un segon factor a tenir en compte en l'anàlisi de la dispersió de la figura 4.2 és l'estat transitori en què es trobaren els combustibles. La funció exposada $H_s(HR)$ existeix certament en condicions d'equilibri. El fet que les condicions ambientals referides a la humitat relativa del laboratori fluctuessin constantment, féu que el combustible estigués en un estat no estacionari permanent. Això significa que els punts graficats no representen forçosament situacions d'equilibri. Aquesta afirmació també es pot intuir de l'observació de la figura 4.2.b), ja que explicaria la separació de les corbes corresponents a les dues classes de blat. D'aquí se'n pot concloure que la classe més humida (representada en la corba amb el nom de "blat vell") no estigué sotmesa unes condicions ambientals prou estacionàries com per a què pogués desprendre's del seu contingut d'aigua lliure.

Per tal d'aprofundir en aquest segon aspecte, es presenta tot seguit una breu anàlisi de l'evolució temporal al llarg d'una jornada d'experimentació d' $H_s(HR)$. S'hi inclouen dues sèries experimentals, una de pi blanc d'aproximadament 9 hores de duració i l'altra de blat vell, de 10 hores i mitja (Figura 4.3.a) i 4.3.b)).

En cadascuna de les gràfiques de la figura, s'hi representen 6 parelles de valors experimentals d'humitat relativa i del combustible. Observant-ne la seva tendència temporal, s'hi poden distingir diferents intervals o cicles d'increment o decrement d'humitat relativa, que es corresponen, amb un cert desfasament, a les seqüències enregistrades d'humitat del combustible. Aquests intervals s'observen en la figura, numerats i separats per línies verticals discontinües.

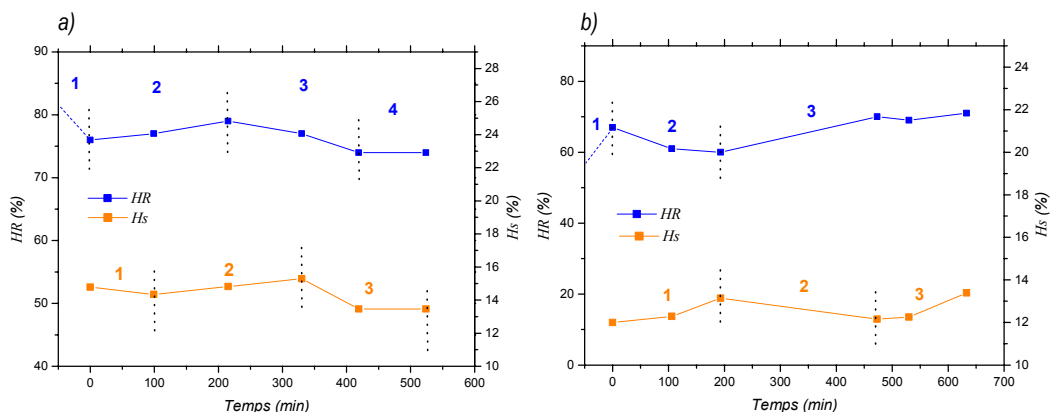


Figura 4.3. Evolució temporal de la humitat relativa i la humitat del combustible per a) pi blanc, b) blat vell.

Evolució pel pi blanc

De la figura 4.2.a) se'n poden analitzar amb més profunditat els dos cicles centrals, ja que el primer és incert (graficat amb una línia de punts) i el darrer és incomplet. Així, l'interval (2) representa un increment de la humitat relativa ($\Delta HR = 0,84\%/h$) traduït al cap de 99 minuts en un increment de la humitat del combustible ($\Delta Hs = 0,24\%/h$). La resposta del combustible en aquest interval enfront dels canvis d'humitat relativa es pot calcular amb la relació $\Delta Hs/\Delta HR$, que en aquest exemple pren per valor 0,29. Per la seva banda, l'interval (3) representa un descens d'humitat relativa ($\Delta HR = -1,47\%/h$) amb el seu efecte idèntic sobre les agulles de pi blanc ($\Delta Hs = -0,56\%/h$). En aquest cas s'observa un retard de 115 minuts i la resposta del combustible és de $\Delta Hs/\Delta HR = 0,38$. De l'observació d'aquestes dades se'n evidencia doncs l'estat transitori permanent en el que es troba el combustible. A més, també s'observa una lleugera diferència –d'1,4 vegades– en la facilitat de les agulles de pi blanc a perdre humitat enfront a la de recuperació d'aigua, la qual cosa posa de manifest la presència d'una certa histèresi en els mecanismes d'adsorció-desorció d'aigua (Nelson, 2001). Aquesta relació entre els dos mecanismes s'ajusta molt bé a l'estudi recopilat a Anderson (1990), dut a terme amb agulles de *Pinus ponderosa*.

Evolució del blat

De la mateixa manera, també són analitzables els cicles 2 i 3, descartant el primer per idèntic motiu que en el cas anterior. L'interval (2) és ara un cicle de descens ($\Delta HR = -2,17\%/h$, $\Delta Hs = -0,21\%/h$) que presenta un desfament de 193 minuts i es manifesta amb un factor de resposta de $\Delta Hs/\Delta HR = 0,097$. Pel que fa al

cicle (3), aquest és d'ascens ($\Delta HR = 1,15\%/h$, $\Delta H_s = 0,46\%/h$), desfasat 280 minuts i amb una ràtio $\Delta H_s/\Delta HR = 0,31$. Aquí, també es posa de manifest l'estat transitori del material, però en aquest cas és més difícil extreure'n comparatives pel que fa als mecanismes d'adsorció-desorció, ja que el cicle (3) no es pot considerar en cap cas finalitzat, si més no pel que fa a la resposta del combustible. Això explica el comportament aparentment invers de la palla de blat enfront el pi, en referència a la facilitat o dificultat de pèrdua o captació d'aigua.

En ambdós casos doncs, queda palès l'estat no estacionari pel que fa a les condicions d'humitat, tant de l'aire com del combustible, durant els assajos al laboratori. A més, s'observa un temps de resposta inferior pel pi blanc, fet que respon a les diferències de σ_c de les dues espècies. Així, a major relació superfície-volum, l'intercanvi d'aigua del material en el medi es pot dur a terme amb més rapidesa.

Efecte de la temperatura

En darrer lloc, el tercer factor a considerar pel que fa a la corba $H_s(HR)$ de la mostra d'estudi és la temperatura, ja que $H_{s_{eq}}$ depèn d'aquesta de manera inversa. Així, per una mateixa humitat relativa, les humitats d'equilibri a assolir disminueixen a mesura que augmenta la temperatura. Kelsey (1957) observa en agulles de *Araucaria hunsteinii* –una varietat australiana de pi– una disminució d'un punt en H_s quan, per a una HR del 60%, la temperatura passa de a 10°C 25°C. Amb aquesta dada, necessària per a copsar la magnitud del fenomen, es pot concloure que la temperatura no afectà en absolut en aquest sentit en les proves de laboratori. Per bé que existí una fluctuació d'aquest paràmetre, en cap cas fou tan àmplia com per originar variacions en la humitat d'equilibri.

Amb tot això, en aquest apartat 4.1, ha estat analitzada la resposta del combustible pel que fa a la seva humitat enfront els canvis de les condicions ambientals al laboratori d'humitat relativa i temperatura. S'han pogut observar diferències entre les diverses espècies estudiades, regides principalment per la relació superfície-volum de la secció característica de cada partícula representativa. A banda, ha quedat palesa la situació d'estat transitori permanent del contingut d'aigua del material, degut a la fluctuació de la humitat relativa en les condicions al laboratori. Aquest fet ha estat estudiat per dues de les espècies emprades i s'hi ha pogut observar els seus diferents comportaments. A més, també s'han evidenciat els mecanismes físics que governen la transferència de massa d'aigua entre el combustible i l'ambient i llurs particularitats.

Finalment, ha estat inclòs un breu apunt sobre l'efecte de la temperatura en aquests mecanismes, exemplificant-lo qualitativament amb dades presents en la bibliografia.

De tot això se'n desprèn que la humitat del combustible és un paràmetre essencial a tenir en compte en l'estudi del comportament del foc, degut a la seva variabilitat en les espècies i en les condicions ambientals. Per bé que el rang experimental d'aquests paràmetres queda inclòs dins els valors típics d'assajos en laboratoris d'incendis a petita escala, cal fer especial atenció en el seu efecte sobre el foc en aquells casos més extrems, és a dir, en els que HR i H_s estan més allunyats dels valors mitjans. Altrament, l'anàlisi de les variables del comportament dels incendis, així com pròpiament l'estudi de l'eficàcia dels productes retardants podrien contenir seriosos errors.

4.2. Estudi de la velocitat de combustió

La velocitat a la que té lloc la reacció de combustió en un incendi és un clar indicador de la potència calorífica que se'n desprèn. Es determina calculant la velocitat a la que la massa combustible sòlida canvia a fase gasosa i, d'una manera senzilla al laboratori, s'obté enregistrant la variació del pes de combustible que conforma el llit experimental amb el temps.

L'estudi d'aquesta variable obtinguda en els assajos a laboratori es dugué a terme en dues fases clarament diferenciades. En primer lloc, s'analitzà la velocitat de combustió dels assajos control (sense tractament) per tal de conèixer el seu comportament i la seva dependència amb les diverses característiques del combustible. Seguidament, es determinà l'efecte del tractament amb retardant sobre la velocitat de combustió. Se n'observaren les diferències entre les tipologies de producte i combustible i es quantificà numèricament l'efecte de reducció detectat. Tot seguit se'n resumeixen els aspectes més importants, incidint prèviament, en la metodologia de càlcul emprada per a l'obtenció numèrica d'aquest paràmetre.

4.2.1. Metodologia de càlcul

De l'equip de pesatge implementat al laboratori, explicat amb tot detall al capítol 3, se n'obtingué la variació de la massa de combustible en el temps, representada gràficament tal i com s'observa en la figura 4.4 a).

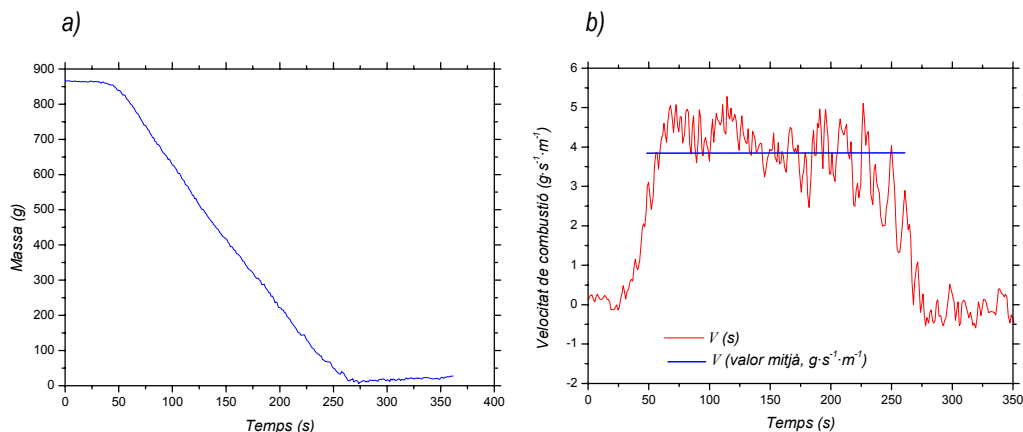


Figura 4.4. a) Evolució temporal de la pèrdua de massa combustible sobre la superfície de pesatge. b) Evolució temporal de la velocitat de combustió i representació del valor mitjà.

En aquesta corba, s'hi representa la pèrdua de pes que experimentà segon a segon el combustible disposat sobre la superfície de pesatge, en un assaig tipus. Per tal d'avaluar-ne la velocitat de combustió, en primer lloc es transformà aquesta corba en una de suavitzada a fi i a efecte d'eliminar-ne el soroll. S'obtingué a partir del càlcul del valor mitjà de la massa cada 5 segons. Seguidament es derivà aquesta nova funció (figura 4.4. b)) i es calculà el valor mitjà d'aquesta en l'interval comprès entre els dos instants de temps on s'observà un canvi de pendent substancial (corresponents a l'entrada i la sortida del front d'incendi en la superfície de pesatge). Aquesta mitjana correspongué directament a la velocitat de combustió per metre lineal, expressada en $g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ (V_0), per als assajos de control realitzats al laboratori de Barcelona. Pel que fa als assajos amb retardant duts a terme en aquesta instal·lació, el valor obtingut es minorà amb un factor reductor, corresponent al percentatge de massa inicial compostat únicament per combustible, és a dir restant-li la part proporcional de pes aportat pel tractament. Per bé que aquest factor fou de l'ordre de 0,95 en tots els assajos donada la poca quantitat de tractament utilitzada (la qual cosa indica que, de la massa total disposada sobre la superfície de pesatge, un 95% era combustible i un 5% era tractament retardant), fou aplicat per tal de poder dur a terme una comparació rigorosa entre V_0 dels assajos control i V dels assajos amb retardant.

Pel que fa a les proves de Coimbra, es dugué a terme el mateix procediment, tanmateix s'hagué d'adaptar a les lleugeres diferències entre ambdues instal·lacions i metodologies. D'una banda, el valor mitjà calculat a

partir de la funció derivada es corregí per tal d'expressar-lo correctament en les unitats mencionades. Si bé en la instal·lació de Barcelona la superfície de pesatge suportava 1 metre lineal de front, no fou així en la de Coimbra (la dimensió de la superfície en aquest sentit fou de 0,75 m), de tal manera que es majorà la velocitat obtinguda en un 33%. Per altra part, el factor reductor en els assajos amb tractament fou sensiblement inferior a l'aplicat en els assajos realitzats a Barcelona. Això respon al fet que les dosificacions aplicades a Coimbra foren genèricament més elevades.

4.2.2. Anàlisi de la velocitat de combustió dels assajos control

Un cop calculada la velocitat de combustió dels assajos sense retardants, es procedí a fer un estudi acurat de la influència dels diferents paràmetres en aquesta. Així, s'estudià en primer lloc l'efecte de la humitat del combustible, seguidament l'efecte de la càrrega superficial, la densitat aparent i l'altura del llit i, per concloure, l'efecte combinat de totes les característiques físiques analitzades.

Efecte de la humitat del combustible

En el primer apartat del present capítol ha quedat palesa la importància del control de la humitat del combustible en els assajos de laboratori, la seva interdependència amb els paràmetres ambientals i les característiques físiques de les partícules, i la necessitat d'avaluar el seu possible efecte sobre les variables que expliquen el comportament del foc.

És ben sabut l'efecte genèric de disminució de la intensitat d'un foc degut a la humitat del combustible. Rothermel (1972) plantejà gràficament la disminució de la potència calorífica amb l'augment del contingut d'aigua del combustible, en una sèrie d'assajos de laboratori realitzats amb agulles de *Pinus ponderosa*, recopilats a Anderson (1969). Aquesta relació s'il·lustra en la gràfica de la figura 4.5, de la següent manera; en l'eix d'abscisses s'hi representa la humitat del combustible (H_s), expressada en relació amb el punt de saturació de la fibra (P_s) i en el d'ordenades, la relació entre la potència calorífica i el seu valor màxim, expressats en termes d'intensitat lineal del front. S'hi observen tres estadis clarament diferenciats; el primer d'ells correspon a una disminució sobtada de la potència calorífica d'un incendi quan la humitat del combustible s'incrementa dins l'interval $[0-0,3]$, és a dir, per humitats inferiors al 30% de P_s . El segon d'ells, observat en l'interval $[0,3-0,7]$, correspon a un efecte pràcticament nul de l'increment de la humitat del combustible sobre la reducció de la intensitat del foc i en darrer lloc, un tercer estadi novament il·lustrador

d'un efecte sobtat en la disminució de la potència calorífica amb l'increment d' H_s , per a humitats superiors al 70% de P_s .

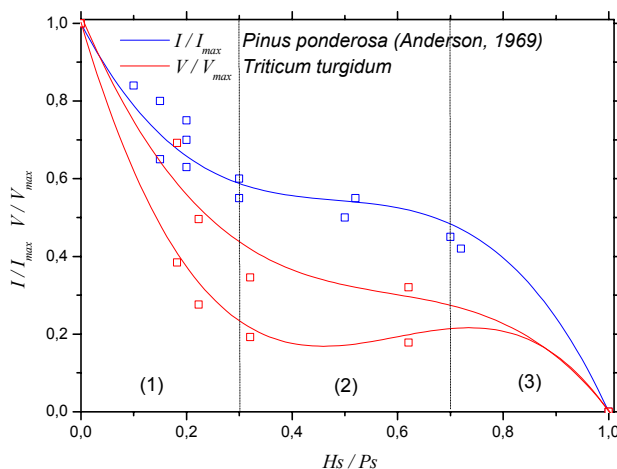


Figura 4.5. Efecte de l'increment de la humitat del combustible en la reducció de la potència calorífica i la velocitat de combustió per diversos assajos de laboratori.

D'aquest anàlisi, se'n desprèn que el rang més favorable dels descrits per Rothermel (1972) per a estudiar experimentalment al laboratori l'efecte dels productes retardants és, sense cap mena de dubte, el segon. Atesa aquesta observació en agulles de *Pinus ponderosa*, lògicament extrapolable per a les tipologies de pi utilitzades en aquest treball, es volgué reproduir aquesta tendència per al combustible corresponent a la palla de blat. En la part inferior de la figura 4.5 s'hi representa la variació de la velocitat de combustió –com a un dels paràmetres representatius del comportament del foc a l'igual que la intensitat lineal o la velocitat de propagació– amb H_s/P_s , per al blat dur utilitzat a Coimbra, per a un recull d'assajos duts a terme per Viegas (2000). Aquesta tendència es troba delimitada entre dues gràfiques, degut a la incertesa inherent a la velocitat de combustió per a una humitat del combustible nul·la. Novament, s'hi poden distingir de manera idèntica aquestes tres fases detectades a les dades d'Anderson (1969).

És així com calgué garantir un control precís d' H_s dins el rang seleccionat, per a totes les tipologies de combustible emprades als laboratoris de Barcelona i Coimbra. D'aquesta manera es podia assegurar que H_s no emmascararia l'efecte propi del tractament retardant. L'interval segon conté els valors d'humitat

compresos entre el 10% ($H_s/P_s = 0,3$) i el 21% ($H_s/P_s = 0,7$) i tots els assajos realitzats en aquesta tesi tingueren les humitats del combustible situades íntegrament i dins aquest rang.

Efecte de la càrrega, la densitat aparent i l'altura del llit de combustible

Les primeres anàlisis de la velocitat de combustió que es plantejaren implicaren l'estudi de la seva variació amb els paràmetres característics bàsics dels llits de combustible, càrrega superficial (C_s), densitat aparent (ρ_{aps}) i altura (h). Els resultats d'aquesta anàlisi es representen gràficament en les figures 4.6 a) i b) i 4.7 i tot seguit se'n comenten els aspectes més destacats.

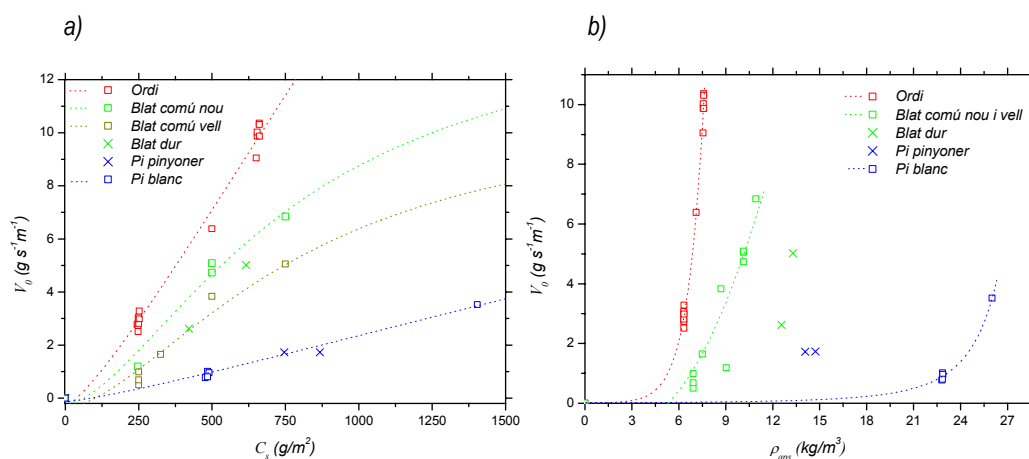


Figura 4.6. Efecte de l'increment de a) la càrrega de combustible i b) la densitat aparent del llit, en la velocitat de combustió.

En la figura 4.6 a) es representen per espècies els punts $V_0(C_s)$ i les línies de tendència que descriu a aquestes valors per a l'ordi, el blat comú vell i nou i el pi blanc. No s'inclouen les evolucions pel que fa al blat dur i el pi pinyoner, degut al poc nombre d'assajos control realitzats amb aquestes dues espècies, tanmateix, a tall il·lustratiu, s'hi incorporen els punts obtinguts.

S'hi pot observar una tendència molt clara i lògica de l'increment d' V_0 amb C_s per a tots els combustibles representats. L'augment de la càrrega superficial implica forçosament la presència de més combustible disponible per metre lineal i, mentre aquest fet no afecti a la qualitat de la combustió, aquesta es duu a terme a més velocitat quant major és la càrrega. Amb tot, queden reflectides perfectament les diferències entre els

combustibles. Així, per a càrregues idèntiques, l'ordi assoleix majors velocitats de combustió que el blat comú nou i vell i aquests, per la seva banda, també tenen valors de V_c més elevats que els llits conformats amb agulles de pi. Això es deu a una combinació complexa dels efectes que produeixen les diverses propietats dels llits combustibles en la reacció de combustió. Un d'aquests efectes, probablement dels més importants i intuïtius, és el que correspon a la densitat aparent del llit. Per bé que aquesta varia inevitablement amb la càrrega, es pot afirmar, tal i com ja s'ha apuntat a l'annex III de caracterització del combustible, que cada espècie té un grau específic de compacitat natural degut a les pròpies característiques físiques de les partícules, fet que fa que els llits es conformin amb una densitat aparent més o menys elevada segons el combustible. Per tant, analitzant els valors numèrics de ρ_{aps} per a les espècies representades (vegeu figura 4.6 b)), s'observa que l'ordi és el que té densitats aparents més baixes, entre 6 i 7 kg/m³, seguit de les diferents tipologies de blat (de densitats entre 7 i 13 kg/m³) i en darrer lloc es troben els llits de pi, amb densitats d'entre 15 i 27 kg/m³. Per tant, es pot afirmar que, a aquesta escala experimental, densitats aparents dels llits de combustible baixes faciliten una combustió més ràpida.

Seguint en l'anàlisi de la figura 4.6 a), es pot fer encara un apunt més, sobre la manera en què la funció $V_o(C_s)$ evoluciona per espècies. En aquest sentit s'observa que el creixement per a l'ordi i el pi blanc és pràcticament lineal, mentre que no és així per a les tipologies de blat representades. Això porta a introduir el concepte de grau de compacitat òptima, particular per espècies, com aquell que facilita una major virulència del front i, conseqüentment, una velocitat de combustió més gran. En el cas dels experiments representats, el blat estaria més proper a aquest òptim que no pas l'ordi i el pi, degut a la incipient curvatura de la seva línia de tendència. Aquesta és una prova prou definitiva que porta a afirmar que la velocitat de combustió, per bé que es pugui analitzar qualitativament amb les variables representades, s'explica globalment amb la interacció de molts altres paràmetres, a banda d'aquests.

Un altre exemple il·lustratiu d'aquesta afirmació, es pot deduir de l'observació de la figura 4.7. En aquesta s'hi representa la variació de V_o amb l'altura del llit de combustible per als assajos control. També s'hi evidencia clarament la dependència d'aquests paràmetres i, en aquest cas, la distinció entre espècies és pràcticament impossible. Tant és així, que en aquest gràfic s'hi inclou una correlació $V_o(h)$ –colorejada amb una línia de punts grisa discontinua– calculada considerant conjuntament tots els punts representats. D'aquesta manera, s'hi poden observar punts molt propers, que representen valors iguals de velocitat i altura, i que corresponen a espècies diferents i càrregues igualment diverses. Això porta a deduir que, dels

assajos realitzats, es reproduïren velocitats de combustió per a llits de combustible d'igual altura i diferent densitat aparent.

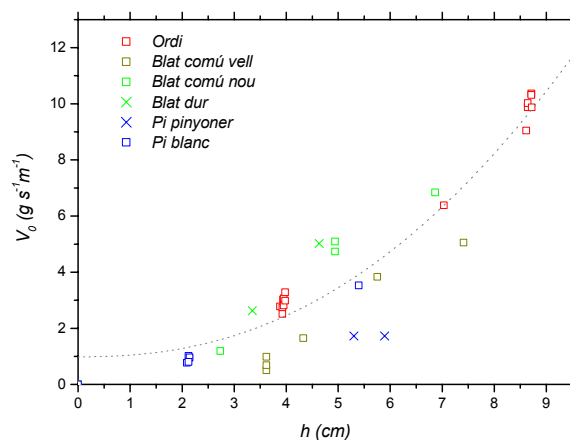


Figura 4.7. Efecte de l'increment de l'altura del llit de combustible en la velocitat de combustió.

A partir de totes aquestes observacions, es detectà doncs la necessitat de fer un pas més en aquest sentit i analitzar conjuntament l'efecte de diverses característiques combinades del combustible. A continuació se'n resumeixen els resultats d'aquest següent pas.

Efecte combinat de les diverses característiques dels combustibles sobre la velocitat de combustió

L'evolució d'un front d'incendi és un fenomen certament complex, fins i tot a escala de laboratori. La comprensió d'aquest a partir de l'observació dels paràmetres que en regeixen el seu comportament –tals com la velocitat de combustió, de propagació o la calor despresa– passa necessàriament per un procés de modelització teòrica dels fenòmens físics que hi ocorren. Aquesta modelització pot ser més o menys completa i elaborada però, en qualsevol cas, no exempta de dificultat. Un pas previ que sovint facilita aquesta tasca és l'estudi estadístic dels valors experimentals obtinguts, per tal d'observar-ne les relacions i dependències principals entre ells. Això és el que es dugué a terme amb les dades de laboratori corresponents als assajos control i l'estudi particular corresponent a V_0 és el que es detalla tot seguit.

Aquest estudi tingué l'objectiu d'analitzar la sensibilitat de V_0 amb les característiques intrínseques i extrínseques dels combustibles determinades en l'annex III, per un total de quaranta assajos control recopilats d'entre totes les sèries experimentals. Això es feu a partir del càlcul del coeficient de correlació de

V_0 amb els següents paràmetres; porositat (η) i altura (h) del llit, relació superfície-volum (σ) i densitat (ρ_m) de les partícules, poder calorífic superior (PCS) i humitat del combustible (Hs), i amb totes les diverses combinacions possibles d'entre tots ells. D'aquesta manera, es calculà el coeficient de correlació de la funció genèrica següent:

$$V_0(\eta^a \sigma^b \rho_m^c h^d Hs^e PCS^f) \tag{4.1}$$

On:

a, b, c, d, e, f Exponents que poden prendre per valor -1, 0 o 1.

De la combinació de les sis variables amb els tres possibles valors dels exponents a, b, c, d, e, f sorgiren un total de 729 (3^6) variants de la funció (4.1). Donada la dimensió de la matriu de dades experimentals originals i atès l'elevat nombre de variants possibles, el procés de càlcul s'agilitzà gràcies a la implementació d'un petit programa mitjançant l'aplicació matemàtica *Matlab*. Aquest programa donà com a resposta una matriu M de 729 files (tantes com possibilitats de combinatòria existents) i 7 columnes; 6 d'elles corresponents als valors dels sis exponents a, b, c, d, e, f i una darrera amb el valor del coeficient de correlació (R^2) per a cada possibilitat. S'ordenaren les files d'aquesta matriu de major a menor coeficient de correlació. Les quatre primeres es detallen tot seguit:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0,868 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0,866 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0,864 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0,863 \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

Aleshores, la funció que presentà major linealitat en les dades experimentals dels assajos control fou, tal i com indica la primera fila de la matriu precedent,

$$V_0\left(\frac{\eta \sigma h PCS}{\rho_m Hs}\right) \tag{4.3}$$

per bé que les altres tres combinacions obtingueren coeficients de correlació molt propers al màxim. En la figura 4.8 es representa la successió de funcions que dona lloc a l'expressió 4.3. S'hi observa com va augmentant la linealitat, a mesura que es van tenint en compte tots els paràmetres que conformen l'expressió final.

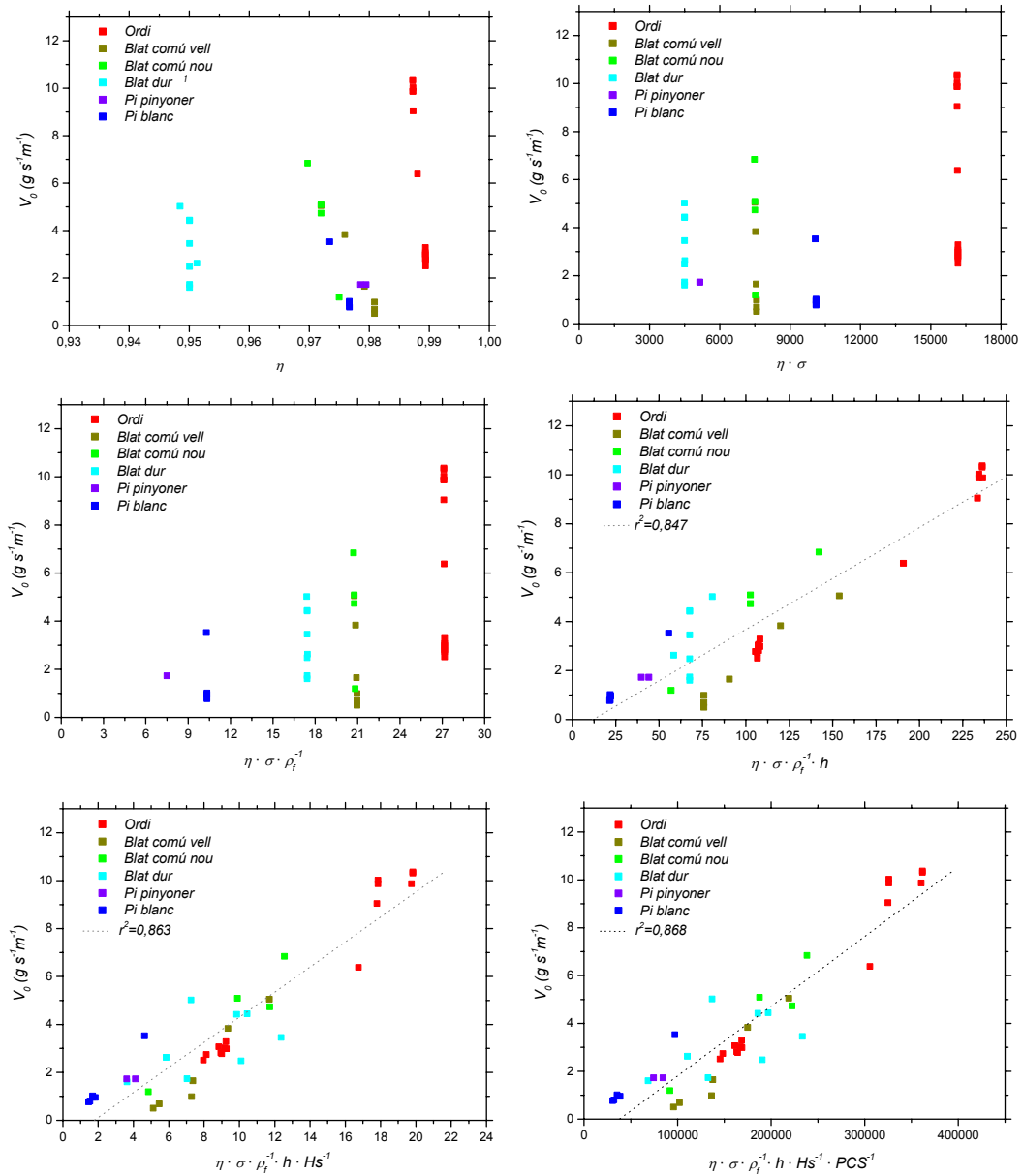


Figura 4.8. Successió de funcions per a l'obtenció final de linealitat. ¹En la sèrie de blat dur, s'hi incloueren una recull de dades d'assajos control amb aquest combustible extrets de Viegas (2000).

En la funció seleccionada, s'observa doncs l'efecte conjunt i sinèrgic d'una combinació específica de característiques del combustible sobre la velocitat de combustió. Una primera anàlisi d'aquesta, porta clarament a afirmar que la porositat i l'altura del llit, i la relació superfície-volum i el poder calorífic superior de les partícules combustibles contribueixen positivament a la velocitat de combustió, mentre que la densitat del material i el contingut d'aigua ho fan negativament. Aquesta afirmació, constatada amb les dades experimentals i, d'altra banda, prou intuïtiva, podria ser complementada amb un raonament teòric basat en els fenòmens de transferència de calor que ocorren en l'avanç d'un front de foc en els experiments al laboratori.

4.2.3. Anàlisi de l'efecte del retardant sobre la velocitat de combustió

De totes les sèries realitzades als laboratoris de Barcelona i Coimbra, se n'estudià l'efecte dels tractaments aplicats sobre les diverses variables que descriuen el comportament del front de flames. S'incidí, en la mesura en què fou possible, en les diferències detectades per formulacions i espècies, per tal d'intentar modelitzar l'acció dels retardants sobre aquestes variables.

Variables d'anàlisi

Tal i com ja s'ha explicat en el capítol tercer, les dues metodologies experimentals executades diferiren en un aspecte clau, la inclusió o omissió d'un procés d'assecatge per tal d'eliminar l'aigua present en la dissolució preparada. Així, en els assajos a Barcelona, on no es dugué a terme aquesta tasca, el combustible es cremà tot just després d'ésser tractat amb dissolucions de producte líquid concentrat en aigua (des de 5% al 20%) aplicades en dosificacions de l'ordre de 30 ml/m². D'aquesta manera es contemplà l'efecte conjunt de l'aigua i el polifosfat en la reducció progressiva de la intensitat del front. En canvi, en les proves amb assecatge on el combustible fou tractat amb dosificacions sensiblement més altes, el que s'observà fou l'efecte únic de les sals retardants sobre el front. Nogensmenys, en aquelles proves en què aquest procés durà poc temps, no desaparegué completament l'aigua del tractament. Aleshores calgué també contemplar en aquests casos l'efecte de l'aigua no evaporada per tal de realitzar les comparacions amb la màxima rigorositat. Tot això es tingué en compte definint els següents paràmetres:

Quantitat de retardant aplicada: m_r (g retardant sec / kg de combustible sec)

La quantitat de retardant present en el combustible s'avaluà com la relació entre els grams de producte retardant sec (per a les proves amb assecatge) o sense aigua (per a les proves sense assecatge, és a dir, descomptant-li l'aigua de dilució del líquid concentrat) i els kilograms de combustible sec, per metre quadrat de llit.

El càlcul d'aquest paràmetre fou molt senzill per a totes les proves. Es realitzà mitjançant la dosificació aplicada, la concentració de la dissolució, la densitat del producte retardant i, finalment, el factor de dilució d'aquest líquid concentrat que correspongueren en cada cas, segons la marca comercial assajada i les especificacions de la prova. D'aquesta manera també s'estandaritzà el còmput, no únicament per a les dues metodologies, sinó també per als diferents retardants comercials emprats.

Quantitat d'aigua de tractament: m_a (g d'aigua / kg de combustible sec)

La quantitat d'aigua de tractament present en el combustible just en el moment de la ignició provingué, en els assajos sense assecat, de dues aportacions diferenciades; en primer lloc, de l'aigua emprada com a dissolvent en la preparació de la mescla, i en segon lloc, de l'aigua ja present en el líquid concentrat de retardant, de la qual se'n fa un esment específic en l'annex II. En les proves amb assecat complet, aquest paràmetre fou òbviament nul, però en aquelles en què l'assecatge no s'efectuà durant un període de temps suficient per a assolir l'eliminació total de l'aigua, calgué comptabilitzar-ne la presència residual. Aquest càlcul es dugué a terme a partir de l'anàlisi de les dades provinents de la balança que enregistrà la pèrdua de massa durant l'assecatge.

En les figures 4.9 a) i b), s'observa el pla experimental generat a partir de la combinació d'aquests dos paràmetres. En la primera d'elles, els punts estan classificats segons el bloc experimental al què pertanyen i en la segona es representen segons la metodologia emprada.

Els assajos pertanyents als quatre primers blocs, realitzats a Barcelona, foren duts a terme ometent el procés d'assecatge, mentre que en els dos darrers, duts a terme a Coimbra, hi conviviren proves en les què es dugué a terme un assecat complet o parcial o bé cap dels anteriors.

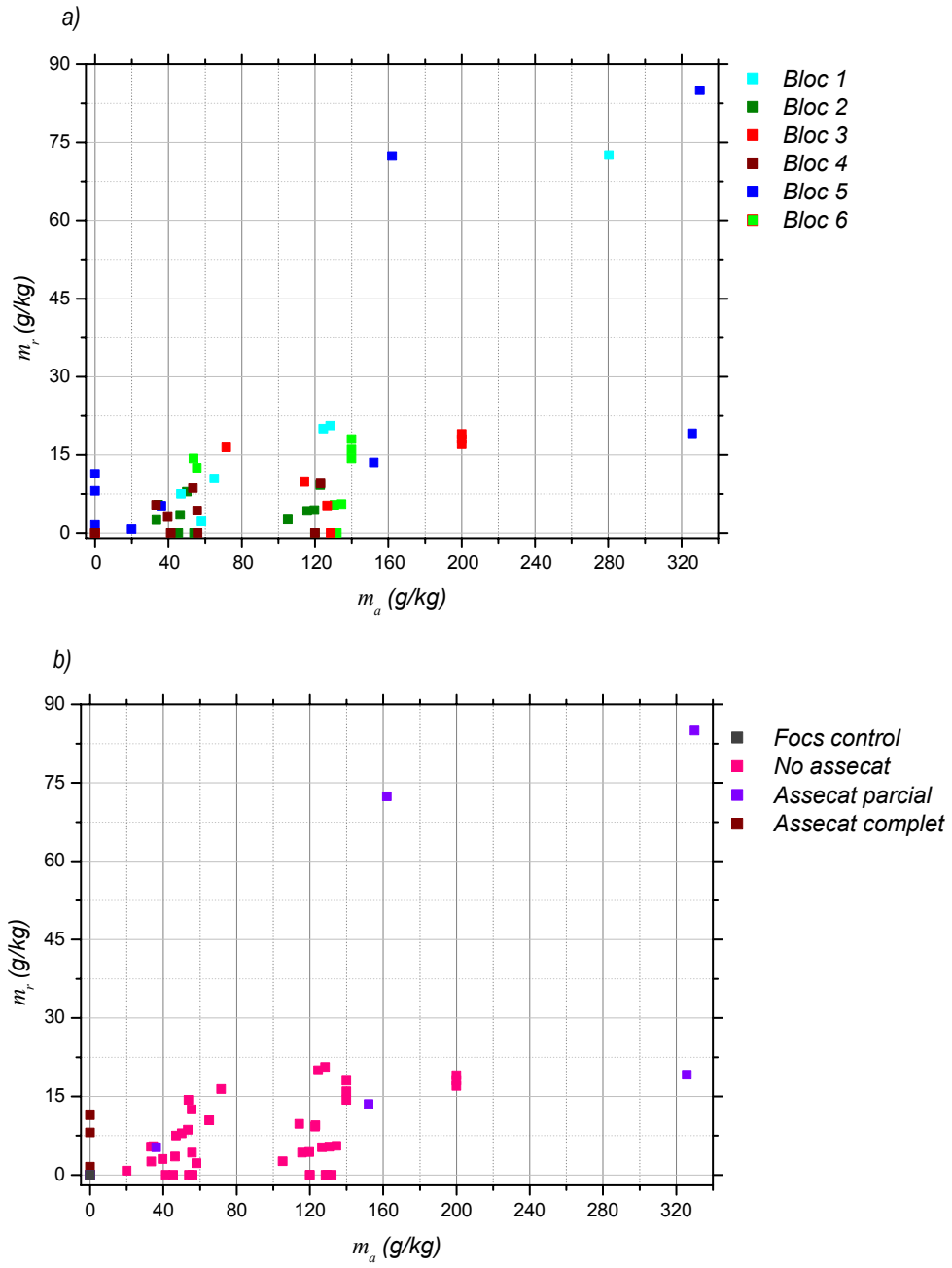


Figura 4.9. Representació gràfica del pla experimental generat per la combinació dels paràmetres m_a i m_r , a) per blocs experimentals i b) per metodologia.

Amb l'absència d'assecatge, fou possible realitzar sèries experimentals completes durant una jornada, ja que el període de temps emprat per a cada experiment quedava reduït considerablement. A més, el control del paràmetre m_a fou realment senzill, perquè es referia en cada cas a la quantitat total de massa d'aigua present en el tractament. No obstant això, l'abast del pla experimental delimitat per aquesta tipologia d'assajos queda reduït al seu terç inferior, tal i com s'observa en la figura 4.10, on queden representades les regions abastades per als diferents mètodes. Amb aquesta metodologia i ateses les concentracions aplicades, no es pogueren obtenir valors de m_r molt superiors, ja que per això hagués estat necessari concentrar la dissolució fins a tal punt en què no hagués estat possible aplicar-la adequadament amb un dispersor manual. L'assecatge total, per la seva banda, permet obtenir valors de m_r al llarg de tot l'eix d'ordenades del pla representat, per bé que òbviament no contempla l'acció conjunta de l'aigua i el retardant. Els assajos considerats amb aquesta metodologia foren escassos, degut a que el temps necessari per obtenir un assecatge total mitjançant les làmpades halògenes fou realment llarg, de l'ordre de 3 hores. En darrer lloc, cal dir que l'abast del pla experimental generat a partir de l'assecatge parcial és el més ampli de tots, ja que pot cobrir-ne pràcticament tota l'extensió amb diverses combinacions de concentracions, dosificacions i temps de procés. Tanmateix, aquesta metodologia implicà realitzar una supervisió molt difícil del paràmetre m_a , degut a la susceptibilitat a error del mètode de control per pesatge. Per bé que el sistema de pesatge implementat fou adequat per a enregistrar la pèrdua de massa durant el transcurs d'un foc –atenent les especificacions de la balança– aquest no garantí al 100% l'enregistrament fidel de la pèrdua d'aigua per evaporació, ja que aquesta pogué tenir lloc amb intervals menors a la precisió de l'equip.

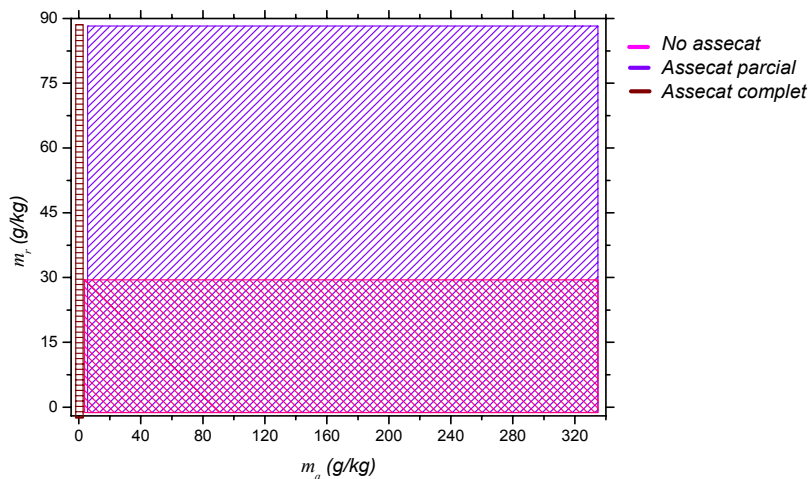


Figura 4.10. Abast experimental dels tres procediments, no assecat, assecat parcial i complet.

Taxa de reducció de la velocitat de combustió: v (V/V_0)

L'efecte del tractament aplicat en cada assaig es valorà finalment a partir de la reducció detectada en les variables del comportament del foc. Així, per la velocitat de combustió es definí i s'anàlitzà la taxa de reducció de la velocitat de combustió (v) com la relació entre la velocitat obtinguda en un assaig amb combustible tractat i la velocitat en l'assaig de control (definit com aquell dut a terme sota les mateixes condicions, però sense aplicació de tractament).

Reducció de la velocitat de combustió per blocs experimentals

De la correlació d'aquest tres paràmetres, en sorgí un primer anàlisi de l'efecte en la velocitat de combustió dels diferents tractaments aplicats sobre els combustibles d'estudi. Es dugué a terme partint de la representació gràfica de la tendència $v(m_a, m_r)$ que s'obtingué per a cada bloc experimental. La figura 4.11 inclou, a banda d'aquesta representació tridimensional, els punts experimentals d'aquesta, per al bloc primer. Cadascun d'aquests punts correspon lògicament a un assaig amb tractament i s'hi representen agrupats per sèries experimentals de càrrega.

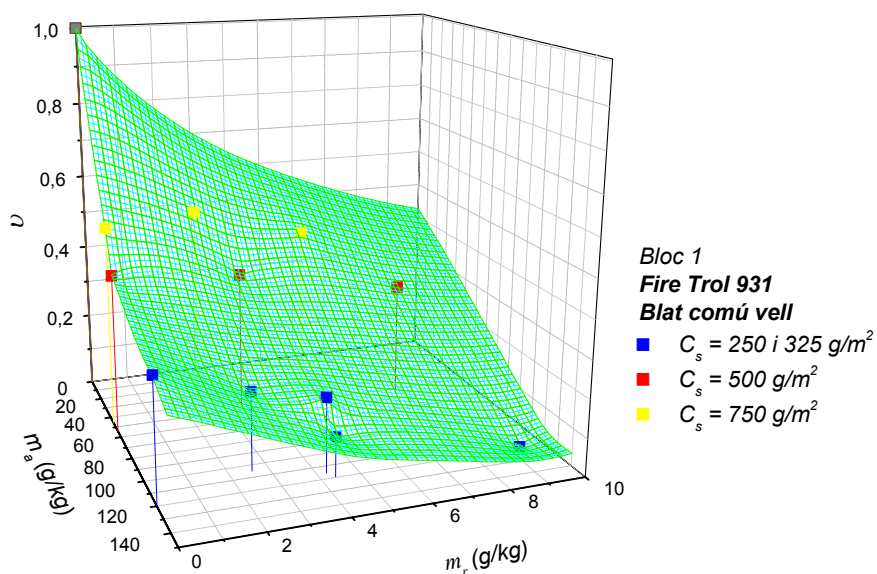


Figura 4.11. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al primer bloc experimental.

La funció $v(m_a, m_r)$ dibuixada en tres dimensions, no és més que una corba de nivell experimental calculada fent interpolacions en l'espai a partir dels punts representats, d'aquí les irregularitats que presenta. Nogensmenys, dóna una idea molt clara de l'evolució de la velocitat de combustió sota l'efecte de retardant, aigua o ambdós. En la figura 4.12, es presenten diverses vistes d'aquesta corba en tres dimensions, a partir de les quals es pot analitzar de manera incipient aquest efecte.

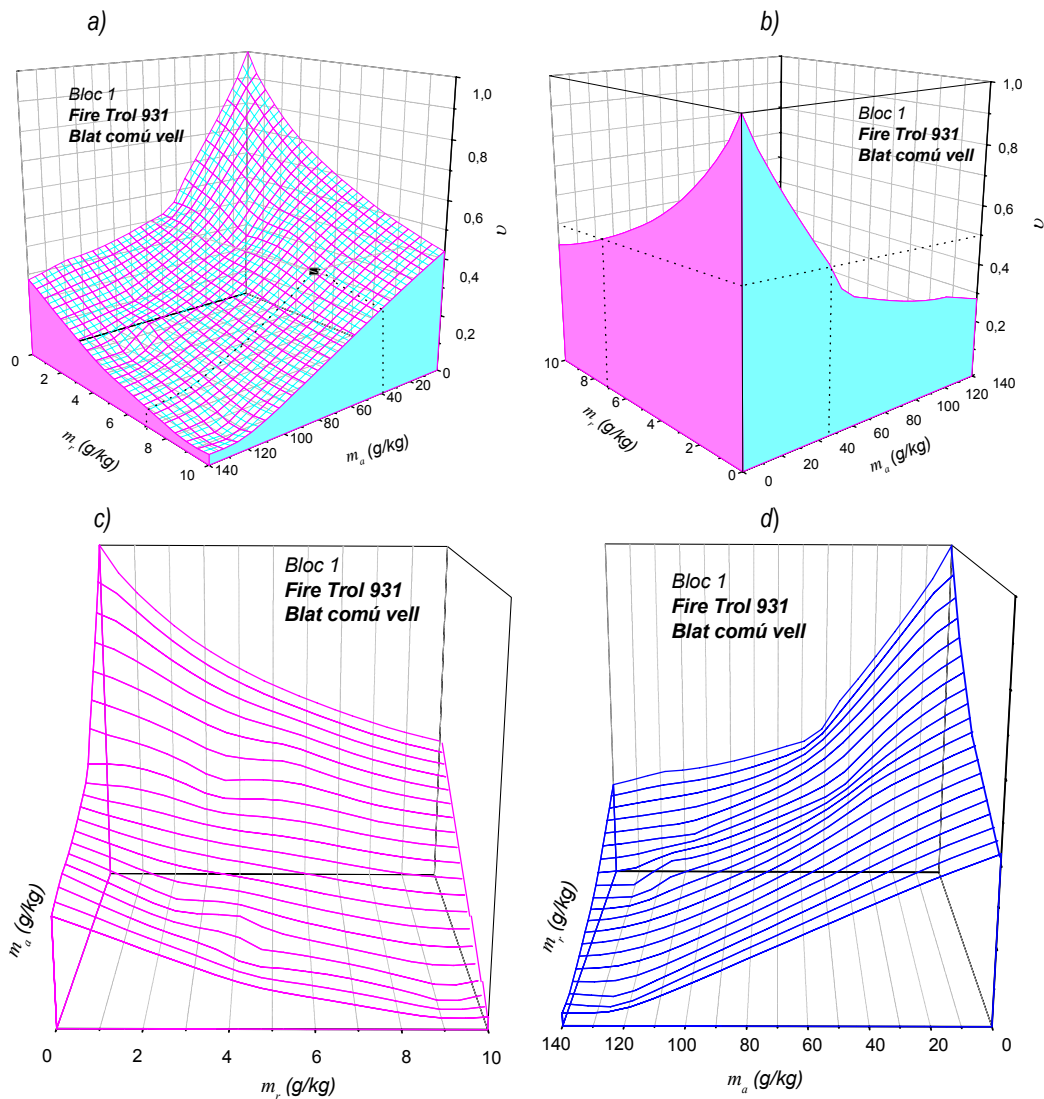


Figura 4.12. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al primer bloc experimental.

La vista de la figura 4.12 a) permet distingir clarament la diferent evolució de v a l'incrementar-se conjuntament la presència d'aigua i de retardant. Les seccions acolorides il·lustren les morfologies de les relacions $v(m_r)$ i $v(m_a)$ per a una quantitat màxima d'aigua de tractament i de retardant, respectivament. S'hi pot remarcar una diferència entre els dos pendents de les corbes, més pronunciat el que fa referència a la disminució de la velocitat de combustió en presència d'aigua, per bé que també cal constatar la diferència d'escala dels paràmetres m_a i m_r .

En aquest sentit es presenta la figura 4.12 b), on les seccions colorejades corresponen a la part posterior de la gràfica, és a dir a l'evolució de $v(m_r)$ sense presència d'aigua i de $v(m_a)$ sense presència de retardant. Les línies discontinües marquen els punts de tall de les dues funcions per un valor de v igual a 0,5, és a dir, per una reducció de la velocitat de combustió del 50%. En el cas plantejat, m_r valdria aproximadament 7 g/kg, mentre que m_a tindria un valor proper a 40 g/kg. D'aquesta manera l'eficàcia del retardant sec en relació a l'aigua quedaria fàcilment contrastada i podria ser comparada amb l'eficàcia d'un tractament conjunt amb les quantitats de retardant i aigua mencionades, proper al 60% tal i com s'observa en el punt emfatitzat de la figura 4.12 a).

La vista c) presenta l'evolució de $v(m_r)$ a mesura que augmenta l'aigua de tractament, mentre que a la vista d) s'hi observa com varia la relació $v(m_a)$ amb el retardant. La suavització gradual d'ambdues tendències il·lustra indefectiblement l'efecte conjunt de l'aigua i el retardant. Per bé que en aquest punt d'anàlisi és inviable un estudi de possibles sinèrgies entre ambdós components, és indubtable que el tractament de les dades experimentals mitjançant aquesta metodologia n'ofereix la possibilitat.

La resta de blocs experimentals també foren representats d'aquesta manera, tal i com es visualitzen en les següents figures. En la 4.13 s'il·lustra la tendència de la corba de nivell generada a partir dels punts experimentals del següent grup. EL bloc 2 es distingí del primer en la utilització d'un retardant diferent. Tanmateix, el pla experimental compost pels paràmetres m_a i m_r fou coincident amb el bloc 1 i l'evolució de v amb aquests resultà ser també semblant.

Pel que fa als blocs tercer i quart, correspongueren respectivament a l'experimentació realitzada igualment amb els retardants Fire Trol 931 i FR Cros 134 P, però en ambdós casos aplicats sobre blat comú nou. Les dues evolucions es presenten respectivament en les figures 4.14 i 4.15.

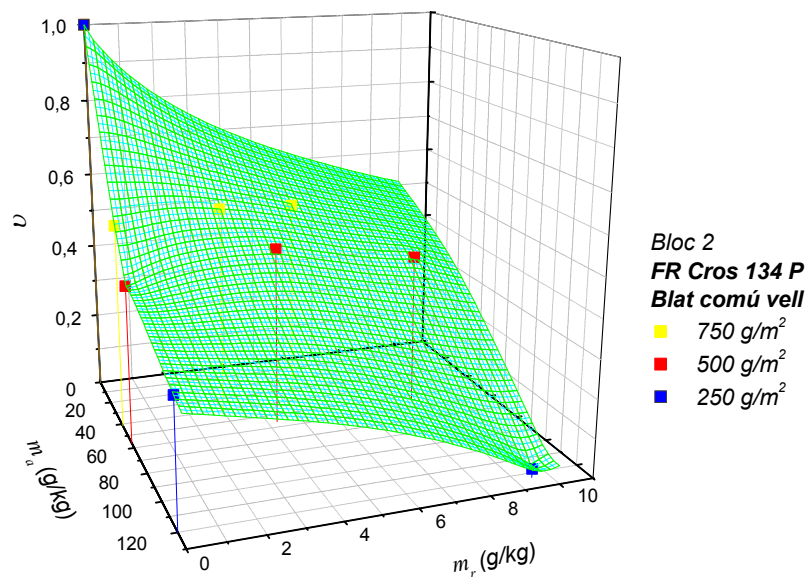


Figura 4.13. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al segon bloc experimental.

Tot i que el pla (m_a, m_r) abastà més superfície (s'utilitzaren dosificacions més elevades) es constatà en els dos blocs la millor combustibilitat del blat comú nou. Així, per tal d'efectuar correctament la interpolació necessària per generar la corba de nivell, calgué imposar uns possibles punts de tall d'aquesta amb el pla (m_a, m_r) ja que, amb els assajos realitzats, v assolí un mínim de 0,10 pel bloc 3 i 0,20 pel bloc 4, certament lluny dels valors mínims dels dos primers blocs, molt propers a zero (0,013 pel bloc 1 i 0,022 pel bloc 2). Tot i això, s'hi pot observar, de la mateixa manera que en els blocs 1 i 2, l'evolució de v amb l'increment d'aigua i retardant.

Finalment en les figures 4.16 i 4.17 s'hi representen el dos darrers blocs experimentals, efectuats a Coimbra. En ambdós hi hagué una convivència de metodologies, pel que fa al procés d'assecatge. Aquest fet, queda especialment palès en la figura representativa de la darrera sèrie (realitzada amb agulles de pi pinyoner i retardant Fire Trol 934) on hi són presents un conjunt de punts experimentals molt propers entre ells, alguns dels quals situats talment sobre la línia corresponent a un valor nul de m_a . Val a dir que aquests punts aportaren valuosa informació sobre els primers estadis de reducció de la velocitat de combustió en presència únicament de retardant, d'aquí les diferències en l'evolució de la corba de nivell per aquest cas particular.

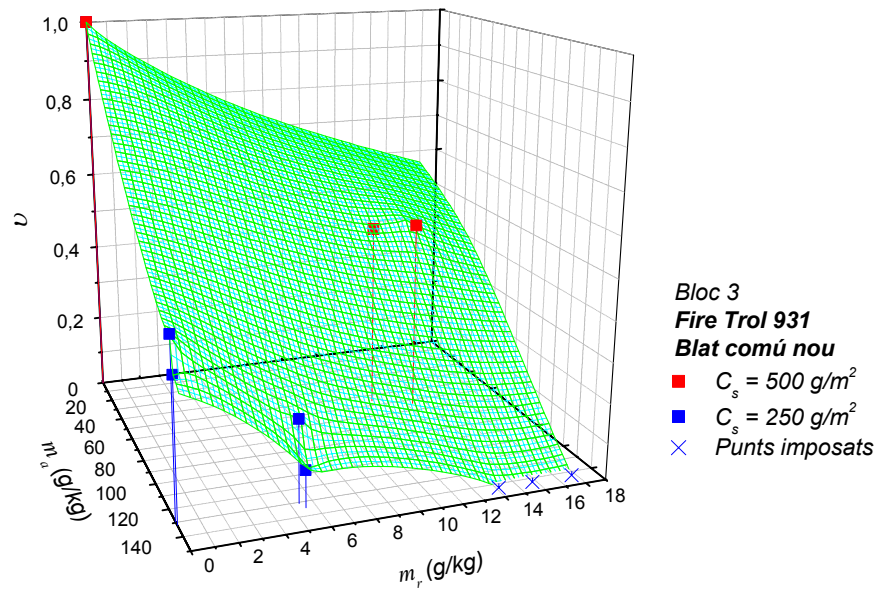


Figura 4.14. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al tercer bloc experimental.

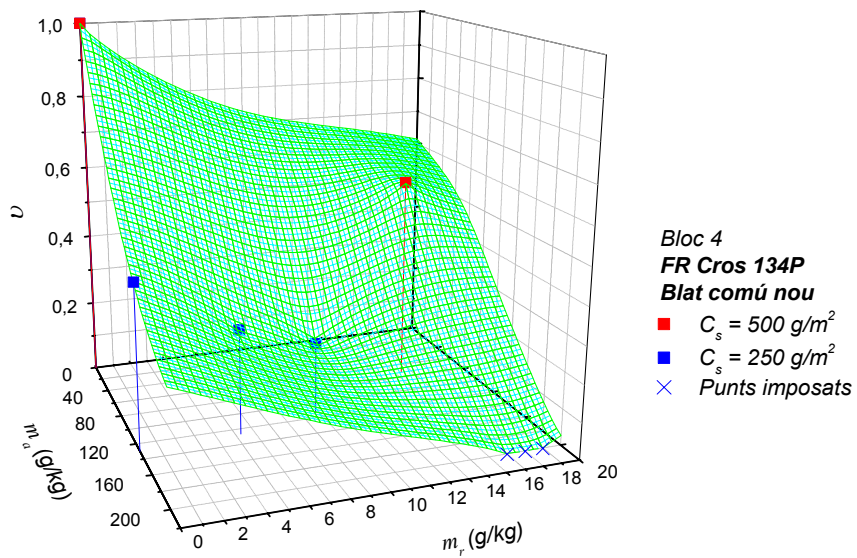


Figura 4.15. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al quart bloc experimental.

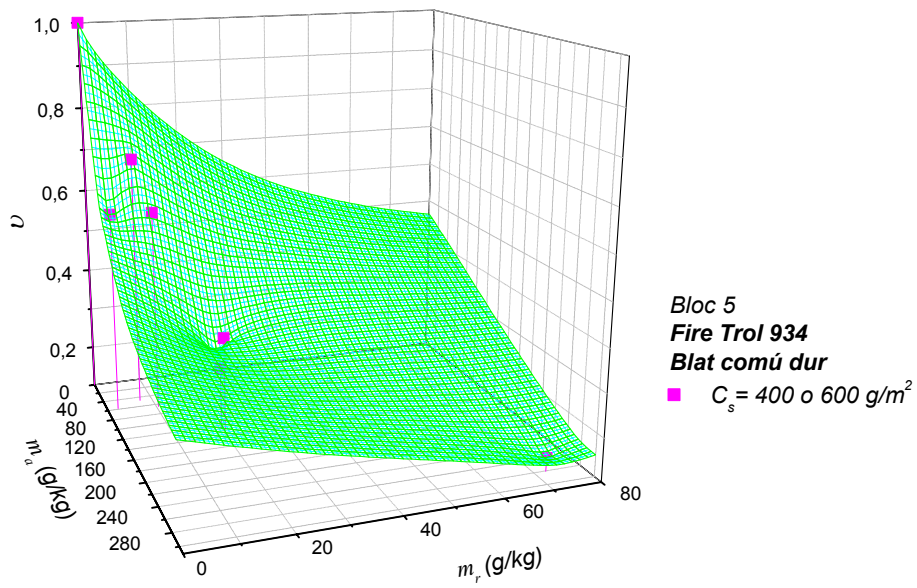


Figura 4.16. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al cinquè bloc experimental.

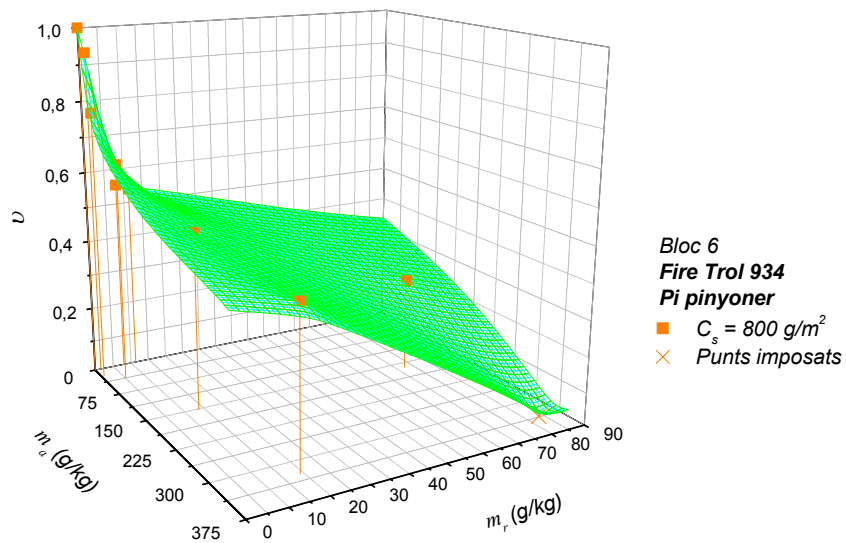


Figura 4.17. Taxa de reducció de la velocitat de combustió per al sisè bloc experimental.

Pel que fa al bloc experimental de blat dur, cal assenyalar que també s'hi intueix la convivència d'un assaig amb assecatge parcial amb la resta de proves, on fou omès aquest procés. De l'observació del punt experimental posicionat en una de les cantonades de la corba, se'n pot deduir que té un elevat valor de m_r , així com de m_a . Aquests deriven d'un experiment realitzat amb una alta dosificació i concentració a més d'un assecatge parcial, a fi de trobar precisament aquest valor extrem de reducció màxima de v . D'altra banda, els punts experimentals d'aquest bloc es presenten indistintament de la càrrega, ja que fou en aquesta sèrie on es pretengué intuir la coherència dels paràmetres m_a i m_r en l'efecte sobre v , independentment de la càrrega massica de combustible. Tanmateix, no s'observà cap discordança en aquest sentit.

Anàlisi comparatiu entre blocs

La realització d'aquests blocs experimentals permeté dur a terme una anàlisi genèrica que, encara que bàsica, possibilità abordar diversos aspectes d'interès, com la comparació de l'efecte de retardant per espècies i per formulacions comercials. Tot seguit se n'exposen les principals conclusions.

Dels quatre primers blocs, en sorgí un primer estudi il·lustrat en les figures 4.18, 4.19, 4.20 i 4.21.

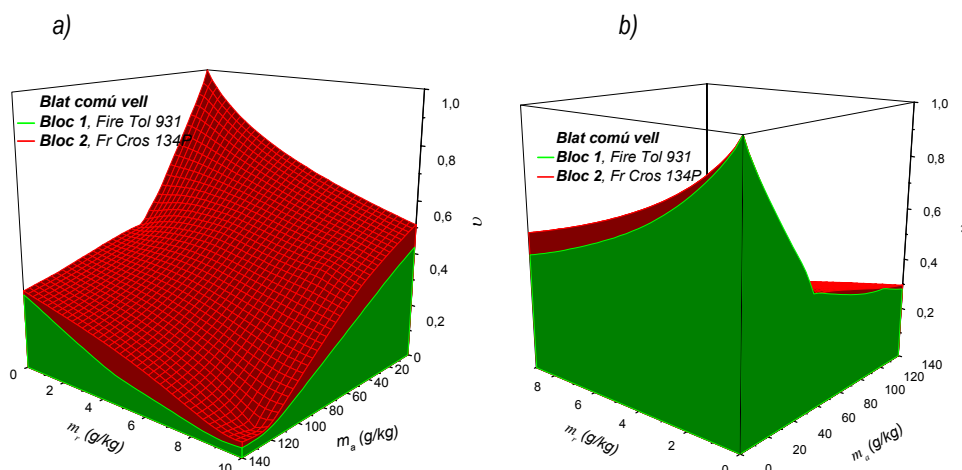


Figura 4.18. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als dos primers blocs experimentals, realitzats amb blat comú vell.

En les vistes frontal i posterior de la figura 4.18 s'hi representen conjuntament els sòlids que generen les corbes de nivell dels dos primers blocs experimentals. Així s'observa l'efecte comparatiu dels dos retardants emprats en cadascun d'aquests blocs. La corba que correspon als assajos del segon bloc queda clarament situada per sobre de la corba de les proves del primer, la qual cosa posa de manifest la menor eficàcia del retardant FR Cros 134 P enfront el Fire Trol 931. El mateix efecte, per bé que més suavitzat, es distingeix també en la comparació dels blocs 3 i 4, duts a terme amb blat comú nou (figura 4.19). Aquesta observació permet detectar les possibles diferències pel que fa a la sensibilitat dels dos productes envers la tipologia de combustible assajat.

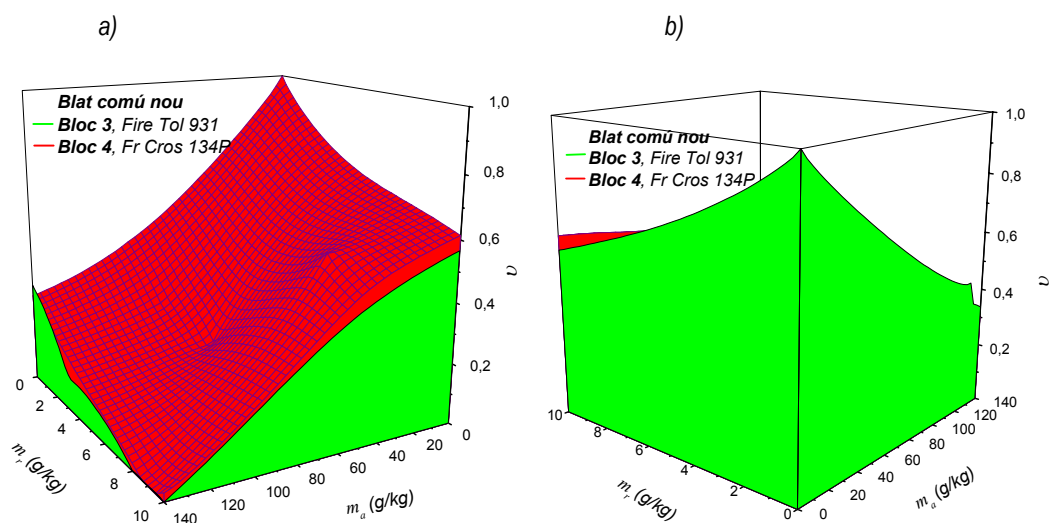


Figura 4.19. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 3 i 4, realitzats amb blat comú nou.

En aquest sentit, les següents figures (4.20 i 4.21) són força il·lustradores. Ateses aquestes representacions, l'eficàcia del producte Fire Trol 931 disminueix sensiblement a l'actuar sobre un combustible amb millors propietats tèrmiques pel que fa a la intensitat del foc, mentre que el FR Cros 134P és una mica més robust als canvis en les característiques del fuel. En qualsevol cas, no és objectiu d'aquesta tesi determinar quin dels productes emprats fou el que tingué globalment millor resposta, per bé que sí que l'és el de desenvolupar eines i procediments per a poder respondre a aquests interrogants. Els resultats d'aquesta anàlisi són simplement un exemple de la potencialitat d'aquesta metodologia.

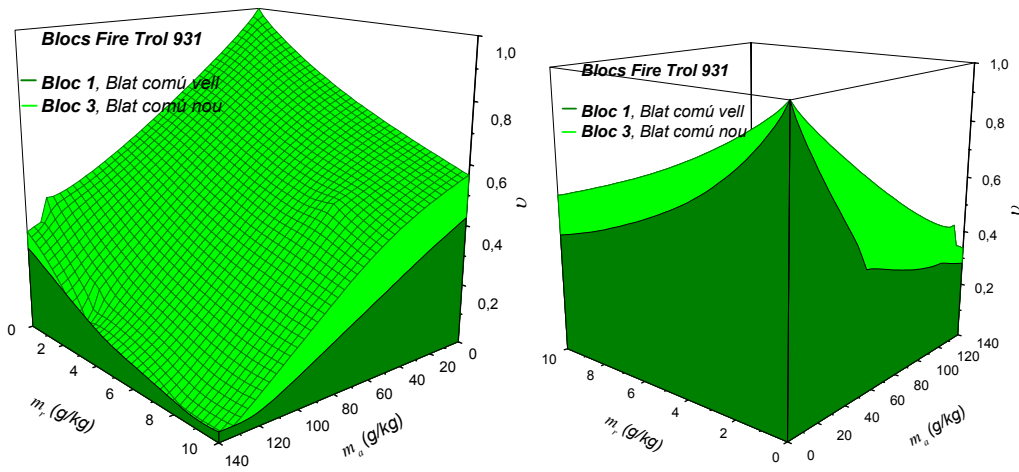


Figura 4.20. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 1 i 3, realitzats amb Fire Trol 931.

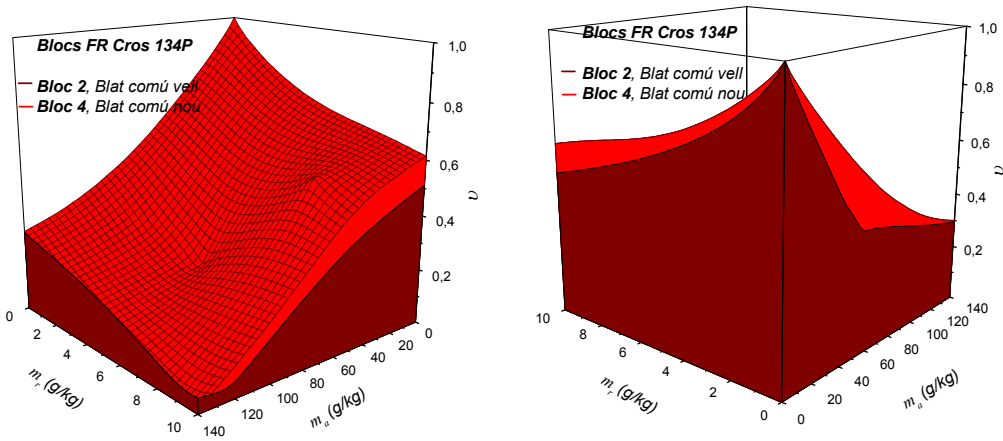


Figura 4.21. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 2 i 4, realitzats amb FR Cros 134P.

Seguint la línia iniciada, les sèries experimentals de Coimbra també permeteren realitzar una anàlisi del comportament del retardant Fire Trol 934 sobre els dos combustibles utilitzats, d'una banda, el blat comú dur, i de l'altra, el pi pinyoner. La figura 4.22 ofereix la vista més il·lustradora d'aquesta comparativa.

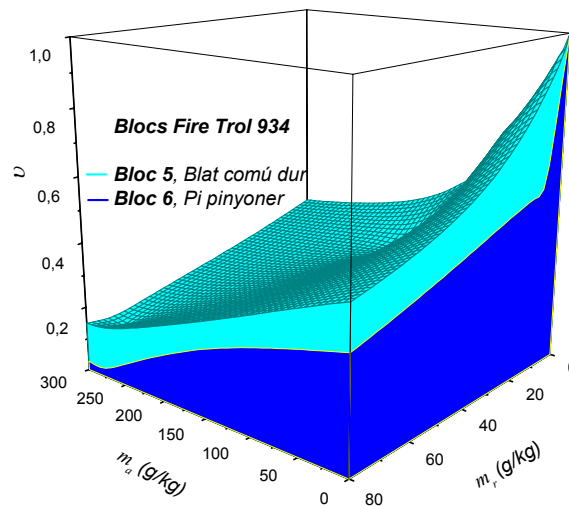


Figura 4.22. Corbes de nivell per als blocs experimentals 5 i 6, realitzats amb Fire Trol 934.

Novament es detecta la major eficàcia de la formulació utilitzada per actuar sobre el combustible que ofereix menor combustibilitat, en aquest cas el pi pinyoner. Aquesta vista permet observar també la diferència en la morfologia de la funció $v(m_r)$ per a m_a equivalent a zero dels dos blocs. Al bloc de pi pinyoner, on s'aplicà l'assecatge complet en alguns dels seus assajos, la corba $v(m_r)$ presenta un descens molt pronunciat per a valors baixos de m_r . Aquesta corba es dibuixà resseguint els punts experimentals trobats en aquesta regió. En canvi, en el bloc de blat comú dur, la funció $v(m_r)$ és més suau, degut a que no respon a la forma dictada per punts experimentals, sino a l'extrapolació derivada dels punts més propers a aquesta regió. D'aquí se'n desprèn la importància de les proves amb assecatge per una bona caracterització de la morfologia de la corba de nivell.

Per tancar aquesta anàlisi per blocs, es representaren finalment totes les corbes de nivell obtingudes, sota els mateixos eixos. Degut a les diferències dels rangs d' m_a i m_r entre els blocs experimentals, es limità

l'anàlisi a la regió delimitada pel pla experimental m_r [0,10] i m_a [0,75]. La representació gràfica d'aquesta zona s'il·lustra en la figura 4.23.

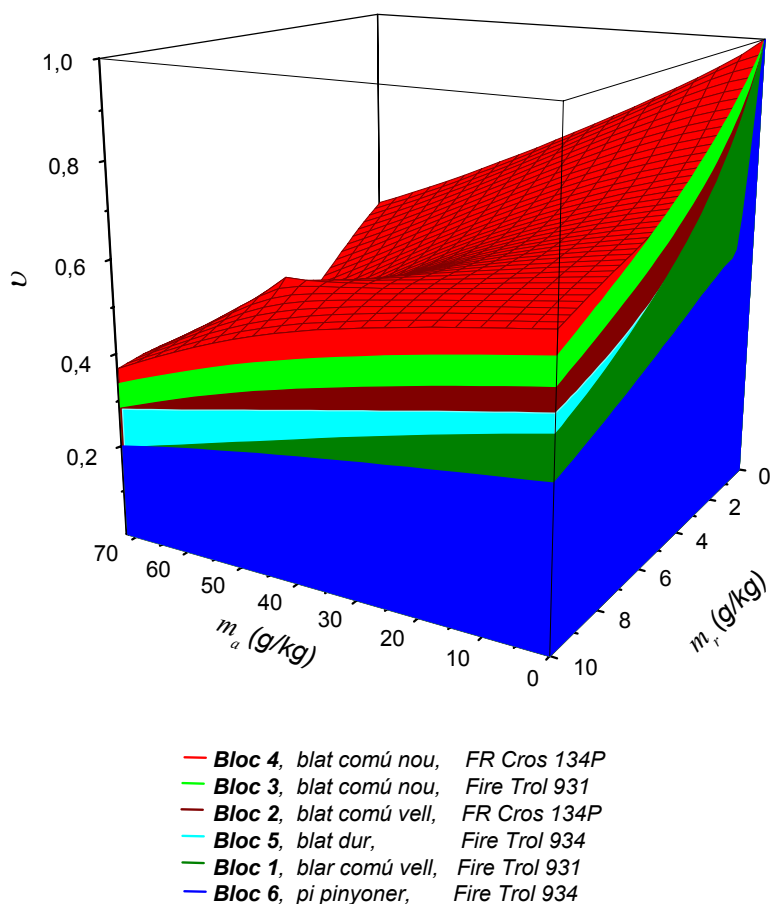


Figura 4.23. Corbes de nivell per al conjunt de tots els blocs experimentals.

La perspectiva de la figura precedent permet descobrir l'ordre de posicionament dels diferents blocs. Tal i com ha quedat palès en d'altres gràfiques, els blocs quedaren posicionats atès el grau de dificultat d'extinció del combustible d'assaig, és a dir, segons l'efectivitat de la mescla de tractament per a reduir la velocitat de combustió del front. Així, blocs amb formulacions òptimes per a reduir el valor de la v particular de cada lit de combustible, quedaren situats per sota dels blocs on el tractament aplicat fou menys eficaç. L'ordre final és el detallat en la llegenda. D'aquesta manera, la reducció de la velocitat de combustió fou més efectiva pel

bloc de pi pinyoner tractat amb Fire Trol 934, mentre que el bloc que correspongué al blat comú nou tractat amb FR Cros, resultà ésser el més difícil d'extingir.

Modelització de la funció $v(m_r, m_a)$

A partir de l'observació de totes aquestes formes representades en les figures anteriors, es pogué realitzar la modelització empírica de la corba de nivell estudiada, per tal de definir una funció tipus $v(m_r, m_a)$. Tot seguit es descriuen els passos d'aquesta modelització, exemplificant-los amb el bloc experimental primer.

La tendència observada en el bloc experimental primer pel que fa a la variació de v amb el contingut d'aigua del tractament, fou curiosament comparable a la relació de la variació de la intensitat del front amb la humitat del combustible, recopilada per Anderson (1969) i il·lustrada en la figura 4.5. Així, per la sèrie d'assajos F0 (aquells en què el tractament es dugué a terme únicament amb aigua) s'observà una sobtada disminució de v amb petites dosis d'aigua, seguit d'un decreixement més subtil per a valors superiors de m_a , per arribar finalment a un nou descens brusc de v fins a assolir un valor nul. La modelització d'aquesta tendència es realitzà ateses les següents restriccions; d'una banda, la funció resultant havia de ser decreixent en tot el seu domini experimental i, per altra banda, el coeficient de correlació R^2 de les dades experimentals amb la funció modelitzada havia de ser màxim. L'expressió que acomplí aquestes consideracions fou la polinòmica de tercer ordre que es detalla tot seguit:

$$v = 1 - 0,0163 m_a + 0,000127 m_a^2 - 3,28 \cdot 10^{-7} m_a^3 \quad (4.4)$$

Així, es determinà la funció generada en el tall de la corba de nivell amb el pla (v, m_a) , és a dir, per a valors nuls de m_r . La tendència d'aquesta corba al desplaçar-la al llarg de l'eix m_r , es pogué descriure igualment amb la funció polinòmica precedent, variant-ne únicament el terme independent. D'aquesta manera s'obtingué la família de corbes representades en la figura 4.24.

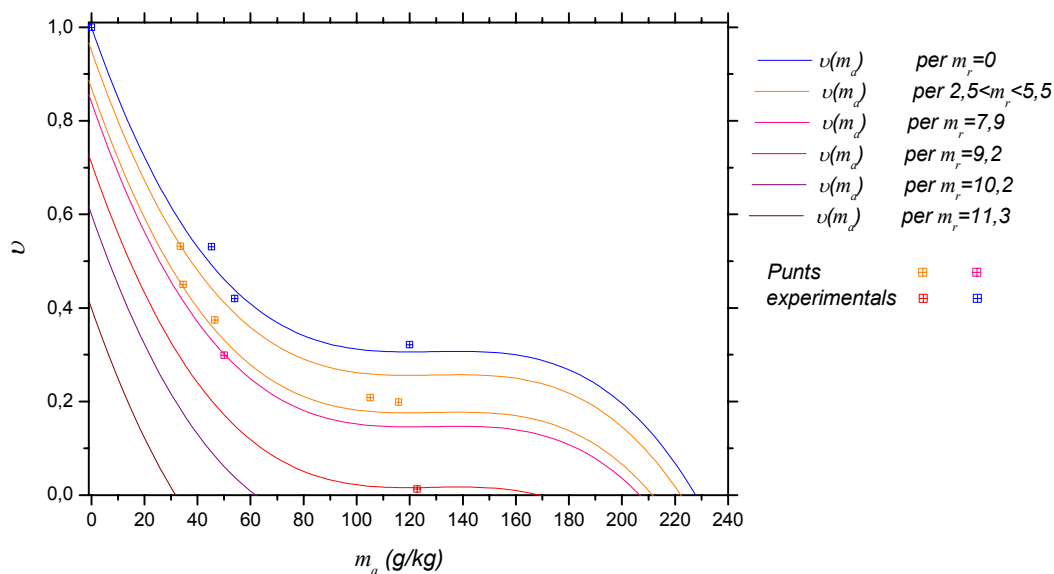


Figura 4.24. Punts experimentals i família de corbes $v(m_a)$ per al bloc experimental primer.

Reduint successivament el terme independent de la funció (4.4) s'obtingueren les variacions de $v(m_a)$ per als assajos amb retardant. En la figura 4.24 es representen les corbes significatives en aquest sentit, amb especial esment a les que s'ajustaren als punts experimentals. Així, els assajos on el valor de m_r es trobava entre 2,5 i 5,5 g/kg, quedaren compresos entre les corbes amb termes independents des de 0,95 fins a 0,87. Per a valors superiors de m_r , s'obtingueren òbviament valors inferiors del terme independent del polinomi; 0,84 per un tractament amb 7,9 g de retardant sec per kg de combustible i 0,71 per un tractament amb 9,2 g/kg. En darrer lloc s'hi representen també en la part inferior de la figura dues corbes més amb termes independents o punts de tall amb l'eix v de 0,6 i 0,4, corresponents a dosis de retardant teòriques, no abastades pel rang experimental i equivalents a 10,2 i 11,3 g/kg.

D'aquesta manera es començà a intuir la sinergia de l'efecte conjunt de l'aigua i el retardant. Donats petits increments de producte i per a poca quantitat del mateix, l'efecte de l'aigua seguí la tendència descrita i dibuixada en les quatre corbes superiors. Assolit un cert valor de m_r –proper a 8g/kg en el cas d'estudi– la disminució de v amb l'aigua fou més acusada atenent idèntics valors incrementals de m_r .

A més, aquesta representació permeté descobrir i calcular la funció $v(m_r)$ per a m_a igual a 0, ja que el valor del terme independent de qualsevol de les funcions de la família $v(m_a)$ indicava sens dubte una reducció de v idèntica per a un assaig amb una certa quantitat de retardant sec. Així, llegint els valors de m_r per a cadascuna de les corbes de la família $v(m_a)$ i associant-los al seu terme independent corresponent, es generà la funció $v(m_r)$ per a assajos secs. Considerant les mateixes restriccions que anteriorment pel que fa al decreixement de la funció i a la maximització del coeficient R^2 , el resultat d'aquesta modelització donà també una funció polinòmica, que tingué la següent expressió,

$$v = 1 - 0,06979m_r + 0,0156m_r^2 - 0,00125m_r^3 \quad (4.5)$$

i a partir de la qual es generaren igualment totes les corbes de la família $v(m_r)$ considerant la variació amb el contingut d'aigua. Aquest segon grup de funcions es representa en la figura 4.25, juntament amb els punts experimentals on, d'altra banda, hi queda palès el seu bon ajust.

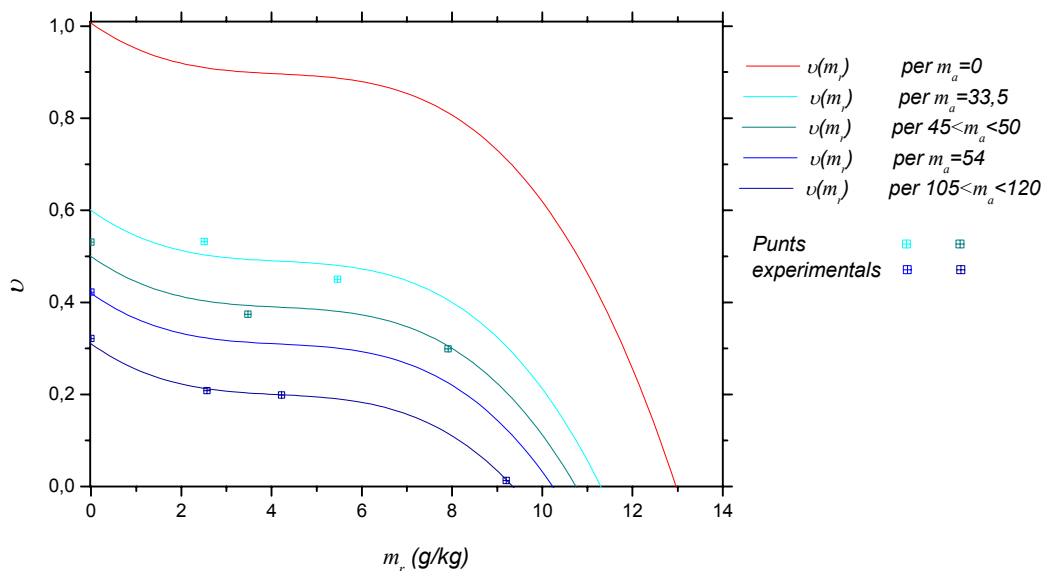
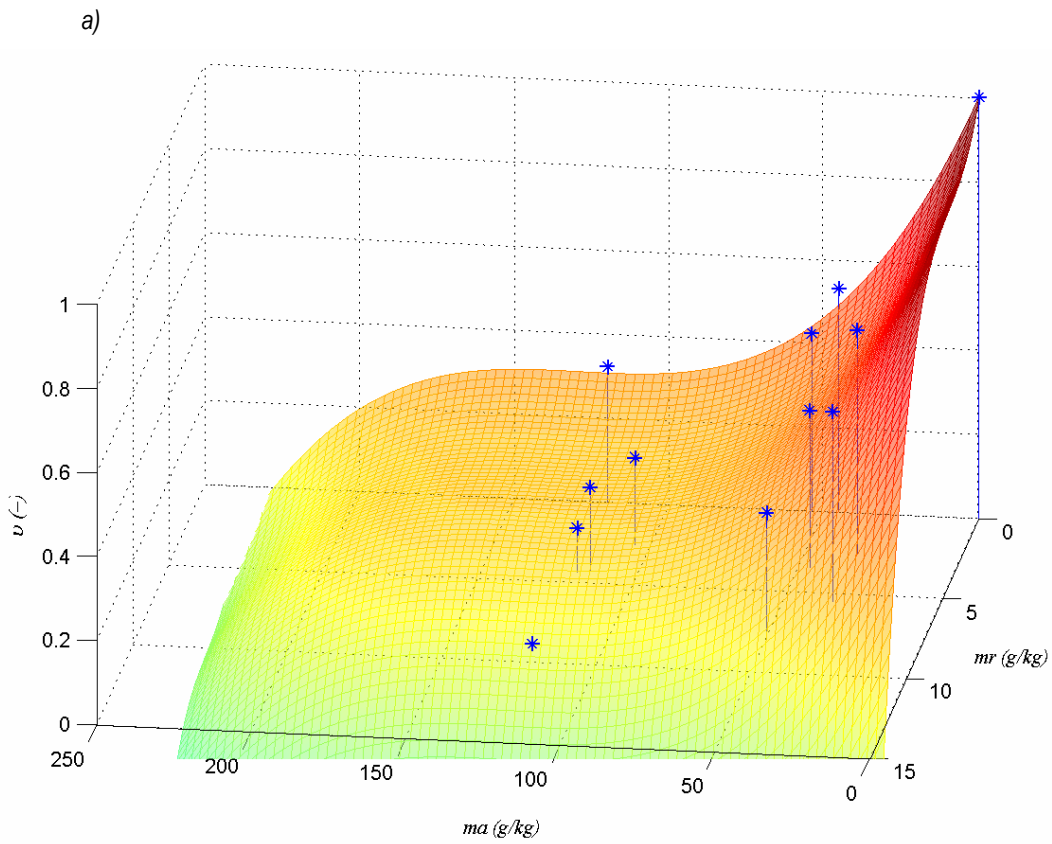


Figura 4.25. Punts experimentals i família de corbes $v(m_a)$ per al bloc experimental primer.

De la conjunció d'aquestes dues famílies de corbes en derivà la funció final (4.6) en tres dimensions per a la modelització de la corba de nivell referida al bloc experimental primer.

$$v = 1 - 0,06979m_r + 0,0156m_r^2 - 0,00125m_r^3 - 0,0163m_a + 0,000127m_a^2 - 3,28 \cdot 10^{-7} m_a^3 \quad (4.6)$$

Les figures 4.26 a) i b) representen aquesta corba teòrica i els punts experimentals del bloc primer des de dues perspectives diferenciades, a fi de donar una visió completa de la morfologia de $v(m_a, m_r)$. L'adequació de la corba model als punts experimentals també hi queda clarament evidenciada, posteriorment se'n calculà el coeficient de correlació R^2 i aquest prengué per valor 0,982. En ambdues representacions s'hi distingeix una franja de color groc intens, que delimita el tall de la corba amb el pla $v=0$. Així, la zona acolorida amb tons verdosos quedaria per sota d'aquest pla.



b)

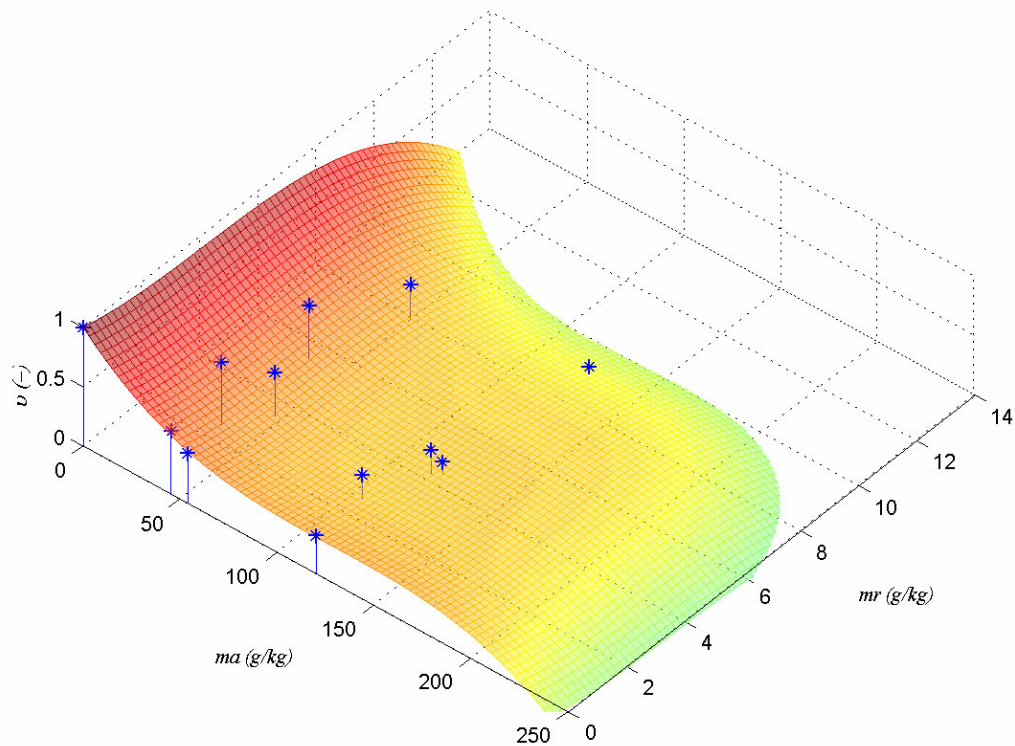


Figura 4.26 a) i b). Representació gràfica de la corba de nivell modelitzada i dels punts experimentals, per a la sèrie primera.

En la figura 4.27 s'hi observen les vistes en planta de la corba de nivell, resultants de les diverses seccions d'aquesta amb els plans v igual a 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1 i 0. En les escales graduades dels eixos m_a i m_r , hi apareix explícitament el valor corresponent al punt de tall de la corba amb aquests. Amb la comparació d'aquests valors per a cadascuna de les figures –dividint el valor del punt de tall de l'eix m_a entre el de l'eix m_r –, l'eficàcia relativa del retardant envers l'aigua per a la reducció de la velocitat de combustió pogué ser estudiada. La figura 4.28 mostra l'evolució d'aquesta eficàcia per a diferents valors de v . S'hi evidencia que, per a reduccions fins al 60% de la velocitat de combustió, el retardant és, en mitjana, 3 vegades més eficaç que l'aigua. Tanmateix, aquesta superioritat s'incrementa per a valors de v més petits. Això significa que en la desaparició total de la combustió dels fronts experimentats al laboratori, el retardant pot ser molt més eficient que l'aigua, fins a una mitjana de 16 vegades més per aquest bloc experimental.

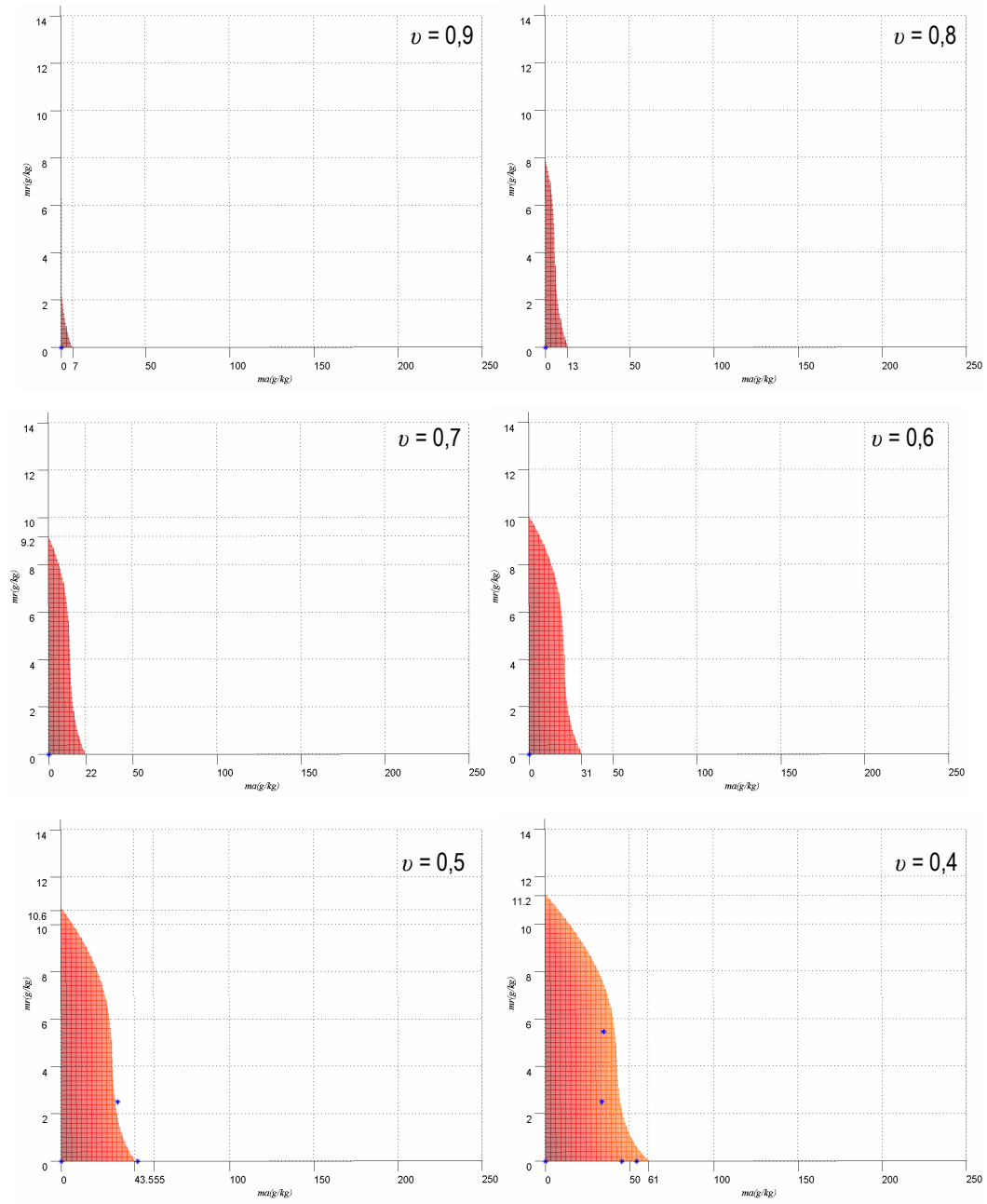


Figura 4.27 Vistes en planta de la corba de nivell per a diferents valors de ν .

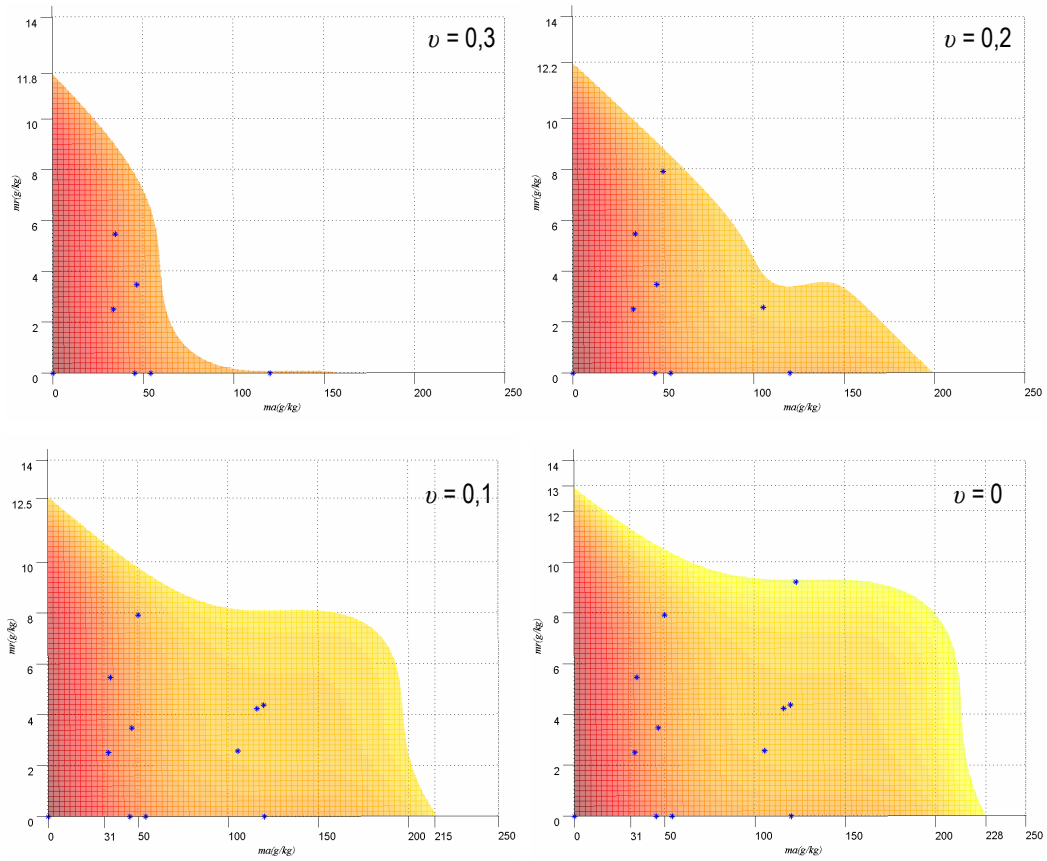


Figura 4.27 (continuació) Vistes en planta de la corba de nivell per a diferents valors de ν .

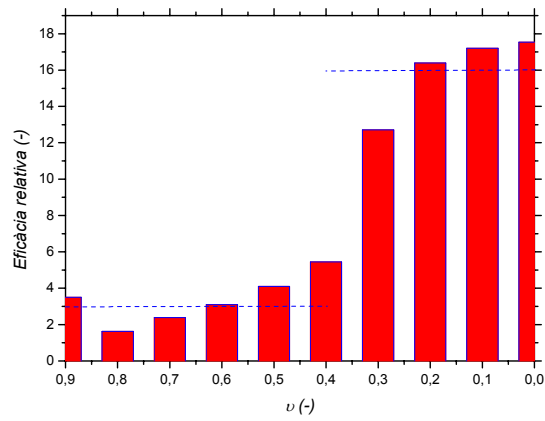


Figura 4.28 Evolució amb ν de l'eficàcia relativa del retardant envers l'aigua per al bloc 1.

4.2.4. Breu estudi sobre la taxa de cendres

De l'anàlisi de la velocitat de combustió mitjançant el sistema de pesatge implementat en la taula d'assaig, en derivà l'aparició d'un paràmetre molt relacionat amb aquesta i també d'interès per aquest estudi. Mesurant el pes de les partícules no cremades presents sobre la superfície de pesatge just després d'un assaig, s'obtingué l'anomenada taxa de cendres χ (%), definida com el percentatge en càrrega de residu no cremat respecte la càrrega de combustible sec inicial. S'estudià l'evolució de la taxa de cendres pels assajos de control primerament, i tot seguit per les proves amb tractament.

Anàlisi de la taxa de cendres dels assajos control

La figura 4.29 il·lustra la representació gràfica de la taxa de cendres dels assajos control per a diferents tipologies de combustible, en funció de la velocitat de combustió mesurada en cadascun d'aquests assajos. S'hi descriu una clara tendència decreixent; a mesura que s'incrementa la velocitat de combustió, la taxa de residus disminueix. Per la majoria de les proves representades, aquesta taxa fou inferior al 10%, la qual cosa indica una reacció de combustió gairebé completa. Les que no quedaren dins d'aquest interval corresponen a proves efectuades amb blat comú vell, amb velocitats inferiors a $2 \text{ g s}^{-1}\text{m}^{-1}$, per tant, foren assajos on la reacció de combustió fou menys eficient.

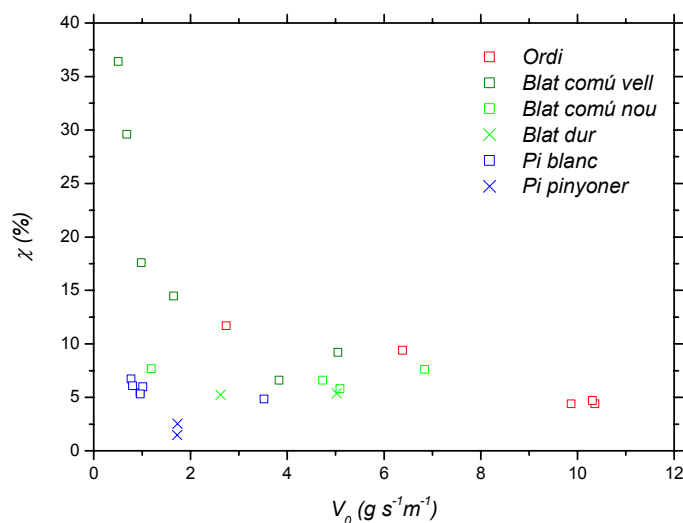


Figura 4.29 Taxa de cendres pels assajos control.

A banda d'aquesta particularitat, també s'hi distingeixen altres diferències pel que fa a la tipologia del combustible representat. Els punts que corresponen a les espècies d'agulles de pi estan situats per sota les espècies caracteritzades amb palla. Aquest fet pot respondre a la major relació superfície-volum de les partícules que composaren els llits de pi pinyoner i el pi blanc, enfront de les espècies de blat i ordi, per bé que entre aquestes darreres no se'n poden diferenciar tendències.

Anàlisi de la taxa de cendres dels assajos amb retardant

Ateses aquestes observacions, l'anàlisi de la taxa de residus per als diferents assajos amb retardant es realitzà a partir de les tendències $v(\chi)$. Així, es graficaren aquestes parelles de valors per als diferents assajos, diferenciant-ne d'una banda el tipus de retardant i de l'altra el tipus de combustible (figura 4.30 a) i b)).

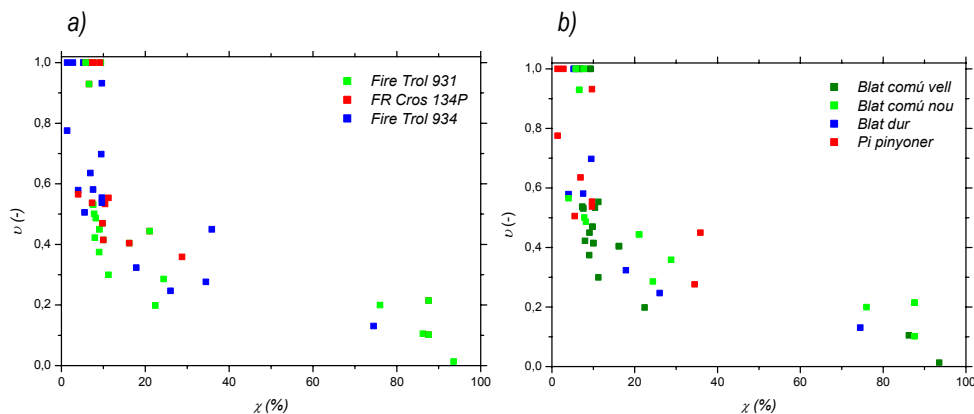


Figura 4.30 Representació de les tendències $v(\chi)$, a) per a diferents tipologies de retardant b) per a diferents tipologies de combustible.

La dispersió en ambdós casos quedà prou evidenciada, de tal manera que, pel programa experimental plantejat, fou impossible distingir el pes específic de la formulació de producte i i del combustible utilitzats, en la generació de partícules no cremades. El que sí quedà palès fou la dependència de χ amb la taxa de reducció de la velocitat de combustió i el seu fort increment per a v baixos (χ tingué valors propers a 90% per a reduccions gairebé totals de la velocitat de combustió).

La figura 4.31 exemplifica aquesta darrera afirmació, amb la representació gràfica de les proves efectuades amb blat comú (vell i nou, indistintament).

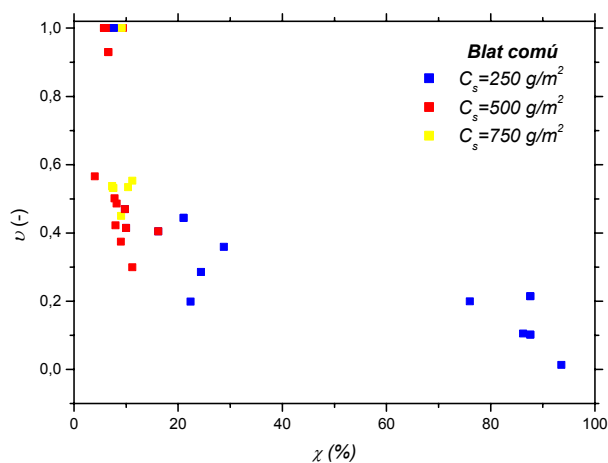


Figura 4.31 Representació de les tendències $v(\chi)$ per a les proves amb blat comú.

Les taxes de reducció de velocitat de combustió compreses entre el 60% i el 40% ($0,4 < v < 0,6$) implicaren un residu inferior al 20% en tots els casos. Aquests punts es referiren majoritàriament a assajos de càrregues corresponents a 500 i 750 g de combustible sec per m^2 . Pel que fa als assajos amb 250 g/m^2 , situats a la part inferior de la gràfica, representaren en la seva majoria taxes de reducció de combustió inferiors a 0,4, la qual cosa implicà una major presència de cendres a l'acabar l'assaig, molt més evident pels assajos més eficaços en quant a reducció de velocitat de combustió, amb valors de v inferiors a 0,2.

4.3. Estudi de la velocitat de propagació

L'avanç d'un front d'incendi és probablement el paràmetre més il·lustrador i intuïtiu del vigor amb què aquest transcorre. La mesura de la distància recorreguda en el temps dona doncs informació molt valuosa en aquest sentit. De la mateixa manera que amb la velocitat de combustió, la propagació dels fronts de laboratori fou estudiada primerament sense l'efecte del retardant i tot seguit contemplant la reducció

provocada pels diferents tractaments per a cada bloc d'experiments. En aquest apartat es detalla aquesta anàlisi, però prèviament s'esmenta la metodologia de càlcul utilitzada per a la mesura d'aquest paràmetre.

4.3.1. Metodologia de càlcul

El procediment experimental executat durant els assajos per a enregistrar les dades de la propagació d'un front consistí, tal i com ja s'ha apuntat en el capítol tercer, en anotar els instants de temps en què el front trencava els fils de cotó, disposats cada 10 cm paral·lels a l'avanç. Aquest mètode permeté obtenir de manera quasi instantània la velocitat de propagació de l'incendi, correlacionant linealment els punts obtinguts tal i com mostra la figura 4.32. De tots els valors enregistrats se'n descartà el primer i l'últim, per tal d'evitar estats transitoris.

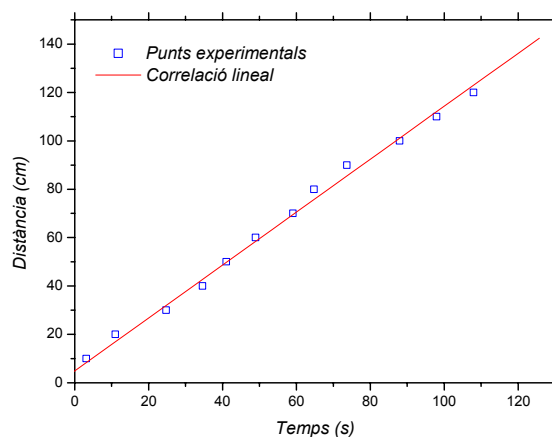


Figura 4.32. Representació gràfica de l'avanç d'un front experimental.

La velocitat de propagació s'obtingué doncs directament calculant el pendent de la recta de correlació. En la figura precedent s'observa una gran linealitat dels punts experimentals, present genèricament en totes les proves, òbviament exceptuant aquelles en què es produí l'extinció del foc i per tant on hi hagué una desacceleració més evident.

Aquest procediment es dugué a terme per a totes les proves executades en els dos laboratoris de treball. Pels blocs experimentals de Barcelona, els assajos de control (és a dir, sense tractament retardant) donaren

com a resultat la velocitat de propagació màxima de la sèrie corresponent. Aquesta es designà amb el paràmetre R_0 (cm/s). Igualment, de les proves amb tractament, la velocitat de propagació calculada es designà amb R (cm/s). Pel que fa als blocs de Coimbra, i ateses les petites diferències de metodologia, tots els assajos donaren sengles valors de R i R_0 , ja que en els primers quaranta centímetres de la taula d'assaig no s'hi aplicà tractament en cap cas. Nogensmenys, s'efectuaren igualment assajos control a tot el llarg de la taula, amb les càrregues de combustible especificades. D'aquesta manera es pogué validar el valor de R_0 amb més nombre de punts experimentals.

Aquesta fou doncs la tècnica emprada per a la mesura de la velocitat de propagació. A més, els valors obtinguts de la velocitat de propagació en tots els assajos de Barcelona es corroboraren mitjançant una metodologia desenvolupada a partir del tractament de les imatges termogràfiques. Aquest procediment fou certament més laboriós però, per altra banda, serví per validar la termografia infraroja com a una tècnica de valuoses i diverses prestacions. La velocitat de propagació es calculà en aquest cas a partir de l'estudi de l'evolució temporal de la temperatura enregistrada per la càmera termogràfica durant el transcurs d'una prova, d'una matriu de punts posicionats sobre el llit de combustible a distàncies conegudes. Aquesta matriu es representa gràficament en la figura 4.33.

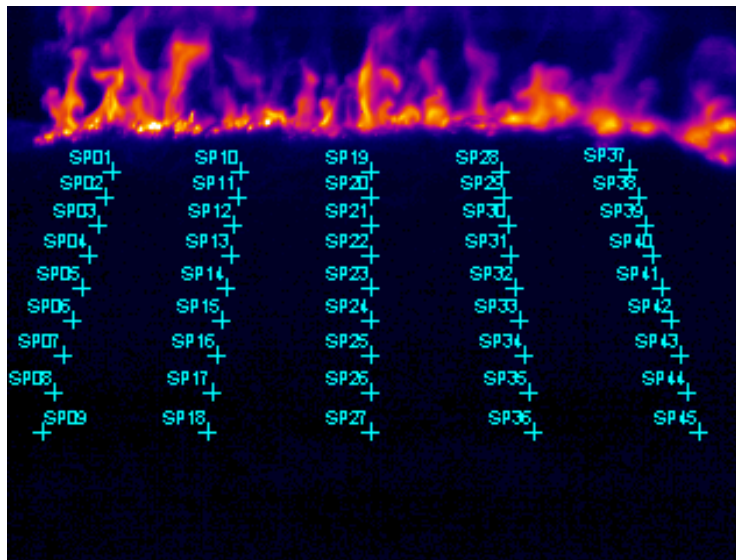


Figura 4.33. Matriu de punts per a l'estudi de la velocitat de propagació mitjançant termografia.

La figura precedent correspon a una extracció d'una de les finestres de treball de *ThermaCAM™ Researcher 2001*, el programari utilitzat al llarg de tot aquest treball per al tractament i estudi d'imatges termogràfiques. Aquest *software* disposa d'una senzilla interfície de dibuix, amb la que es poden representar els punts, les rectes o les àrees sobre les que es vol realitzar l'anàlisi de temperatures. Amb l'ajuda d'una eina tipus CAD, es calculà la perspectiva de les imatges enregistrades i seguidament les posicions exactes dels punts d'estudi. Aquests es marcaren sobre la superfície de pesatge, distribuïts cada 25 cm sobre l'ample d'aquesta, i cada 12,5 cm sobre tota la seva llargària. Així, sortiren un total de 45 punts que, tal i com s'observa en l'anterior imatge, configuraren un total de 5 línies rectes d'avanç sobre les que es calculà la velocitat de propagació.

Una de les múltiples tasques que realitza el programa d'anàlisi termogràfica és la configuració de les corbes temperatura-temps de les zones d'estudi marcades, avaluades durant tota una seqüència temporal d'imatges. En la figura 4.34 es representen les corbes mencionades per als nou punts d'una de les cinc línies d'anàlisi, de la seqüència termogràfica d'un foc de control per al bloc experimental primer. A partir de la separació temporal que s'observa entre les corbes, la velocitat de propagació va poder ser calculada. El criteri emprat s'explica amb l'observació de la figura 4.35, que correspon a l'extracció d'una de les corbes precedents, concretament la corresponent al cinquè punt de la línia, situat exactament al centre de la superfície de pesatge.

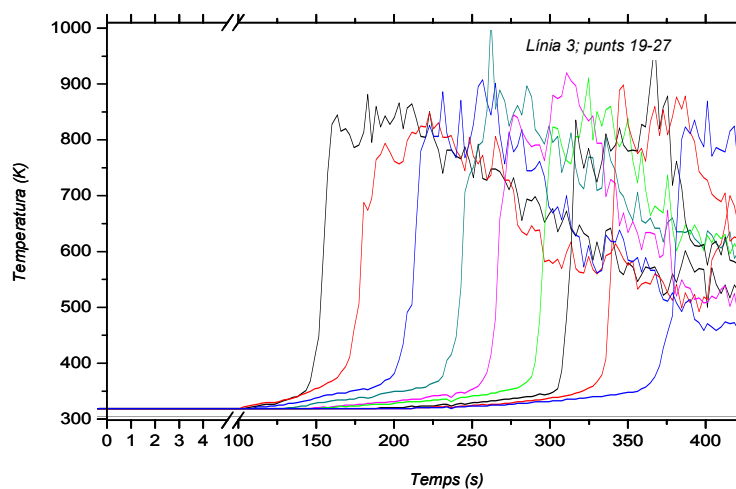


Figura 4.34. Corbes temperatura-temps per als punts situats en la línia tercera, d'un foc de control del bloc primer.

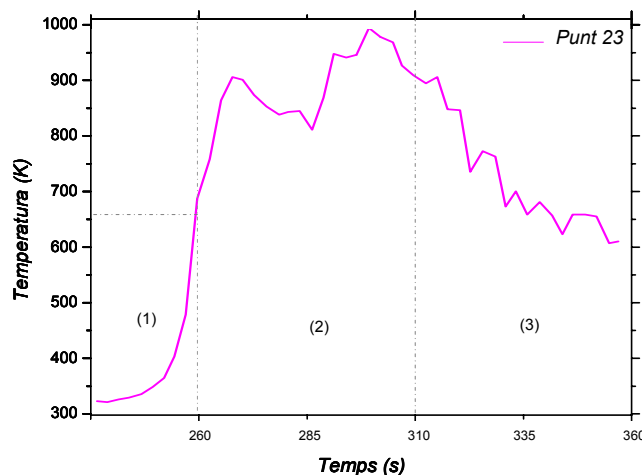


Figura 4.35. Corba temperatura-temps per al punt central de la línia tercera, d'un foc de control del bloc primer.

Aquesta pot ser certament una corba tipus de les que es generaren amb el programa *ThermaCAM™ Researcher 2001*. L'evolució de la temperatura en el temps per a qualsevol punt del llit de combustible pot ser discretitzada en tres fases. D'un banda, aquesta dinàmica comença amb una ràpida ascensió de la temperatura, corresponent al temps requerit per a l'ignició. Seguidament, durant l'inici de la segona fase d'evolució corresponent a la fase de combustió, la temperatura segueix incrementant-se, però a una velocitat considerablement menor, fins a arribar a un cert valor màxim, generalment relatiu. A partir d'aquest valor i durant tot el temps en què es manté la reacció, la temperatura oscil·la, de tal manera que poden anar-se detectant nous màxims relatius i, òbviament, el màxim absolut de temperatura d'aquesta evolució. Finalment, a l'anar-se aturant la combustió, la temperatura decreix suaument. Aquesta correspon a la tercera i última fase d'anàlisi.

Atesa aquesta tendència, la velocitat de propagació s'obtingué detectant l'instant d'impàs de la fase primera a la segona, per a cadascun dels punts d'una mateixa línia. Aquesta detecció es realitzà observant amb deteniment les imatges visibles per a veure l'instant d'ignició i, a més, analitzant la variació del pendent de creixement de la temperatura –en la figura precedent se senyala just aquest punt, en l'instant en què es dóna una disminució evident del pendent de la corba–. Per als focs de les sèries experimentals efectuades amb càrregues en base seca de 750 g/m^2 , aquest punt es trobà una mica per sobre dels 600 K per als focs de control, amb una certa tendència a la baixa a mesura que s'incrementà la quantitat de retardant aplicada.

Per als assajos amb $C_s = 500 \text{ g/m}^2$, el valor dels focs de control fou una mica inferior als 600K i també disminuï amb l'aplicació de tractament. Finalment, els assajos amb $C_s = 250 \text{ g/m}^2$, la temperatura dels focs de control oscil·là sobre els 400K.

Finalment, un cop detectat l'instant d'ignició per a cadascun dels punts d'una recta d'avanç, i donats la distància entre ells corresponent a 12,5 cm, es calculà la velocitat de propagació per a cada línia, i la mitjana de les cinc. La figura 4.36, il·lustra la bona correlació d'ambdues metodologies per a tots els assajos analitzats (blocs experimentals primer i segon). D'aquesta manera s'observa que tots els punts queden inclosos dins a la regió central de la gràfica, des d'on s'observa la correspondència entre els dos mètodes. La diferència entre les valors de velocitat de propagació obtinguts per les dues metodologies en cap cas fou superior al 6%, així, el valor mitjà d'aquesta diferència estigué posicionat al 3,6%.

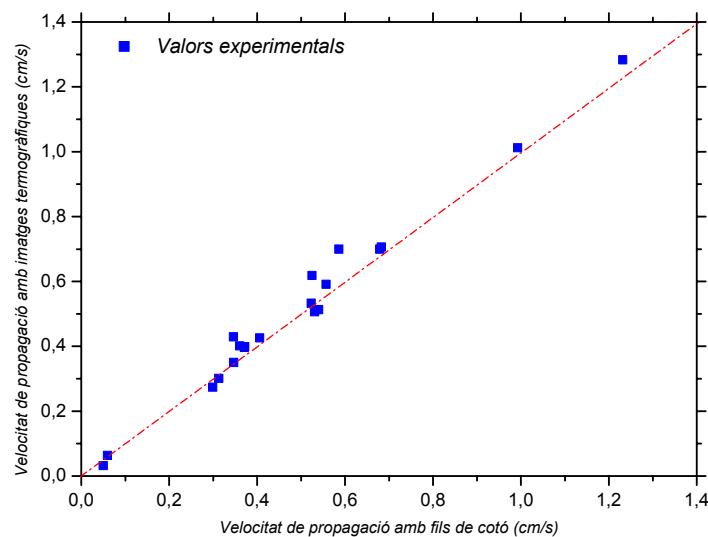


Figura 4.36. Anàlisi comparativa dels dos mètodes emprats per al càlcul de la velocitat de propagació.

4.3.2. Anàlisi de la velocitat de propagació dels assajos control

De la mateixa manera que amb la velocitat de combustió, es procedí a analitzar l'efecte dels diferents paràmetres del combustible sobre la variable d'estudi referida a la velocitat de propagació. S'estudià

primerament la influència de la càrrega, la densitat aparent i l'altura, per tal de dur a terme anàlisis comparatives paral·leles entre les dues velocitats.

Efecte de la càrrega, la densitat aparent i l'altura del llit de combustible

La figura 4.37 inclou les representacions gràfiques dels punts experimentals de la velocitat de propagació en funció de la càrrega i les tendències descrites per aquests, pels assajos control duts a terme amb les diferents tipologies de combustible. L'analogia amb la figura 4.6 és doncs prou evident. Tanmateix, la informació recopilada en l'anàlisi de les gràfiques 4.6 pot ser complementada amb noves afirmacions derivades de la figura actual. Per bé que, de la mateixa manera que amb V_0 , la velocitat de propagació s'incrementa amb la càrrega (4.37 a)) i amb la densitat aparent (4.37 b)) i ho fa de la mateixa manera comparativament per espècies, cal diferenciar-ne certament la tendència.

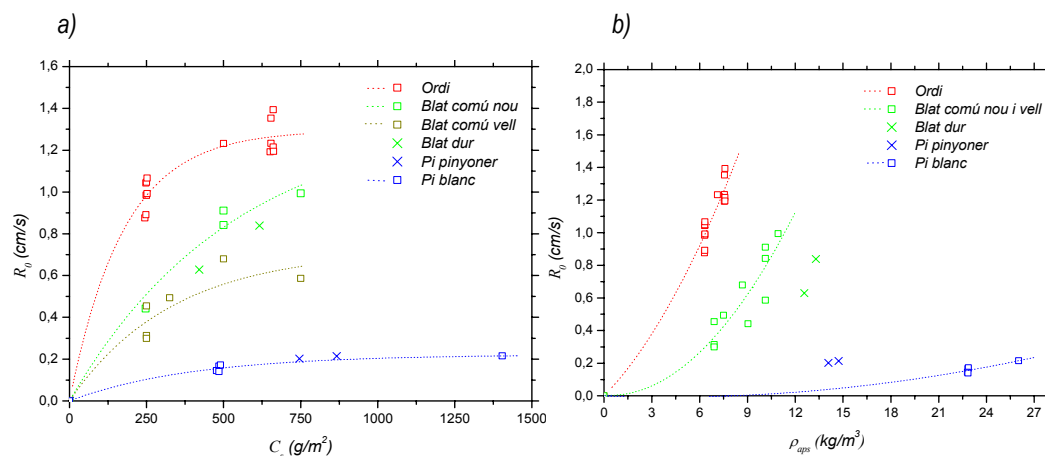


Figura 4.37. Efecte de l'increment de a) la càrrega de combustible i b) la densitat aparent del llit, en la velocitat de propagació.

Tot i l'ascens pràcticament lineal de V_0 amb la càrrega, l'evolució d' R_0 amb aquest paràmetre descriu una certa desacceleració. L'increment del combustible fins a estadis inferiors al grau de compacitat òptima, fa incrementar linealment la velocitat de combustió per les raons que s'han descrit amb anterioritat. Nogensmenys, aquest increment no es tradueix proporcionalment a la velocitat de propagació. El mecanisme de transferència de calor dominant en aquesta tipologia de focs experimentals és la radiació.

Atenent el rang experimental dels paràmetres estudiats, el fet d'incrementar la quantitat de combustible i, consegüentment la velocitat de combustió, no implica necessàriament una mateixa velocitat de creixement de la potència calorífica radiant del front. Com a conseqüència, tampoc s'accelera en la mateixa proporció el preescalfament del combustible adjacent al front i per tant, la velocitat de propagació. Aquest fet queda també reflectit en la figura 4.37 b), on l'evolució de la velocitat de propagació amb la densitat descriu un pendent menys pronunciat que l'observat en la mateixa relació amb V_o (figura 4.6 b)).

Pel que fa a l'evolució $R_o(h)$ representada en la figura 4.38, novament es fa pràcticament impossible tant la detecció de tendències diferenciades per espècies, com l'observació d'una clara linealitat global de la velocitat de propagació amb l'altura, per bé que sí que és evident una certa tendència incremental.

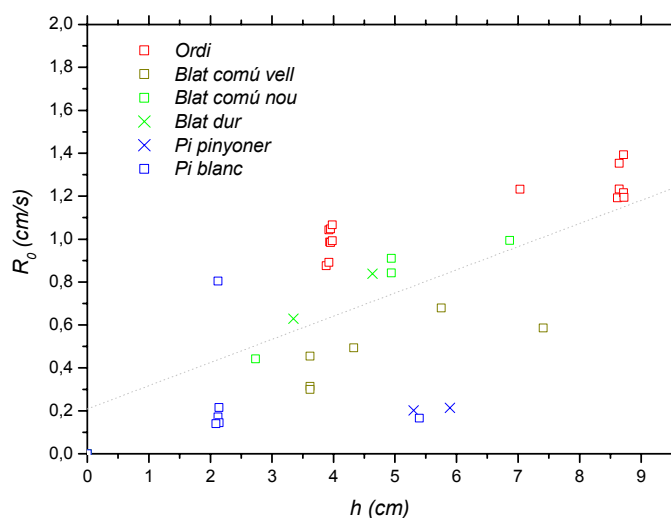


Figura 4.38. Efecte de l'increment de l'altura del llit de combustible en la velocitat de propagació.

Efecte combinat de les diverses característiques dels combustibles sobre la velocitat de propagació

A continuació, s'estudiaren els efectes combinats dels diferents paràmetres del combustible sobre la velocitat de propagació dels assajos control. La metodologia utilitzada fou exactament la mateixa que la dissenyada per la velocitat de combustió. En aquest cas, però, la matriu M presentà lleugeres diferències respecte l'expressió (4.2):

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0,829 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0,818 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0,817 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0,756 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Si bé els coeficients de correlació foren lleugerament inferiors que els de la matriu (4.3), no fou aquesta la diferència més notable. En el cas de l'anàlisi de la velocitat de propagació, la combinació de paràmetres que presentà una linealitat més gran és la que s'expressa tot seguit:

$$R_0 \left(\frac{\eta \sigma h}{\rho_m Hs} \right) \quad (4.8)$$

Certament, la combinació de paràmetres que presentà tot després d'aquesta una major linealitat fou la mateixa que en el cas d'anàlisi de la velocitat de combustió. Ambdues només es distingeixen amb la inclusió o omissió del PCS, i, tot i que les diferències en sengles coeficients de correlació és molt petita, aquest fet és indicador d'un relatiu pes específic del poder calorífic, enfront la resta de paràmetres. La dependència expressada en (4.8) es representa gràficament en la següent figura (4.39).

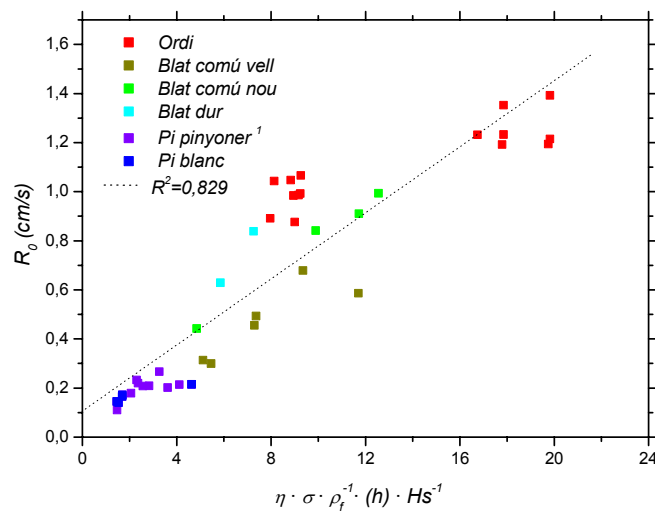


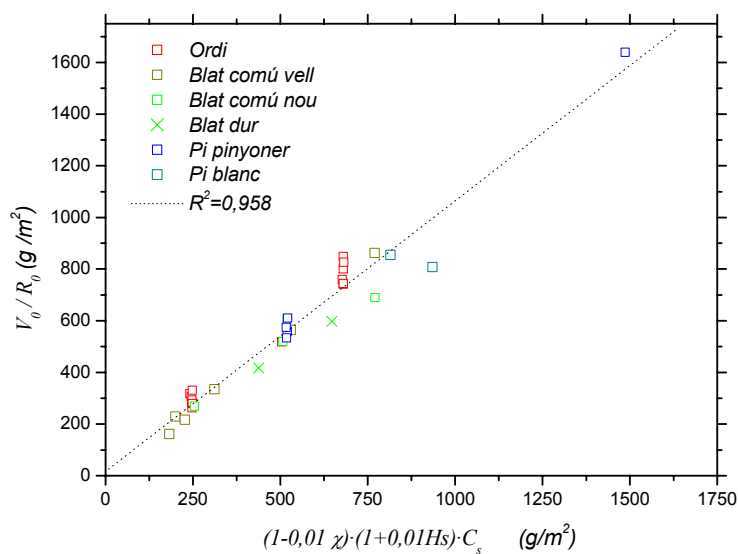
Figura 4.39. Representació de la linealitat observada entre R_0 i la combinació de paràmetres seleccionada. ¹En la sèrie de pi pinyoner s'hi inclogueren un recull de dades d'assajos control amb aquest combustible extrets de Viegas (2003).

4.3.3. Relació entre la velocitat de combustió i la velocitat de propagació

En aquest estadi d'anàlisi, un cop estudiats a partir d'assajos control dos dels paràmetres essencials del comportament dels incendis, es dugué a terme una comparativa d'ambdós, per tal de corroborar la validesa dels resultats. A partir d'un senzill raonament conceptual i una anàlisi dimensional amb les unitats que corresponen a cadascuna d'aquestes dues variables, s'arriba a l'expressió que segueix:

$$V_0 = \left(1 - \frac{\chi}{100}\right) \left(1 + \frac{H_s}{100}\right) C_s R_0 \quad (4.9)$$

Així, els grams disponibles per a la combustió expressats com la quantitat total de matèria combustible –és a dir la càrrega seca, més la humitat, menys el contingut en cendres– en g/m^2 de llit, multiplicats per la velocitat de propagació, expressada en m/s , dóna com a resultat la velocitat de combustió expressada en $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, avaluada per metre lineal de front. Aquesta expressió fou testada amb les dades experimentals dels assajos control per a cada tipus de combustible i representada gràficament amb uns eixos de coordenades on les abscisses correspongueren al combustible disponible i les ordenades a la relació entre les dues velocitats (figura 4.40). El coeficient de correlació R^2 obtingut tingué el valor de 0,958.



4.3.4. Anàlisi de l'efecte del retardant sobre la velocitat de propagació

Després d'analitzar els assajos de control, s'estudià l'efecte dels retardants sobre la velocitat de propagació per a tots els blocs experimentals. La metodologia d'anàlisi seguí la mateixa pauta que en cas de la velocitat de combustió. No obstant això, cal fer una apreciació respecte les variables d'anàlisi emprades.

Certament s'utilitzaren els mateixos paràmetres; m_a (g/kg) per a designar la quantitat d'aigua aplicada, m_r (g/kg) per la quantitat de retardant i el factor de reducció de la velocitat de propagació (R/R_0) designat, en aquest cas amb la lletra ω . No obstant això, els valors numèrics de m_a i m_r d'un mateix assaig pogueren diferir lleugerament respecte als calculats per a l'anàlisi de l'efecte dels tractaments sobre la velocitat de combustió. Aquest fet respon únicament a un criteri de rigorositat. Els valors de m_a i m_r per a l'estudi de v foren calculats a partir dels pesos enregistrats per les balances durant el procés d'aplicació del tractament. D'aquesta manera, únicament es tingué en compte la quantitat de tractament posicionat sobre la superfície de pesatge per a l'anàlisi de V . Per bé que amb la dosificació manual de retardant s'assolí una homogeneïtat acceptable de la distribució de tractament sobre tot el llit de combustible per a totes les proves, es tingué en compte, pel cas d'anàlisi de la velocitat de propagació, la quantitat total d'aigua i retardant aplicada. Aquestes quantitats es determinaren a partir del còmput final del volum total de mescla aplicat, mitjançant la lectura de l'escala graduada del dosificador. Les diferències foren certament subtils i puntuals, però en tot cas es tingueren en compte pel fet de treballar amb quantitats tan petites.

Reducció de la velocitat de propagació per blocs experimentals

La primera anàlisi de l'efecte del tractament sobre la disminució de la velocitat de propagació es dugué a terme per blocs, a partir del càlcul de les corbes de nivell experimentals ja presentades en l'estudi de la velocitat de combustió. En les figures que es mostren a continuació (figures 4.41-4.46) s'observa cadascuna d'aquestes corbes interpolades a partir dels punts experimentals per als sis blocs diferents. Les consideracions tingudes en compte en l'anàlisi de la velocitat de combustió pel que fa a aquesta etapa, es mantingueren igualment per a la velocitat de propagació. De fet, l'analogia entre aquestes figures i les precedents 4.11, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 i 4.17 així ho evidencia.

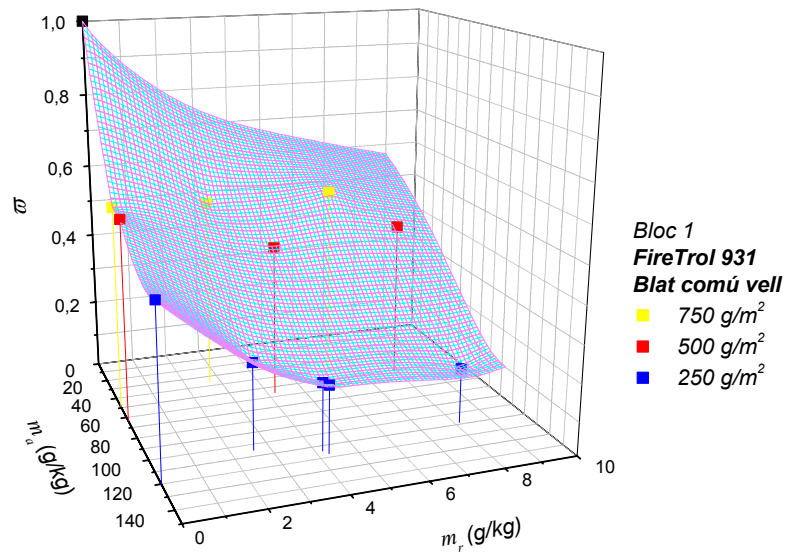


Figura 4.41. Taxa de reducció de la velocitat de propagació per al primer bloc experimental.

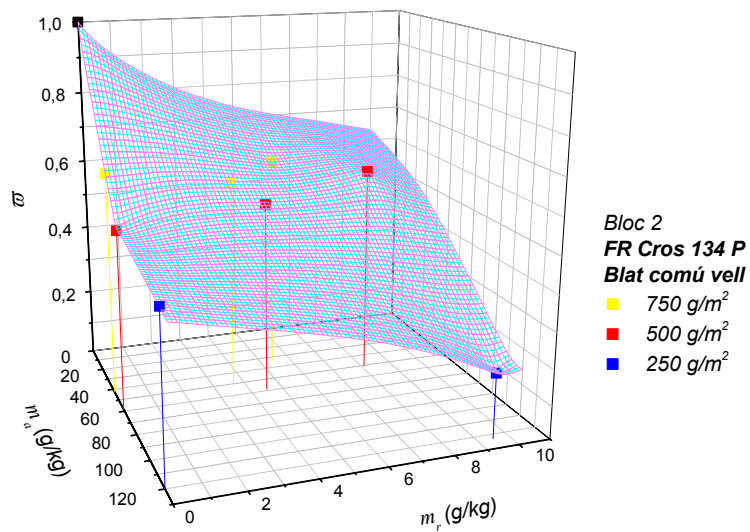


Figura 4.42. Taxa de reducció de la velocitat de propagació per al segon bloc experimental.

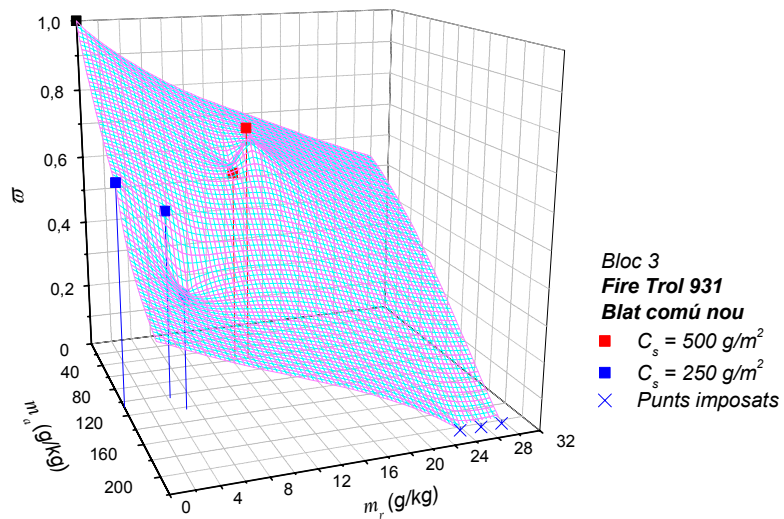


Figura 4.43. Taxa de reducció de la velocitat de propagació per al tercer bloc experimental.

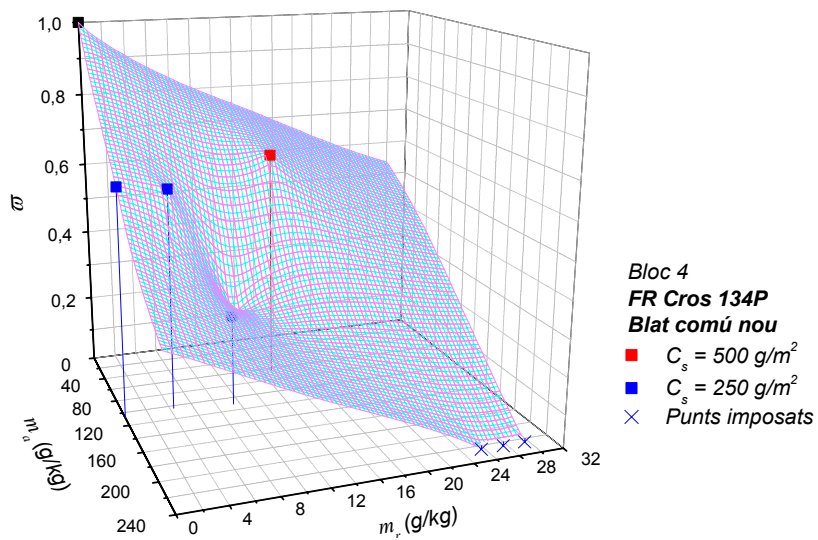


Figura 4.44. Taxa de reducció de la velocitat de propagació per al quart bloc experimental.

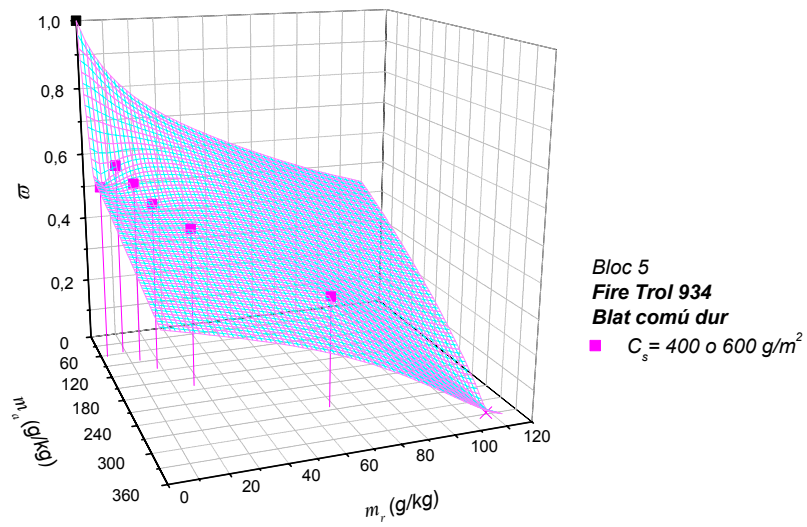


Figura 4.45. Taxa de reducció de la velocitat de propagació per al cinquè bloc experimental.

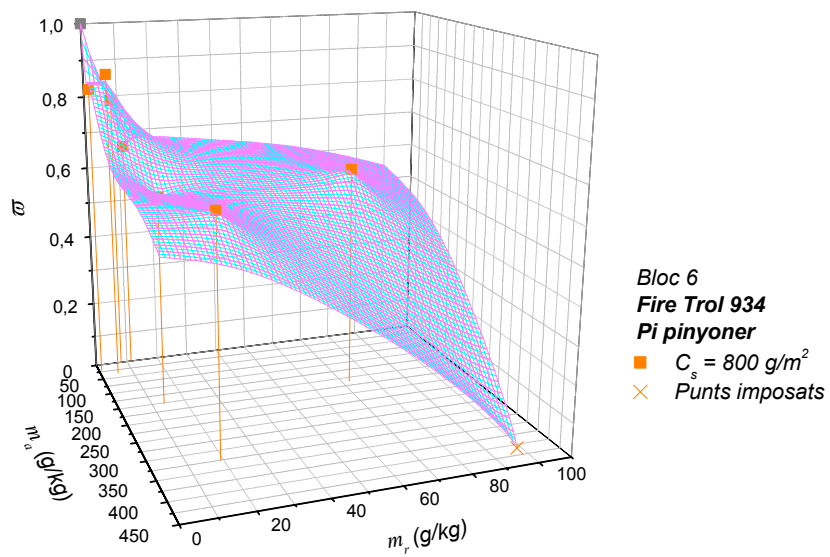


Figura 4.46. Taxa de reducció de la velocitat de propagació per al sisè bloc experimental.

Anàlisi comparativa entre blocs

Un cop generades les sis corbes experimentals de nivell, es procedí a realitzar l'anàlisi comparativa entre blocs, per tal de validar les afirmacions observades en l'estudi de la velocitat de combustió. Així mateix, es representaren sota les mateixes coordenades les parelles de corbes dels blocs experimentals 1 i 2, realitzats ambdós amb blat comú vell però diferint en el tipus de retardant (figura 4.47).

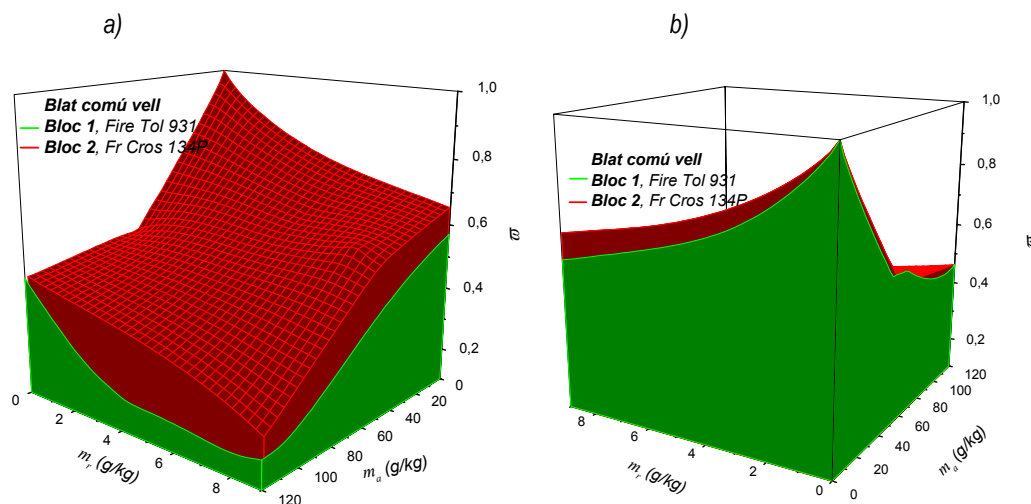


Figura 4.47. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als dos primers blocs experimentals, realitzats amb blat comú vell.

Novament s'observà una major eficàcia en la reducció de la velocitat de propagació del retardant Fire Trol 931, en front del FR Cros 134P. Afirmació que es confirmà també en la següent anàlisi per parells (bloc 3 i 4, figura 4.48). De la mateixa manera que en l'estudi de la velocitat de combustió es detectà aquesta diferència però certament molt més suavitzada en els blocs experimentals amb blat comú nou, fet que portà a corroborar les característiques més robustes del retardant FR Cros 134P davant de possibles canvis de combustible. La següent anàlisi, derivada del creuament de les dues anteriors, ajuda a il·lustrar aquesta conclusió. Aleshores, per un banda es representaren conjuntament les corbes de nivell per als blocs 1 i 3, realitzats amb Fire Trol 931 (figura 4.49) i seguidament es féu el mateix pels blocs 2 i 4 amb FR Cros 134P (figura 4.50).

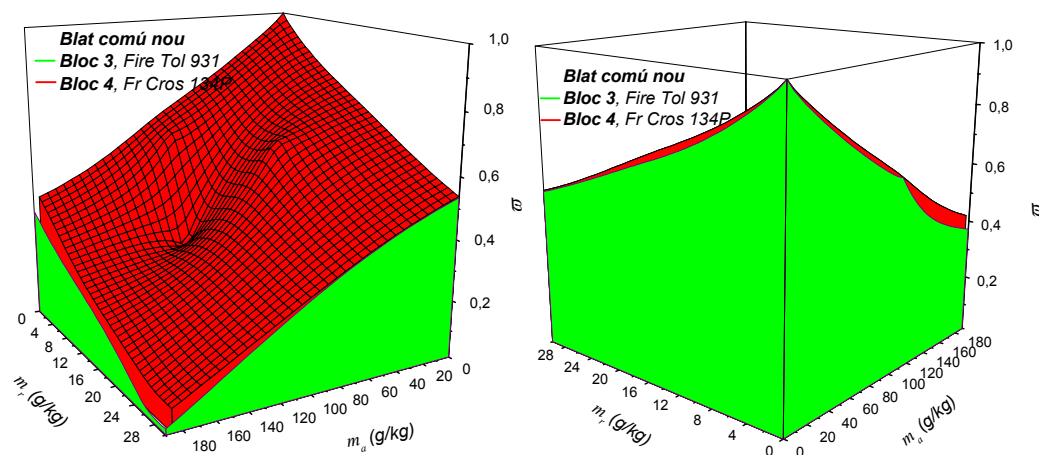


Figura 4.48. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 3 i 4, realitzats amb blat comú nou.

D'aquesta manera s'observà la major proximitat relativa entre les corbes generades a partir dels blocs 2 i 4 amb FR Cros 134P respecte la proximitat entre les corbes dels blocs 1 i 3. Per bé que aquesta sigui una diferència certament lleugera, deixa en evidència la gran quantitat d'aspectes referits a l'eficàcia dels retardants que poden ser estudiats amb aquesta metodologia.

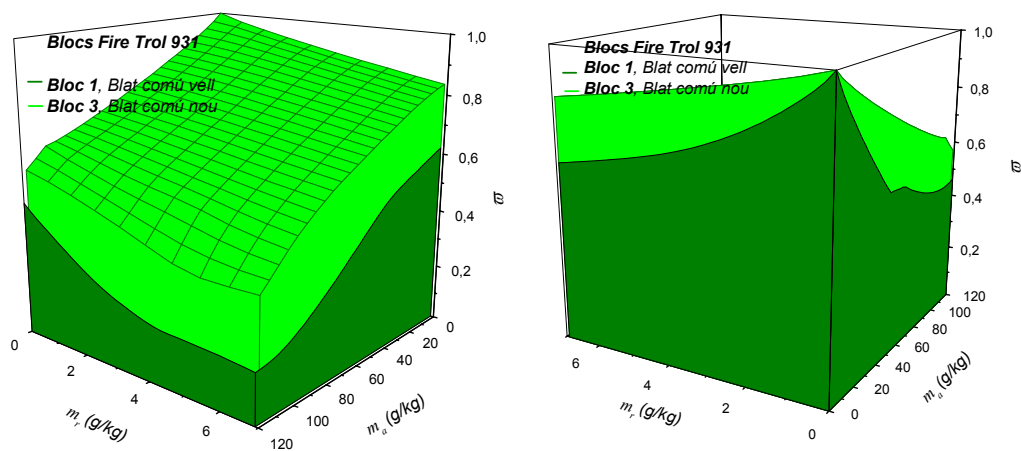


Figura 4.49. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 1 i 3, realitzats amb Fire Trol 931.

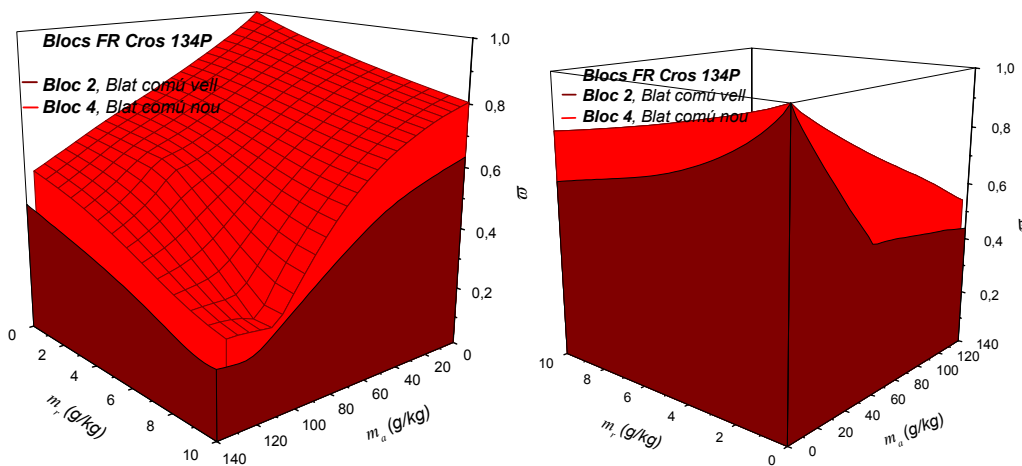


Figura 4.50. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 2 i 4, realitzats amb Fire Trol 934.

Tot seguit, es representaren les corbes de nivell de la variació de la velocitat de propagació dels blocs realitzats amb Fire Trol 934. Aquest fou l'únic cas on s'observaren relatives diferències respecte les tendències definides en l'anàlisi de la velocitat de combustió. En la figura 4.51 on aquests dos darrers blocs hi són representats, s'hi observa amb claredat un cert creuament dels dos blocs.

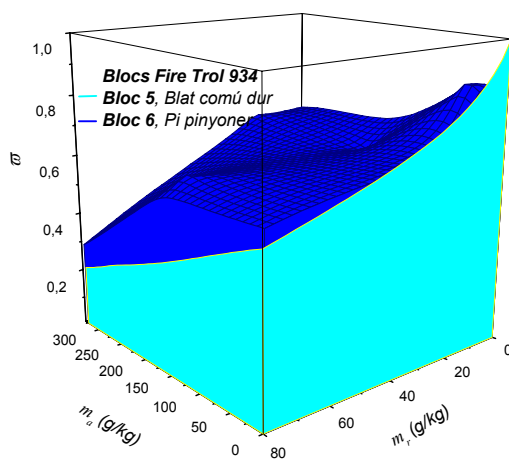


Figura 4.51. Vistes a) frontal i b) posterior de les corbes de nivell per als blocs experimentals 5 i 6, realitzats amb Fire Trol 934.

Per a poques quantitats de retardant, la figura il·lustra la major eficàcia d'aquest en reduir la velocitat de propagació del pi pinyoner i, a mesura que s'incrementa el tractament, s'inverteix la tendència quedant la corba del bloc sisè posicionada per damunt de la del bloc cinquè. Per bé que caldria un treball experimental més rigorós i aprofundit per a estudiar aquesta tendència, sí és cert que la metodologia d'anàlisi de resultats desenvolupada permet, si més no, detectar aquestes possibles diferències de comportament.

Finalment es representaren conjuntament les sis corbes de nivell experimentals referides a la reducció de la velocitat de propagació (figura 4.52)

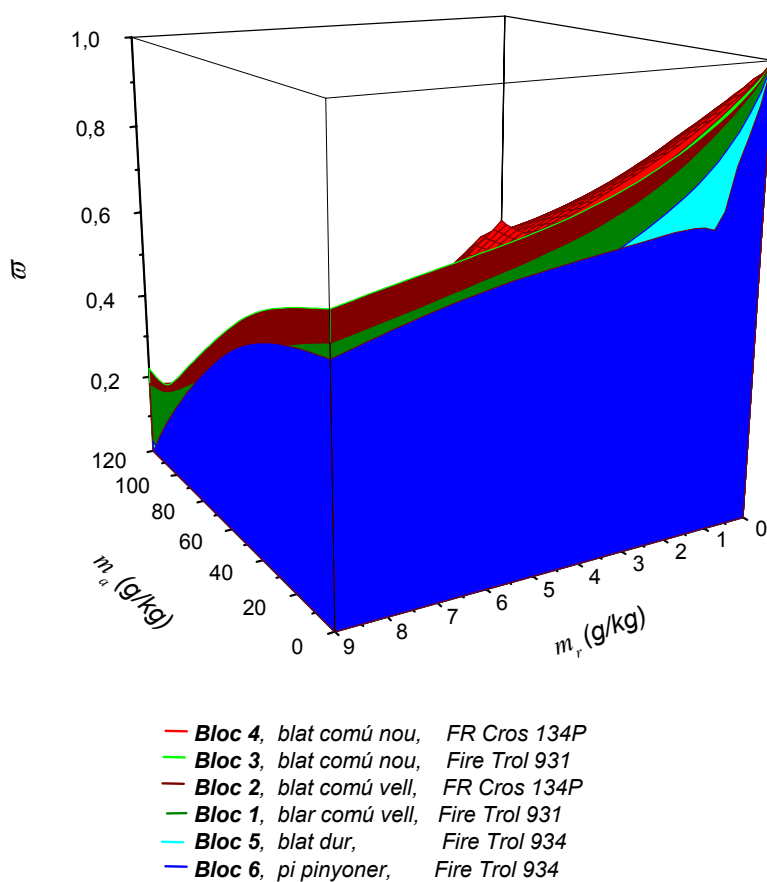


Figura 4.52. Corbes de nivell per al conjunt de tots els blocs experimentals.

Amb aquesta darrera representació, s'observà la proximitat entre els blocs primer i cinquè. En l'anàlisi de la velocitat de combustió ja s'hi intuï un cert solapament (figura 4.23) que es traduí, en el cas de la velocitat de propagació, en una inversió en l'ordre d'ambdós pel que fa a l'eficàcia en la disminució de ω . La llegenda de la precedent figura així ho reflecteix.

Modelització de la funció $\omega(m_r, m_a)$

La clara correspondència de la metodologia d'anàlisi desenvolupada per a l'estudi de la velocitat de combustió per a tractar ara els resultats obtinguts en la velocitat de propagació, determinaren el fet d'emprar els mateixos criteris en el procés de modelització de funció $\omega(m_a, m_r)$. Així doncs, es realitzaren els mateixos passos i es tingueren en compte les mateixes restriccions per tal de trobar una expressió genèrica que respongués a la variació de la velocitat de propagació en funció del tractament conjunt d'aigua i retardant aplicat.

En aquest cas, la funció tridimensional que millor s'ajustà als punts experimentals també derivà de la conjunció de dues famílies de corbes polinòmiques de tercer ordre. La que correspon al bloc experimental primer s'expressa tot seguit:

$$\omega = 1 - 0,0968 m_r + 0,011529 m_r^2 - 0,000513 m_r^3 - 0,01278 m_a + 0,0001016 m_a^2 - 2,679 \cdot 10^{-7} m_a^3 \quad (4.10)$$

La morfologia d'aquesta funció i la seva correspondència amb els punts experimentals s'observa en la figura 4.53. En aquest cas, el coeficient R^2 de correlació prengué per valor 0,894. D'aquesta manera, també es pogué dur a terme, per tal de completar aquesta anàlisi, un estudi compartiu de l'eficàcia relativa del retardant envers l'aigua. S'avaluaren els punts de tall de la funció $\omega(m_a, m_r)$ amb els plans $(0, m_a)$ i $(m_r, 0)$ per a les diferents seccions de la funció posicionades atenent els mateixos increments que els definits pel cas de v . S'anitzaren els deu plans (m_a, m_r) per a valors de ω decreixents de 0,9 a 0 que permeteren representar amb un diagrama de barres l'evolució d'aquesta eficàcia relativa (figura 4.54). En aquest cas, per bé que s'observà per a valors de ω fins a 0,4 una eficàcia relativa de l'aigua major que en el cas d'estudi de la velocitat de combustió (de l'ordre de 5), aquesta no fou tant gran en les últimes fases de reducció de ω . En aquest cas, l'eficàcia relativa fou de l'ordre de 13.

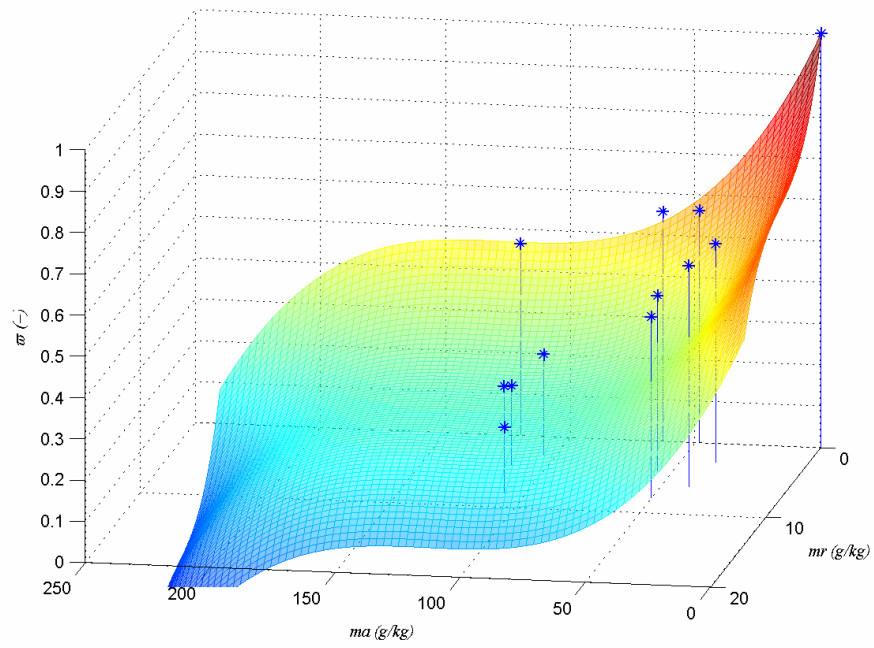


Figura 4.53. Representació gràfica de la corba de nivell modelitzada i dels punts experimentals per a la sèrie primera.

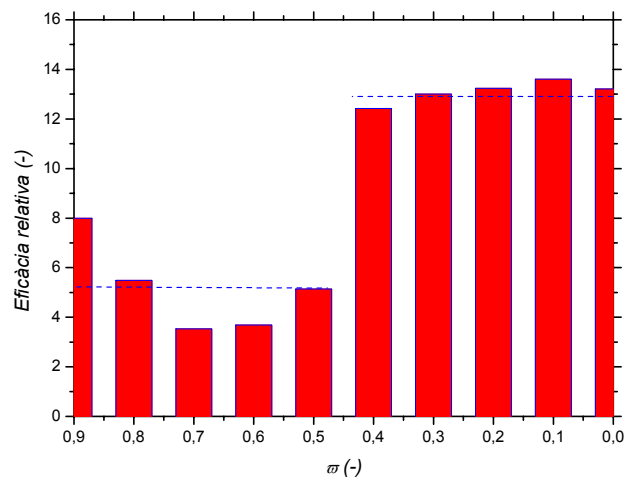


Figura 4.54. Evolució amb ω de l'eficàcia relativa del retardant envers l'aigua per al bloc 1.

4.4. Estudi de la temperatura i de la potència calorífica radiant

El darrer aspecte a estudiar de l'experimentació al laboratori fou la variació de les temperatures i de la potència calorífica radiant entre els diferents assajos, atesos els diferents tractaments aplicats. Per a realitzar aquesta anàlisi s'utilitzaren les proves del bloc primer, dut a terme a Barcelona. Tot seguit s'explica amb detall la metodologia emprada per aquest estudi així com els diferents paràmetres implicats.

4.4.1. Metodologia

L'enregistrament durant l'experimentació es dugué a terme des de la posició indicada en el capítol 3, a una velocitat d'adquisició de 5 imatges per segon. En la figura 4.55 es recullen tres instants corresponents a un foc de control, visualitzats mitjançant termografia.

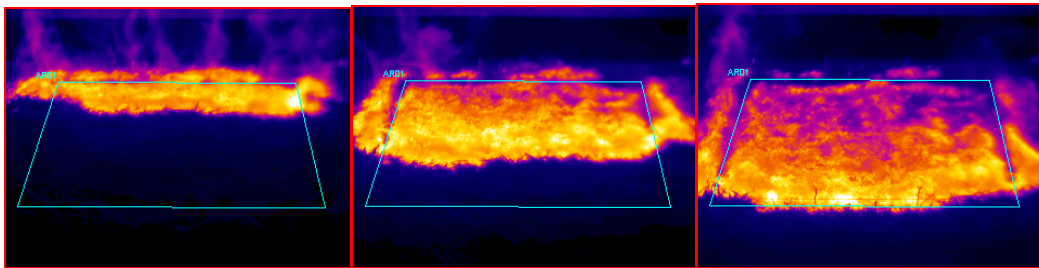


Figura 4.55. Imatges termogràfiques de l'evolució d'un front.

De l'observació d'aquestes imatges se'n desprèn que la intensitat de radiació captada per la càmera es pot expressar mitjançant la següent expressió:

$$I_t = I_f + \tau_f I_b \quad (4.11)$$

On:

- I_t Intensitat de radiació total captada per la càmera, W/m².
- I_f Intensitat de radiació de les flames, W/m².
- τ_f Transmissivitat de les flames, -.
- I_b Intensitat de radiació del cos negre, W/m².

La càmera de termografia rep la radiació emesa per les flames i la transmesa per aquestes, provenint del llit de combustible en ignició, considerat com un cos negre. La preponderància d'aquesta energia transmesa envers l'emissió del front de foc s'observa també en les imatges precedents, ja que el contorn de les flames queda completament diluït, fet que respon a la llur baixa emissivitat, donat el gruix del front experimental. A Planas-Cuchi *et al.* (2003) es desenvolupa teòricament aquesta situació i a Pastor *et al.* (2002) se'n fa una aplicació referida a l'experimentació en incendis forestals. En l'annex I se'n resumeix llur contingut.

Així doncs, l'estudi de temperatures i de calor es realitzà atesa aquesta puntualització. Els resultats que s'obtingueren d'ambdós paràmetres no corresponen exactament al llit de combustible incandescent ni al front de flames en particular, sinó a la interacció d'ambdós fonts d'energia que, d'altra banda, és el que rebria un observador exposat al front experimental, situat en la posició de la càmera termogràfica.

De la filmació obtinguda de cada experiment, se'n seleccionaren les imatges corresponents per tal de dur a terme l'estudi termogràfic. Així, es prengué una imatge cada 15 segons durant el pas del front per la placa de pesatge, delimitada en la figura precedent amb una línia blava. La finalitat última d'aquest estudi fou la de quantificar el refredament ocasionat pel tractament de retardant en un front de foc. Per a llur consecució, es feu, en primer lloc, una anàlisi aprofundida dels punts calents enregistrats en la imatge, tant pel que fa a la seva grandària com a la distribució de temperatures.

Es definí com a punt calent aquell amb una temperatura superior a 600 K, valor considerat per a la majoria d'autors com a la temperatura d'ignició del combustible forestal (Pyne, 1996; Dupuy, 1997; Mercer i Weber, 2001). Amb la utilització del programa *ThermaCAM™ Researcher 2001* se'n dugué a terme la seva detecció i dimensionament. La figura 4.56 il·lustra el tractament d'una imatge termogràfica en aquest sentit. S'hi observa una taca de forma irregular configurada pels punts calents detectats en un instant concret. Aquesta taca és acolorida segons l'escala present a la dreta de la figura, en funció de la seva temperatura, i pot ser dimensionada mitjançant una aplicació específica del programari mencionat. Així, s'obtingué l'evolució de la grandària de la taca durant tot el transcurs del foc i se'n calculà la mida mitjana per a cada assaig. La figura 4.57 il·lustra la representació gràfica conjunta de tres assajos inclosos dins la sèrie experimental primera ($C_s = 250 \text{ g/m}^2$ tractat amb FIRE TROL 931). A l'eix d'ordenades s'hi representa l'àrea ocupada per la taca, expressada en m^2 multiplicat per 100, i a l'eix d'abscisses el recorregut del front per damunt de la placa, en percentatge.

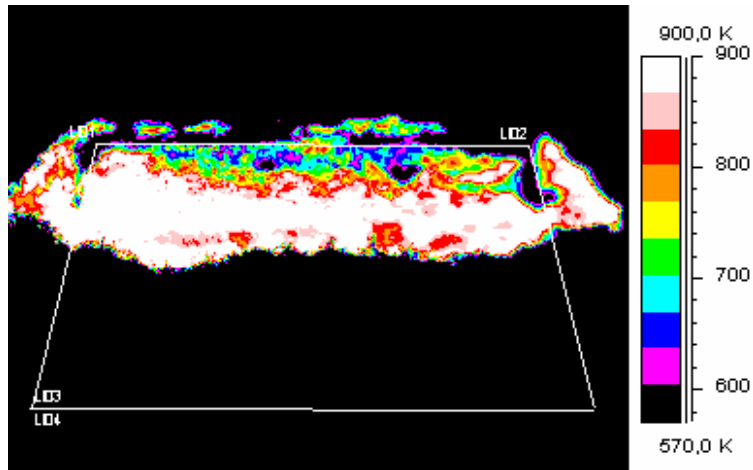


Figura 4.56. Taca de punts calents en un instant del pas del front per la placa de pesatge.

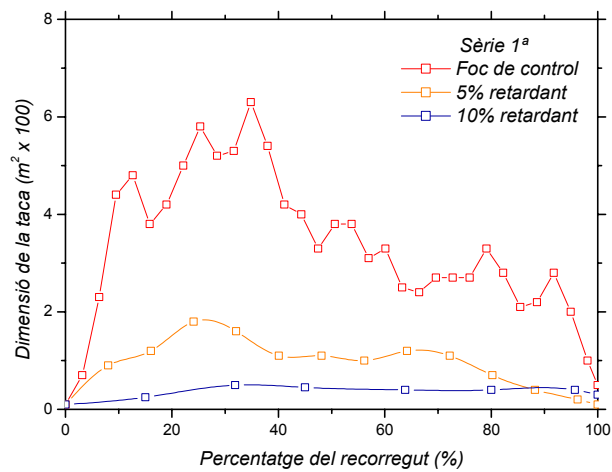


Figura 4.57. Evolució temporal de la grandària de la taca formada pels punts calents, per a tres assajos de la sèrie 1.

Amb aquest primer pas del procediment es definí el paràmetre γ , per tal de quantificar la reducció de la grandària de la taca per efecte del retardant. Així, γ pren la forma:

$$\gamma = \frac{A_t}{A_{t_0}} \tag{4.12}$$

On:

- γ Taxa mitjana de reducció de la taca de punts calents, -.
- A_t Àrea calenta d'un assaig amb retardant, m².
- A_{to} Àrea calenta d'un assaig de control, m².

Seguidament s'analitzà la distribució de temperatures dins la taca. Es determinaren els percentatges de punts inclosos dins els següents intervals de temperatura (K): [600-700], [700-800], [800-900] i [>900], per a cada imatge de les seleccionades i se'n representà la seva evolució temporal mitjançant gràfiques com la representada en la figura 4.58.

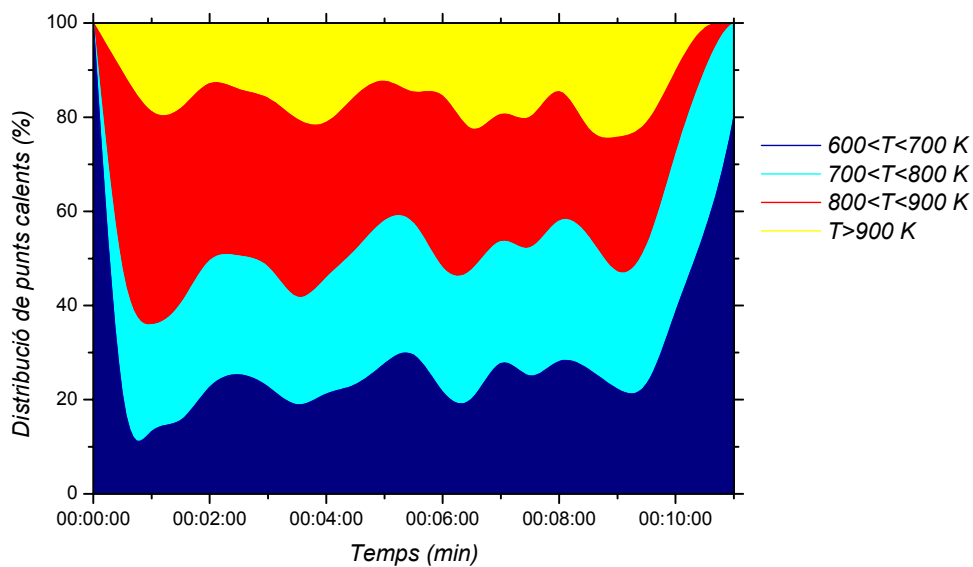


Figura 4.58. Evolució temporal de la distribució percentual de temperatures durant el pas del front.

Els percentatges calculats es designaren amb els paràmetres p_1 , p_2 , p_3 i p_4 , corresponents als quatre intervals analitzats per als focs de control i p_1' , p_2' , p_3' i p_4' per als mateixos intervals però en aquest cas referits a assajos amb tractaments. Amb aquests valors s'analitzà amb detall el paràmetre γ definint paràmetres parcials per a cada un dels intervals d'estudi, tal i com indica la següent expressió:

$$\gamma_i = \frac{p_i \frac{A_i}{A_{r0}}}{p_i} \quad (4.13)$$

On:

γ_i Taxa parcial de reducció de la taca de punts calents, -.

D'aquesta expressió se'n dedueix que:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \gamma_i}{100} \quad (4.14)$$

A banda de l'estudi de les taxes parcials reducció, l'obtenció dels paràmetres p_n i p_n' permeté calcular una temperatura mitjana de cada assaig, ponderant els valors centrals dels quatre intervals amb sengles percentatges. L'obtenció de la temperatura permeté tot seguit analitzar les reduccions d'aquestes causades per l'efecte del retardant, a través del paràmetre κ definit com:

$$\kappa = \frac{\bar{T}}{\bar{T}_0} \quad (4.15)$$

On:

κ Taxa de reducció de temperatura, -.

\bar{T} Temperatura mitjana per un assaig amb retardant, K.

\bar{T}_0 Temperatura mitjana per un assaig de control, K.

Llavors, amb el càlcul de les temperatures resolt, mancà únicament el darrer pas per a la consecució de l'objectiu final, l'obtenció de la potència calorífica radiant. Així, es pogué definir un poder emissiu de la taca calenta amb les expressions següents, atesa la tipologia de l'assaig, de control o amb tractament:

$$E = \varepsilon \sigma \bar{T}^4 \quad (4.16)$$

$$E_0 = \varepsilon \sigma \bar{T}_0^4 \quad (4.17)$$

On:

- E Poder emissiu del conjunt flames-combustible incandescent per un assaig amb retardant, W/m^2 .
 E_0 Poder emissiu del conjunt flames-combustible incandescent per un assaig de control, W/m^2 .
 ε Emissivitat del conjunt flames-combustible incandescent = 0,9.
 σ Constant d'Stefan Boltzman = $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

Tot seguit es pogué expressar la potència calorífica radiant. L'equació següent correspon concretament a l'obtenció d'aquest paràmetre per un assaig amb tractament. Per un foc de control l'analogia és directa.

$$Q = E A_t \quad (4.18)$$

On:

Q Potència calorífica radiant, W .

D'aquesta manera, es pogué expressar finalment una taxa de refredament:

$$\tau = \frac{E A_t}{E_0 A_{t0}} = \kappa^4 \gamma \quad (4.19)$$

On:

τ Taxa de refredament, -.

En l'expressió precedent s'observa l'equivalència de la ràtio de la potència calorífica per un assaig de control i un amb tractament, amb els paràmetres κ i γ definits prèviament.

4.4.2. Anàlisi dels resultats

Igualment com es procedí en l'estudi de la velocitat de combustió i de propagació, els resultats es pogueren representar mitjançant corbes de nivell experimentals, interpolades a partir dels valors de les diferents taxes per a les quantitats m_a i m_r emprades en l'estudi de v , car la zona d'anàlisi es delimità just dintre la placa de pesatge. La que correspon a la variació de la taxa de reducció de punts calents en funció de l'aigua i el retardant del tractament, es representa en la figura 4.59.

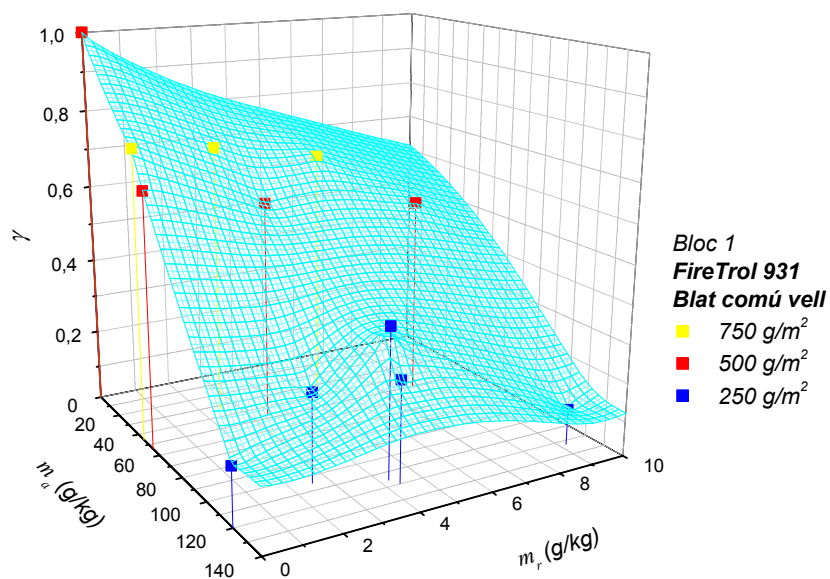


Figura 4.59. Taxa de reducció de la taca de punts calents per al primer bloc experimental.

La tendència decreixent en les dimensions de la taca a mesura que augmenta la quantitat d'aigua i/o retardant és evident, per bé que es detecten certes irregularitats en la sèrie efectuada amb la càrrega de 250 g/m², degudes majorment a la poca potència calorífica emesa en la majoria d'assajos d'aquesta sèrie.

Pel que fa a les variacions de temperatura, foren certament molt lleugeres, de tal manera que s'obtingueren valors de κ molt propers a 1 i no es pogueren percebre canvis realment importants entre cadascun dels assajos d'una mateixa sèrie. En la figura 4.60, s'observen posicionats els valors de temperatura de cada assaig, atesos els valors de m_r (4.60. a)) i de m_a (4.60. b)). Tot i que es pot observar una relativa tendència decreixent de la temperatura a mesura que augmenta el retardant, la dispersió dels punts s'accentua al relacionar-los amb la quantitat d'aigua. Amb tot, sí que es pogueren percebre certes diferències entre els valors mitjans de cadascuna d'aquestes tres sèries. En aquest sentit, la taxa mitjana de reducció de temperatura per a la sèrie efectuada amb 750 g/m² fou de 0,987, la de la sèrie de 500 g/m² equivalgué a 0,965 i, finalment, el valor de κ per a la sèrie de 250 g/m² prengué per valor 0,954.

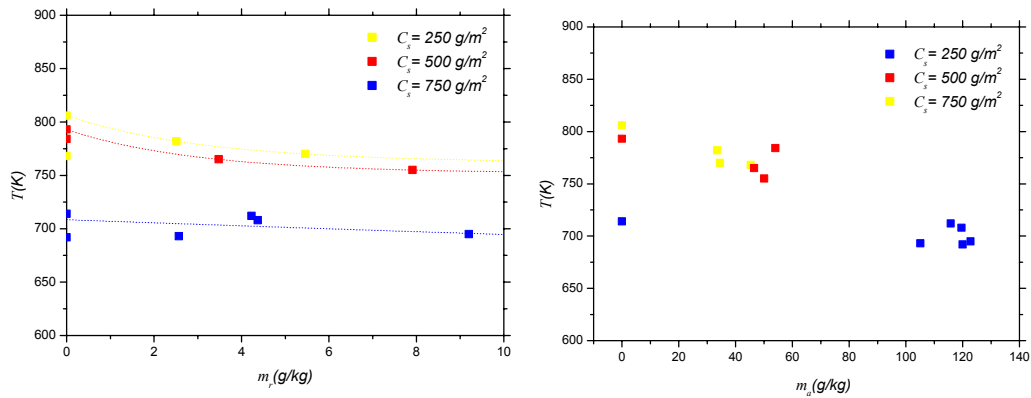


Figura 4.60. Taxa de reducció de la taca de punts calents per al primer bloc experimental.

De la combinació d'aquests dos paràmetres, tal i com mostra l'equació (4.19) en sorgí el paràmetre final τ , designat com la taxa de refredament. Per bé que en aquesta taxa hi queda inclosa la reducció de temperatura elevada a la quarta potència, aquest factor no fou suficient per a alterar considerablement la morfologia de γ observada en la precedent figura 4.59. La representació de la corba de nivell resultant pel paràmetre τ es mostra en la figura 4.61.

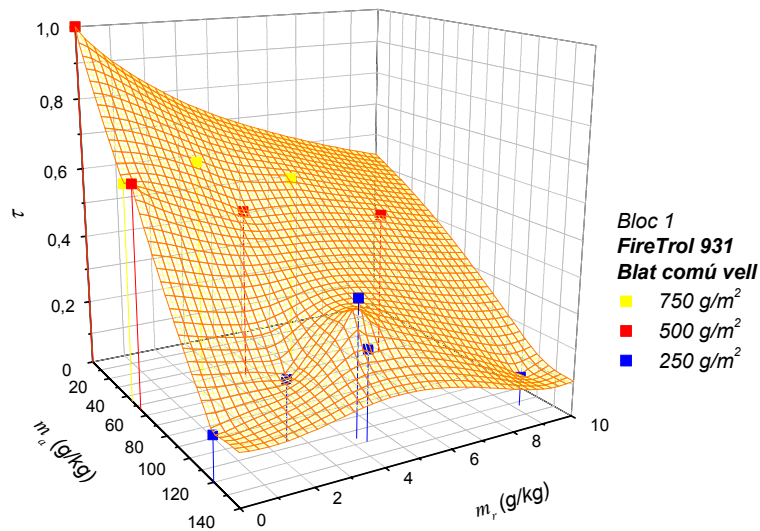


Figura 4.61. Taxa de refredament per al primer bloc experimental.

4.5. Estudi comparatiu de v , ω i τ per al primer bloc experimental

En els tres darrers apartats d'aquest capítol han estat exposades les metodologies de càlcul i d'anàlisi de la capacitat dels retardants per a reduir la velocitat de combustió, de propagació, la potència calorífica radiant i la temperatura d'un front de foc. Les eines d'anàlisi bàsiques han estat les corbes de nivell per a cada taxa de reducció (v , ω , τ), representades en funció dels dos paràmetres descriptors del tractament aplicat, m_a i m_r . En la figura 4.62 es representa la vista frontal de les tres corbes corresponents a v , ω , i τ , obtingudes del bloc experimental primer.

La corba situada per sobre de totes correspon a la variació de la velocitat de propagació del front. Seguidament se situa la corba de la taxa de refredament i, en darrer lloc, la disminució de la velocitat de combustió. D'aquesta manera doncs, queda ordenada de menor a major la capacitat reductora de tots aquests paràmetres que descriuen el comportament de l'incendi, pel cas del retardant Fire Trol 931 aplicat sobre un llit conformat amb blat comú vell.

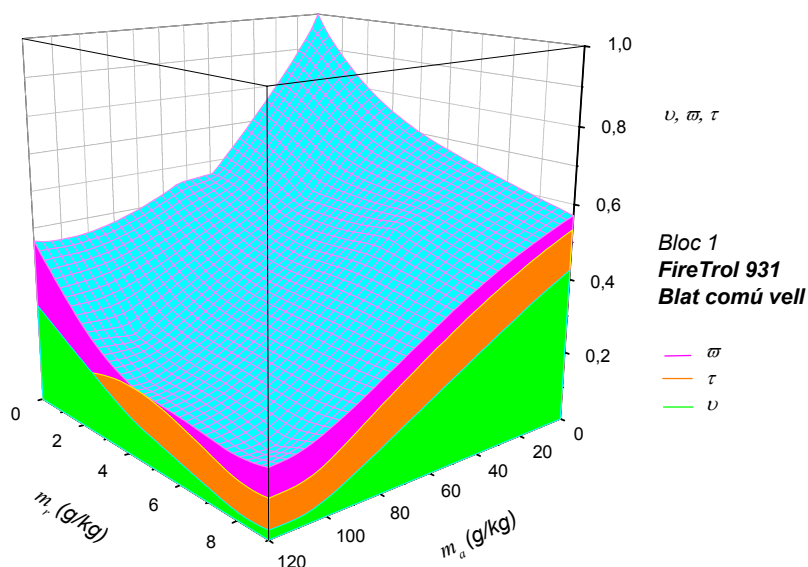


Figura 4.62. Representació conjunta de la taxa de reducció de la velocitat de combustió (v), la taxa de reducció de la velocitat de propagació (ω) i la taxa de refredament (τ), per al primer bloc experimental.

D'aquesta manera queda reflectit l'efecte global del retardant en el comportament del foc. D'una banda, s'observa com actua d'una manera més contundent sobre la combustió, ja que els components actius del producte interfereixen directament sobre la dinàmica d'aquesta reacció. Aquest efecte es tradueix en una disminució de l'energia total alliberada en el front, i consegüentment de la potència calorífica radiant emesa per aquest, responsable en gran mesura de la inflamabilitat del material disponible per davant de les flames, i, per tant, de la velocitat de propagació del front.

4.6. Conclusions

En aquest capítol s'ha estudiat el comportament d'un front de flames bàsic, sense vent ni pendent, a partir de l'anàlisi de les variables descriptors seleccionades; la velocitat de combustió i de propagació. S'han detectat importants dependències d'aquests paràmetres amb les característiques físiques del combustible, de tal manera que s'ha pogut proposar una expressió empírica d'aquesta relació per ambdós casos. A més, les dues velocitats han pogut ser relacionades entre elles. Tot aquest primer estadi d'anàlisi ha estat efectuat obtenint bons resultats; els coeficients de correlació obtinguts en les diferents expressions així ho indiquen.

Pel que fa a l'anàlisi més concret sobre el tractament retardant, han estat abordats múltiples aspectes. En primer lloc, s'ha dissenyat un procediment d'anàlisi comú per a les diferents metodologies experimentals emprades, la qual cosa ha permès veure'n les avantatges i els inconvenients de cadascuna d'elles. Aquest procediment ha estat aplicat d'igual forma a l'estudi de la velocitat de combustió, la velocitat de propagació i la potència calorífica radiant, deixant en evidència així la seva gran flexibilitat en aquest sentit. A més, s'ha pogut demostrar l'ampli ventall d'anàlisi que permet; amb aquesta metodologia de càlcul es poden valorar d'una manera molt intuïtiva, a través de l'observació de representacions gràfiques tridimensionals, un gran nombre d'aspectes referits al comportament del foc sota l'efecte de tractaments retardants. Així, es poden avaluar, per a cada retardant individualment, les coincidències o divergències en l'eficàcia per a la reducció dels paràmetres d'estudi del comportament del foc i observar les diferències en aquest sentit amb les diverses espècies combustibles assajades i també es poden comparar conjuntament les efectivitats de diversos retardants en l'acció sobre cada variable d'anàlisi.

L'acció dels retardants sobre la velocitat de combustió i la velocitat de propagació ha pogut ser modelitzada empíricament. S'ha obtingut una funció tridimensional per a cadascuna d'aquestes variables amb un excel·lent grau d'ajust amb els punts experimentals.

5. EXPERIMENTACIÓ DE CAMP A ESCALA REAL

El Centre d'Estudis d'Incendis Forestals (CEIF) de la Universitat de Coimbra organitza anualment des de 1998 un programa de cremes experimentals de camp, amb finalitats didàctiques per als cossos de bombers portuguesos i també amb objectius específics de recerca per a grups d'investigació d'incendis forestals d'arreu. És en aquest marc en el que es dugueren a terme els experiments a camp a escala real inclosos en aquesta tesi.

L'experimentació a gran escala és una activitat certament necessària per a qualsevol branca de recerca en incendis forestals i en especial per a l'estudi dels retardants. L'obtenció de dades del comportament d'un incendi sota l'efecte d'aquests productes en emergències reals és òbviament una tasca molt complicada. Les cremes de recerca a camp representaren doncs una oportunitat molt bona per a completar aquest estudi. Nogensmenys, aquesta activitat no estigué exempta de certes dificultats que repercutiren en certa manera en els resultats dels assajos. Algunes d'elles foren inherents a la naturalesa de les proves –de molta més complexitat que el treball realitzat al laboratori– i d'altres foren degudes a la convivència de diferents objectius i projectes de recerca estipulats en la definició del programa complet de cremes. No obstant això, aquest darrer aspecte tingué una vessant clarament positiva, ja que permeté compartir i contrastar informació entre els diferents grups de recerca que hi treballaren. Així, no totes les dades recopilades en aquest capítol foren generades estrictament per CERTEC, algunes d'elles provenen del treball conjunt amb diferents integrants dels grups de recerca que desenvolupen els projectes europeus ERAS (*Extention Retardant Application System*, EVG1-CT-2001-00039) i SPREAD (*Forest fire spread prevention and mitigation*, EVG1-CT-2001-00043).

L'experimentació a escala real fou realitzada durant dues campanyes consecutives, la primera tingué lloc durant el mes de maig de 2003 i la segona, just un any després. La campanya de 2003 tingué com a objectiu principal el de valorar qualitativament l'efecte dels retardants –emprats fins aleshores al laboratori– actuant a una escala major, més propera a la de les emergències reals en què aquests productes són habitualment utilitzats. Paral·lelament, es pretengué adquirir experiència en la implementació de les diferents metodologies experimentals i estudiar-ne llur viabilitat, per tal de determinar un procediment experimental i de càlcul òptim per a la següent campanya. Fou doncs en la campanya de 2004 quan es plantejaren objectius més ambiciosos per tal d'estudiar quantitativament l'acció dels retardants sobre l'avanç del foc. En aquest capítol s'analitzen independentment cadascuna de les dues campanyes i se n'extreuen sengles resultats.

5.1. Primera campanya experimental

5.1.1. Emplaçament i descripció de la zona

Es dugué a terme al perímetre forestal de Gestosa dins el terme municipal portuguès de Castanheira de Pêra, situat a l'extrem sud-oest de la formació muntanyosa de Lousã la qual s'ubica al llarg de les regions centrals del país. La major part d'aquest perímetre és cobert per formacions arbustives d'espècies típicament mediterrànies –brucs (*Erica umbellata*, *Erica australis*), gaiols (*Chamaespartium tridentatum*) i estepes (*Halimium sp.*)– la qual cosa el féu idoni per a acomplir amb els requisits del programa experimental en tot el seu abast i, particularment, amb els de l'estudi de retardants. Els treballs de parcel·lació per tal de sectoritzar diferents àrees experimentals i garantir la seguretat dels voltants de la serra foren duts a terme durant els mesos previs a l'experimentació. La figura 5.1 il·lustra certs detalls d'aquesta primera fase i la figura 5.2 esquematitza la disposició final i la numeració de les parcel·les d'estudi.

Seguidament cada parcel·la fou caracteritzada tant pel que fa als paràmetres topogràfics (pendent α , i orientació, θ), com a les dimensions geomètriques (àrea, A i perímetre, P). Les propietats extrínseques del combustible foren determinades mitjançant dues tècniques d'inventariat àmpliament utilitzades en l'àmbit forestal, el mostreig destructiu i el mètode de línies d'intercepció (Canfield, 1941). Amb aquestes pràctiques s'obtenen els percentatges de coberta (C_o), les càrregues màssiques (C_s) i volúmiques (ρ_{aps}) i les altures (h)

de cada espècie, a partir de les quals se'n poden calcular valors mitjans totals per a combustibles fins i gruixuts, per a cada parcel·la.

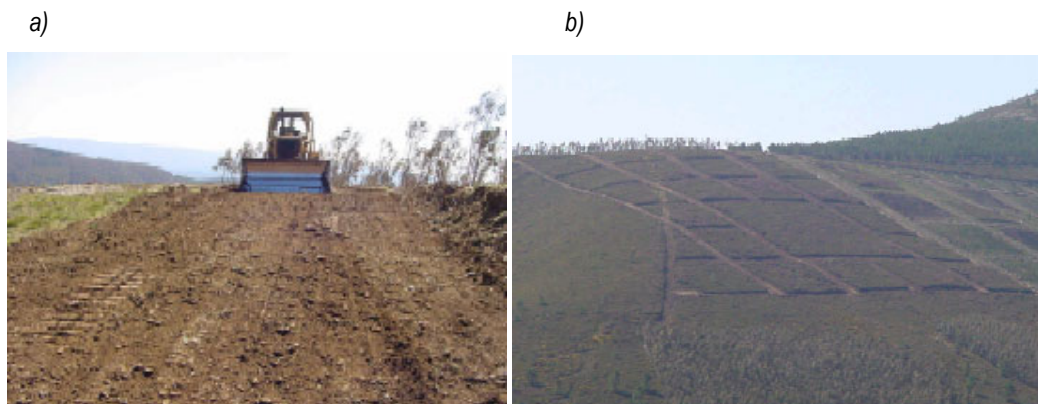


Figura 5.1. a) Bulldozer fent treballs de parcel·lació. b) Parcel·les preparades per a l'experimentació.

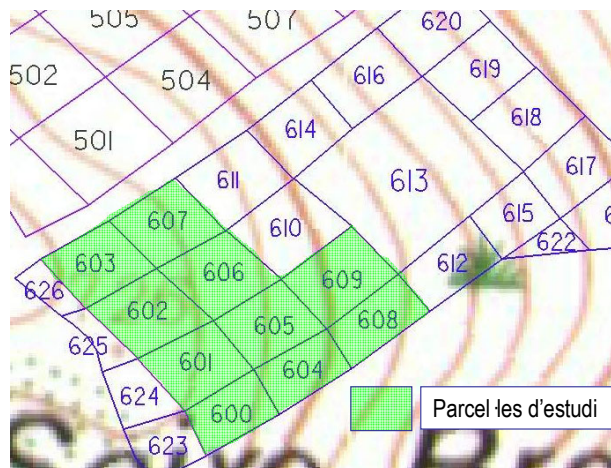


Figura 5.2 Parcel·les d'estudi de la primera campanya experimental.

Pel que fa a les propietats intrínseques (σ , ρ_m , PCS i β), foren determinades amb els valors específics per espècies extrets de la bibliografia (Pereira *et al.*, 1995, Fernandes i Rego, 1998 i Cohen *et al.*, 2003). Se'n

calcularen les mitjanes d'aquests per a cada parcel·la ponderant-los amb els percentatges de coberta. Totes aquestes dades es recopilen conjuntament en la taula 5.1.

Taula 5.1. Caracterització de les parcel·les de la primera campanya experimental.

Parcel·la	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	
Característica											
α (°)	17,61	13,46	11,31	10,96	20,59	15,28	14,79	14,67	16,60	15,87	
θ (°)	111,72	102,11	85,81	59,23	115,59	85,51	65,52	55,83	93,24	76,32	
A (m ²)	1209	1564,4	1695	1488,3	1205	1516,3	1645	1568,8	1275,3	1720	
P (m)	143,2	161,15	169,6	157,4	144,1	158,3	166,55	160,9	151,3	168,1	
h (m)	0,893	0,703	0,513	0,495	1,078	0,868	0,897	0,843	0,933	1,06	
Co (%)	100	99	98,4	89,3	100	97,1	100	100	100	100	
C_s (kg/m ²)	Fi	4,04	2,95	2,42	2,28	4,61	3,83	3,70	3,67	4,13	3,76
	Total	6,20	4,29	3,58	3,45	8,42	6,61	5,69	5,56	6,48	6,89
ρ_{aps} (kg/m ²)	Fi	4,44	4,46	3,89	2,95	3,50	3,46	4,30	4,17	3,93	3,33
	Total	6,78	6,56	7,00	7,24	5,71	6,80	6,66	6,29	6,23	5,66
σ (m ⁻¹)	6379	6584	5822	5154	6822	5333	6579	5953	6594	6423	
ρ_m (kg/m ³)	570	560	585	610	557	585	564	562	564	567	
PCS (kJ/kg)	23324	23306	23085	22843	23612	22765	23399	22785	23512	23387	
β	Fi	0,00779	0,00796	0,00665	0,00484	0,00628	0,00609	0,00762	0,00742	0,00697	0,00587
	Total	0,01189	0,01171	0,01197	0,01187	0,01025	0,01162	0,01181	0,01119	0,01105	0,00998

5.1.2. Descripció de les proves

Aplicació de retardant. Disseny de franges i metodologia

Els retardants disponibles en aquesta campanya foren el FIRETROL 934 i el FR CROS 134P, d'ídèntiques característiques que els emprats al laboratori (recopilades en la taula 3.2 del tercer capítol). Per tal de veure l'efecte d'aquests productes sobre un front d'incendi evolucionat, es distribuïren en franges de 5 m d'amplada a la part superior de la parcel·la, tal i com mostra la figura 5.3. Les dilucions i les dosificacions escollides per a cada assaig es recullen en la taula 5.2.

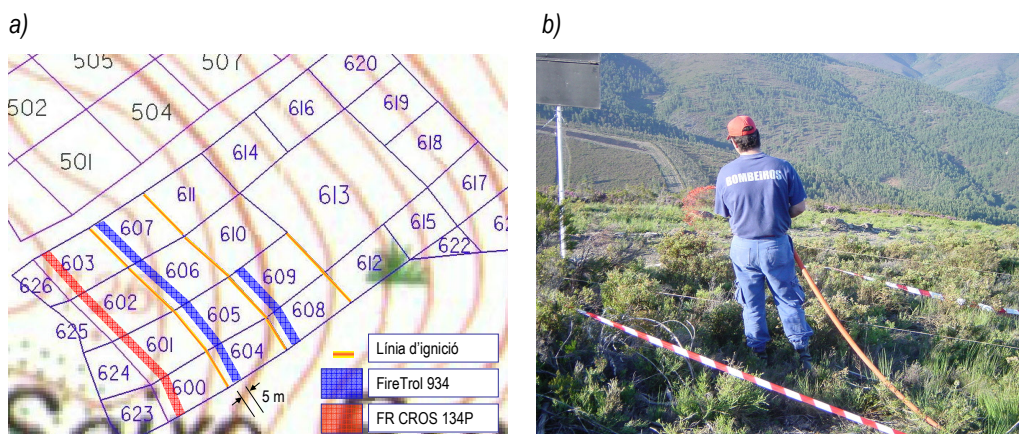


Figura 5.3 a) Configuració de les franges retardants. b) Aplicació.

Taula 5.2. Paràmetres d'aplicació del retardant.

Paràmetres d'aplicació	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609
Dilució (%)	12,5	6	8,5	4	15,6	20	15,6	20	15	15
Dosificació (l/m²)	1,3	1,3	1,3	1,3	3	3	3	3	4	4

Les diferències que s'observen en la taula precedent, responen a la implementació de diferents criteris de disseny. D'una banda, les parcel·les 604-609 foren designades per a l'estudi experimental del projecte

europèu ERAS, l'objectiu del qual era emprar el retardant de manera molt similar a com s'utilitza en emergències reals, pel que fa a dilucions i distribucions per tal d'observar una aturada pràcticament total del front d'incendi a l'assolir la franja. Davant d'això, es decidí doncs emprar l'altre retardant per a detectar i avaluar reduccions en la propagació de l'incendi, tal i com s'havia observat ja en el programa experimental al laboratori. Així, els paràmetres d'aplicació foren, per aquest segon producte, sensiblement menors.

Les franges retardants s'aplicaren el dia abans de realització de la crema, amb la qual cosa se n'assegurà l'evaporació de l'aigua de dissolució. D'aquesta manera es pretengué simular la construcció d'una de les tècniques indirectes d'extinció freqüentment utilitzada en els grans incendis forestals, els tallafocs químics. D'altra banda, la realització d'aquesta tasca –més aviat feixuga– en les hores prèvies a la ignició, facilità un millor desenvolupament de tot el treball experimental programat a Gestosa. L'aplicació dels productes es dugué a terme amb una mànega de bombers (Figura 5.3 b), impulsada per una motobomba. Aquesta tècnica presentà certs avantatges, com fou la rapidesa en l'execució de les franges, però, per altra banda, se'n detectaren també certs inconvenients, com la manca de precisió i d'homogeneïtat en moltes de les parcel·les ruixades i l'obturació freqüent del sistema amb la utilització del retardant FR CROS 134P, degut a la naturalesa del seu agent espessidor.

Sistemes de mesura per a l'estudi del comportament de foc

L'aplicació de la metodologia desenvolupada al laboratori per al control i adquisició de les variables que determinen el comportament d'un front d'incendi no és sempre fàcil en l'experimentació de camp. L'evident canvi d'escala fa molt més complexes certes tasques que al laboratori no presenten gran dificultat. Implementar-les a camp requereix doncs prèviament un gran esforç de disseny conceptual. És també en aquest sentit en què la primera campanya d'experiments fou clarament profitosa, ja que permeté executar aquelles tasques més senzilles i d'una analogia més directa amb el laboratori i per altra banda també permeté dur a terme el disseny d'aquelles altres en què la seva aplicació era més costosa, resultats que òbviament es pogueren aplicar durant la segona campanya experimental. A continuació, s'anuncien les principals:

- *Mesura de la velocitat de propagació.* S'implementaren els dos tipus de sistemes de mesura a tal efecte, aplicats també al laboratori. D'una banda, el sistema visual clàssic mitjançant fils de nylon tensats, fou aplicat a les parcel·les 600-604. Aquests es distribuïren a tot el llarg de les parcel·les a

5 m de distància entre cadascun d'ells. Per altra part, la monitorització de l'avanç del foc amb una càmera d'enregistrament de vídeo sobrevolant la zona experimental, permeté extreure la velocitat de propagació en aquelles parcel·les en què es pogué disposar d'un helicòpter.

- *Mesura de la taxa de combustió.* Per tal de trobar aquesta dada, s'analitzaren les franges de tractament uns dies posteriors a la crema. Així, es recorregueren les illes no cremades contingudes en aquest espai mitjançant un GPS, per tal de reproduir-ne l'àrea sobre un suport gràfic. La relació d'aquesta àrea amb l'àrea total de la franja retardant donà una estimació de la taxa de combustió, d'analogia clara i directa amb la taxa de cendres observada al laboratori.
- *Mesura de la velocitat de combustió i temperatures.* És en aquest punt on queden paleses de manera clara les restriccions que presenta el treball de camp, ja que en aquest cas fou inviable implementar el mateix sistema d'adquisició de dades que l'emprat al laboratori. Per bé que en aquesta campanya no es pogueren extreure dades en aquest sentit, s'estudià i dissenyà un protocol d'adaptació de les metodologies per tal que poguessin ser aplicades en la campanya posterior.
- *Mesura de la humitat del combustible.* Es dugué a terme un control d'aquest paràmetre sobre totes les parcel·les experimentals. Se n'estudià l'evolució horària per a les diferents espècies presents en la zona, tant pel que fa a l'àrea de desenvolupament del front –és a dir, aquella sense retardant– com a la franja tractada amb producte. Es recolliren totes les mostres emmagatzemades amb recipients estancs i s'analitzaren posteriorment al laboratori mitjançant el mètode estàndard de l'estufa (24 h, 100°C).
- *Mesura de les variables atmosfèriques.* L'àrea experimental de Gestosa disposà d'una estació meteorològica estàndard que prengué mesures de la velocitat i direcció del vent i de les condicions ambientals de temperatura i humitat. L'estació enregistrarà dades durant uns mesos previs a la campanya, per tal de copsar el patró meteorològic de la zona, i durant els assajos pròpiament.

Execució de la crema

A aquesta escala, és també evident la complexitat de reproduir amb exactitud un front de linealitat perfecte, com els observats al laboratori sota condicions controlades. La meteorologia, –especialment la direcció i la velocitat del vent–, la topografia de les parcel·les, els requisits específics d'altres estudis convinguts a Gestosa i, finalment, les restriccions imperades per la seguretat, dificultaren doncs l'obtenció d'un front lineal, fins i tot en els seus primers estadis. Amb tot, es dugué a terme la ignició de les parcel·les intentant reproduir aquestes condicions i s'assolí un èxit relatiu segons el cas. Aquesta tasca es realitzà amb torxes de degoteig omplertes d'una mescla de gasolina i gasoil. Durant l'avanç del front s'anotaren, de la mateixa manera que en el laboratori i en aquelles parcel·les que ho requerien, els temps en què els fils de nylon eren trencats pel foc, observant-los des de les dues bandes de les parcel·les, sempre i quan les condicions de seguretat ho permetessin. Paral·lelament, es prengueren fotografies digitals de l'incendi, per tal de tenir també un registre visual de detall. La figura 5.4 n'il·lustra una d'elles. Correspon als primers instants de la crema de la parcel·la 601. S'hi observa un front lineal de flames, la franja tractada amb retardant –de color rogenc i delimitada per unes cintes bicolors– i els fils de nylon per a la mesura de la velocitat de propagació.



Figura 5.4. Execució de la crema en la parcel·la 601.

5.1.3. Resultats

Mesura de la velocitat de propagació

Tal i com ja s'ha mencionat prèviament, en aquesta campanya no es pretengué fer una anàlisi comparativa acurada de la reducció de la velocitat de propagació en totes les parcel·les, ja que les condicions exposades no ho permeteren. La finalitat principal pel que fa a la mesura d'aquest paràmetre, fou la d'estudiar la viabilitat dels dos mètodes assajats per tal d'observar-ne les avantatges i els inconvenients en les seves dues fases, la implementació experimental i el càlcul de la velocitat de propagació pròpiament dit. Amb aquest objectiu, es detallen les particularitats d'ambdós sistemes i se n'observen els punts forts i els punts febles, exemplificant la seva aplicació en certes parcel·les convingudes d'aquesta primera campanya.

Mesura de la velocitat de propagació mitjançant el tractament i l'anàlisi d'una seqüència de vídeo enregistrada durant la crema de la parcel·la 606.

L'estudi de l'avanç d'un front d'incendi per mitjà de l'extracció i anàlisi d'una seqüència d'imatges (ja siguin enregistrades en l'espectre visible o infraroig) és una pràctica habitualment emprada en aquest camp. La seva utilització més rigorosa implica una gran complexitat tecnològica, tant pel que fa a la utilització de programaris específics com al disseny algorítmic que permeti automatitzar totes les tasques que el componen. És per aquest motiu que s'excloué com a objectiu d'aquesta tesi la utilització d'aquesta metodologia a tal nivell. Nogensmenys, es pretengué dissenyar un procediment més senzill que permetés extreure informació igualment vàlida i útil de les seqüències enregistrades amb vídeo des de l'helicòpter. D'entre totes les parcel·les filmades, es treballà sobre la 606, degut a que fou la única de les que se'n disposaren imatges del pas del front per la franja retardant.

La propagació del front en aquesta parcel·la presentà força irregularitats, ja que avançà esbiaixat de flanc durant tot el seu curs, degut a la presència de vent no alineat amb el pendent topogràfic en la major part del temps de crema, d'intensitat, d'altra banda, molt variable. A més, es potencià l'avanç de la meitat dreta del front mitjançant successives ignicions provocades degut a requeriments d'altres programes experimentals de recerca. Tot això fa que aquesta anàlisi se centri únicament sobre el terç esquerre de la parcel·la, ja que, amb la visualització de les imatges, es pot observar que és la porció del front que quedà menys influenciada per aquests fets i que, per altra banda, presentà una reducció significativa de la velocitat de propagació.

La figura 5.5 esquematitza l'avanç de l'incendi en aquesta parcel·la en el període en què fou enregistrat des de l'helicòpter. Fou obtingut mitjançant l'extracció de diverses imatges de vídeo, seleccionades en diversos moments d'entre tota la pel·lícula de l'assaig, i la posterior anàlisi de les diferents perspectives i dimensions amb eines de representació gràfica de tipus CAD (*Computed Assisted Drawing*).

S'hi observen diversos perímetres que marquen la posició del front en tota la seva superfície durant diferents instants de temps. En el terç esquerra de la parcel·la, aquests perímetres es presenten colorats, per tal de distingir la zona d'anàlisi. A banda, cinc línies verticals discretitzen aquesta zona i és precisament sobre cadascuna d'elles des d'on es calculà l'avanç d'aquesta secció de front. També s'hi observa en la part superior de la parcel·la, la franja impregnada de retardant. Les línies discontinües delimiten les dimensions teòriques, mentre que les contínues marquen la franja final de tractament, òbviament més ampla que la programada degut a certes dispersions durant el procés d'aplicació.

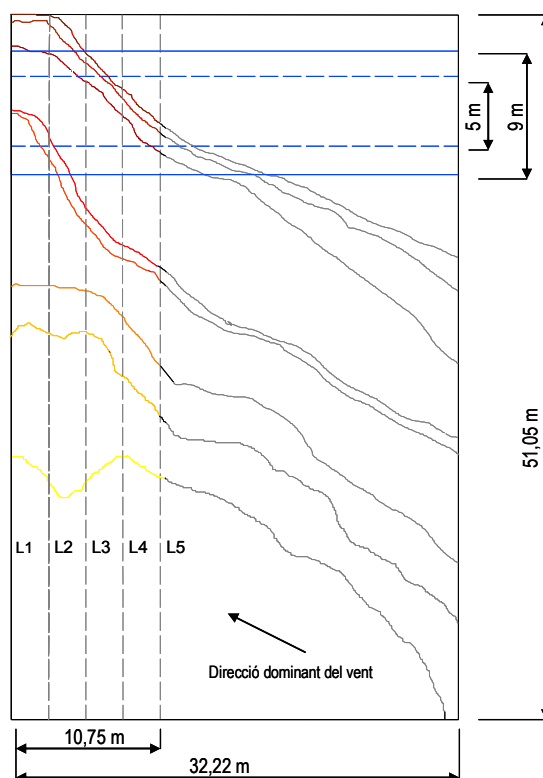


Figura 5.5. Representació esquemàtica de l'avanç del front en la parcel·la 606.

Les gràfiques recopilades en la figura 5.6 indiquen l'evolució espacial del front sobre les cinc línies d'estudi, L1-L5. S'hi representen els punts extrems de les imatges en el instants de temps seleccionats, així com llurs correlacions lineals. En totes elles s'hi evidencia un canvi de pendent entre l'avanç previ al tractament i l'avanç just en la franja de retardant. A més, sobre les línies L1 i L2 existeix encara una tercera fase, que correspon al pas del front per la part superior de la parcel·la. En aquesta etapa la velocitat d'avanç es veu encara més reduïda, perquè, tot i que aquesta part ja no conté retardant, existeix un fort efecte de vora, degut a la proximitat de les franges de protecció entre parcel·les. La taula 5.3 recopila les velocitats de propagació calculades sobre aquestes línies, diferenciant la regió prèvia al tractament (R_0) i la franja retardant (R). A més, s'hi inclou el factor de reducció entre ambdues (ω) i, finalment, el càlcul mitjà per a tota la secció d'aquesta parcel·la.

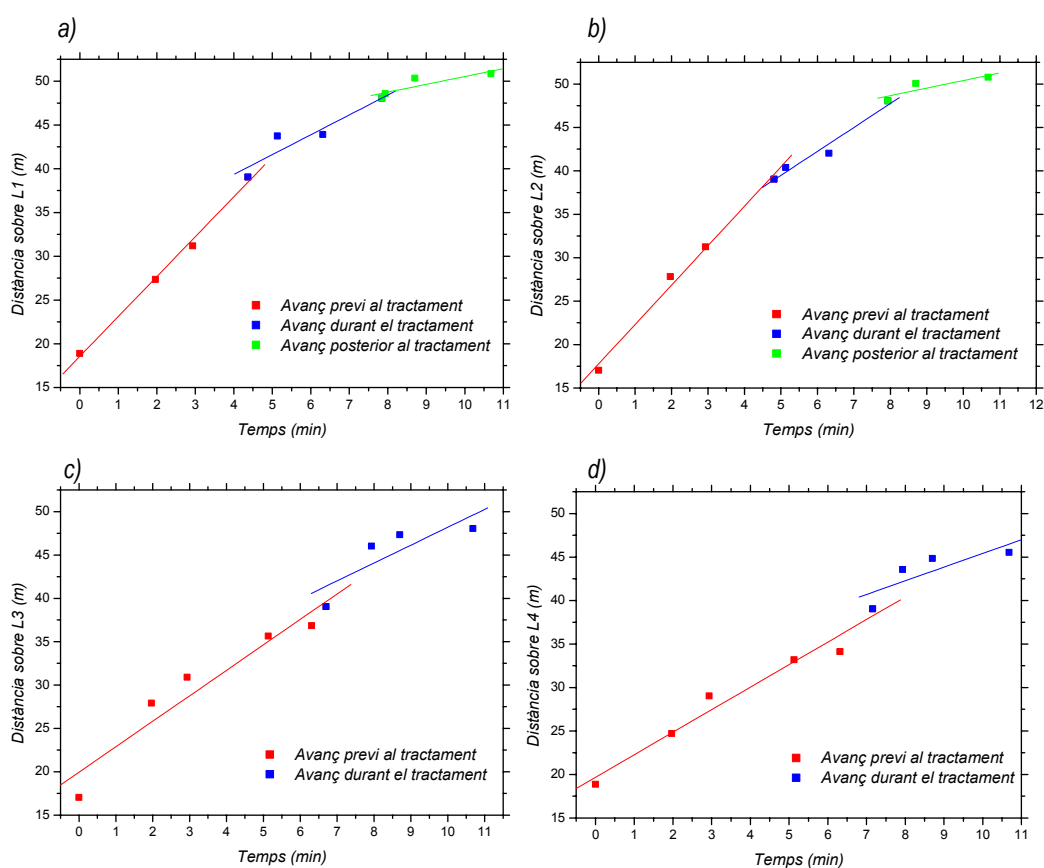


Figura 5.6. Avanç del front en la parcel·la 606 per a les línies a) L1, b) L2, c) L3, d) L4.

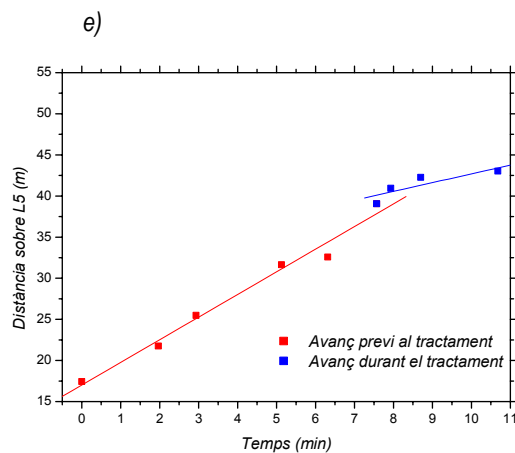


Figura 5.6 (continuació). Avanç del front en la parcel·la 606 per a les línies e) L5.

Taula 5.3. Velocitats de propagació calculades en la parcel·la 606.

Velocitats de propagació	L1	L2	L3	L4	L5	Mitjana
R_0 (m/min)	4,5558	4,5393	2,9378	2,5891	2,7519	3,47478
R (m/min)	2,2682	2,7575	2,0615	1,5717	1,0711	1,946
ω (-)	0,498	0,607	0,702	0,607	0,389	0,560

Mesura de la velocitat de propagació mitjançant el sistema visual clàssic en les parcel·les 600 i 601.

La segona metodologia emprada implicà l'estudi de la velocitat de propagació en les parcel·les seleccionades mitjançant les dades enregistrades durant l'observació dels trencaments dels fils de nylon que les recobriren.

L'obtenció de la velocitat de propagació a través d'aquesta tècnica és, de la mateixa manera que en el laboratori, pràcticament directe. Així, la representació gràfica dels valors mitjans enregistrats durant la crema permet avaluar sense més complicació l'avanç del front en la zona prèvia al tractament i durant el pas de la franja (figura 5.7 i taula 5.4).

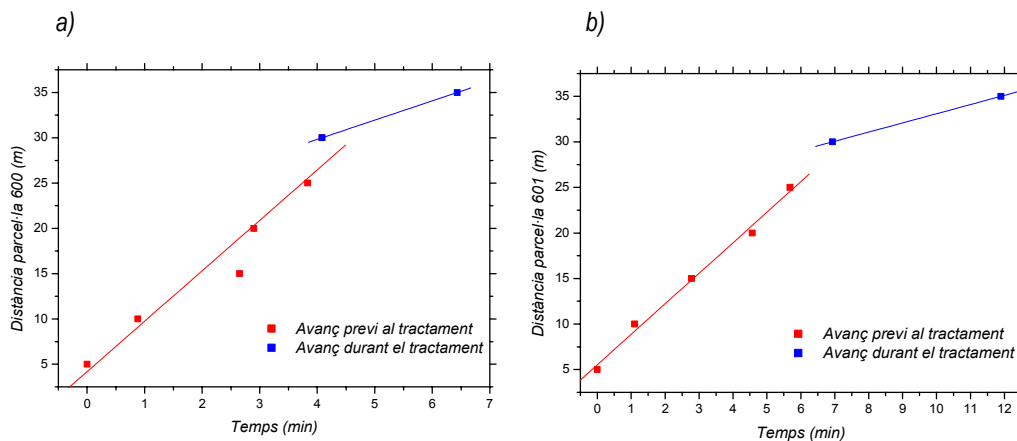


Figura 5.7 Avanç del front en la parcel·la a) 600 i b) 601.

Taula 5.4. Velocitats de propagació calculades en la parcel·les 600 i 601.

Velocitats de propagació	600	601
R_0 (m/min)	4,93	3,3466
R (m/min)	2,127	1,007
ω (-)	0,4315	0,3

Per les mateixes causes que en la parcel·la 606, l'avanç dels fronts 600 i 601 foren també irregulars, la qual cosa fa que els resultats obtinguts siguin purament circumstancials. Nogensmenys, evidencien la facilitat del càlcul d'aquesta segona tècnica i la seva potencialitat en l'estudi quantitatiu de la reducció de la velocitat de propagació en condicions d'avanç del front més controlades.

Comparació d'ambdós mètodes

Els dos sistemes de càlcul de la velocitat de propagació presenten òbviament certes avantatges i inconvenients, de tal manera que la seva idoneïtat –per aquesta aplicació particular d'estudi de retardants a camp– està clarament relacionada amb les condicions específiques de cada campanya experimental.

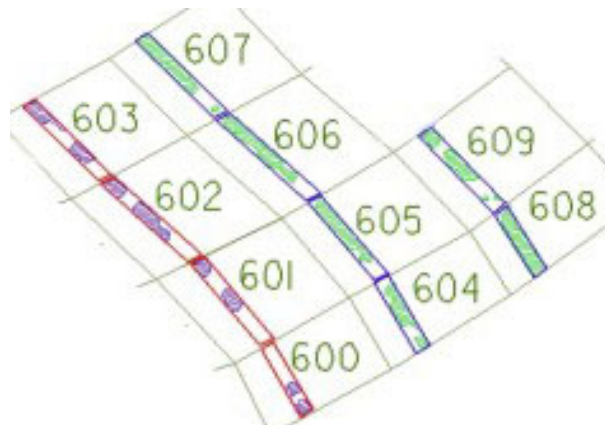
El mètode visual clàssic és el que presenta una implementació i una extracció de dades més senzilla. Aquest sistema, però, té un fort limitant, ja que la informació que genera només és vàlida en cas que el front d'incendi avanci en línia recta i no perdi el paral·lelisme amb la línia d'ignició. Així, per assajos on no es pugui aconseguir un front lineal, la disponibilitat d'una càmera d'enregistrament situada adequadament permet extreure dades més fiables sobre la propagació del front. Cal dir però que aquesta adequació està sotmesa a la topografia i les condicions del terreny d'estudi i, en cas que aquestes no siguin favorables, està sotmesa a la disponibilitat d'un mitjà (helicòpter, grua, etc.) que permeti enlairar l'equip per obtenir el camp de visió òptim. D'altra banda, la utilització d'una càmera operant en l'espectre visible no permet el seguiment en tot moment del front, ja que aquest pot quedar emmascarat pel fum, si les condicions del vent així ho provoquen. És en aquest sentit en què és indicada la utilització d'una càmera de termografia infraroja per a aquesta aplicació.

Mesura de la taxa de combustió

La taxa de combustió (η), definida com la fracció d'àrea cremada respecte la total, fou mesurada –tal i com s'explica en l'apartat anterior– en les franges de tractament de les parcel·les. La figura 5.8. a) representa un senzill esquema de la composició de les franges després de l'incendi. S'hi observa clarament que, si bé les franges de les parcel·les 600-603 quedaren molt malmeses, les altres conservaren pràcticament intacte tot el seu combustible o sofriren pèrdues poc significatives. Per altra banda, la figura 5.8.b) il·lustra una imatge real de la zona d'estudi. S'observen les franges de les parcel·les 600-605, encerclades amb una línia vermella discontinua, i les parcel·les 606 i 607, encara per cremar. En la taula 5.5 es recullen els valors numèrics de la taxa de combustió, calculats a partir del tractament de les dades extretes amb el GPS.

Aquesta tècnica de mesura de la taxa de combustió s'executa a camp d'una manera molt fàcil i ràpida i el procés de càlcul posterior és igualment senzill. No obstant això, està limitada per la precisió del GPS, ja que si aquest no té prou prestacions, el seu propi marge d'error pot emmascarar els resultats. És una tècnica adequada per a mesures d'unes certes dimensions, però no s'escau per a recórrer àrees petites. És doncs en aquest cas quan la utilització d'aparells de mesura convencionals és més adequada que emprar aparells de posicionament via satèl·lit.

a)



b)

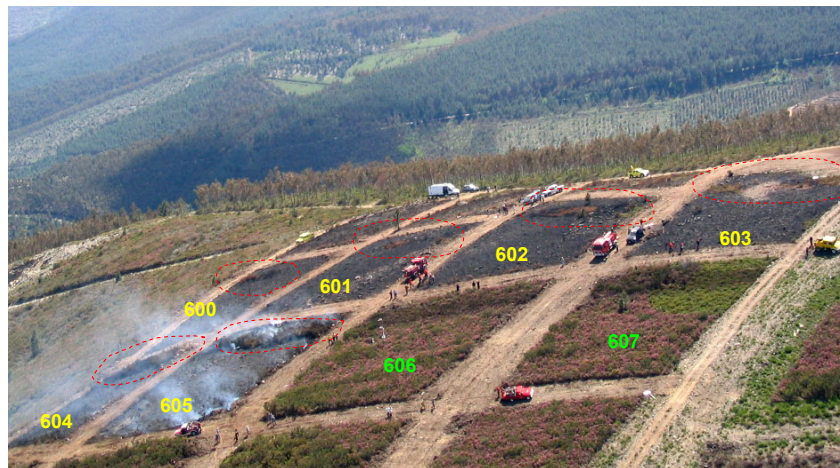


Figura 5.8 a) Representació gràfica (Ribeiro, 2003) i b) imatge real, de les àrees no cremades dins les franges de tractament.

Finalment, per a concloure aquest apartat, cal apuntar que durant la campanya experimental de Gestosa 2003 es va poder observar l'efecte dels productes retardants FIRETROL 934 i FR CROS 134P a una escala molt propera a la real. Al mateix temps, s'adquirí experiència en tots els aspectes dels treballs experimentals a camp. D'una banda, es posaren en pràctica les tècniques de caracterització i inventariat del combustible a escala real i les metodologies per a l'obtenció de dades meteorològiques i d'humitat, amb resultats clarament

satisfactoris. Pel que fa a les tècniques d'aplicació del retardant, s'avaluà el sistema de ruixat automàtic amb motobomba, copsant-ne les seves avantatges i inconvenients. A banda, es treballà amb un ventall ampli de concentracions i dosificacions, la qual cosa permeté copsar els ordres de magnitud que són necessaris per a provocar successives reduccions de la propagació del front, així com una aturada pràcticament total.

En referència als sistemes de mesura de les variables del comportament del foc, s'implementaren les tècniques per a l'estudi de la velocitat de propagació i la taxa de combustió i es féu una anàlisi crítica d'ambdues per mitjà de resultats experimentals. Paral·lelament, s'estudià la viabilitat d'adaptar els mètodes emprats al laboratori per a la mesura de la velocitat de combustió i les temperatures, per tal de posar en pràctica, durant la segona campanya, una metodologia experimental i de càlcul que pogués donar la mateixa tipologia de resultats que els del laboratori, és a dir, que permetés quantificar l'efecte dels retardants a través de les principals variables que controlen el comportament d'un incendi.

Taula 5.5. Taxa de combustió per a les franges de tractament.

Parcel·la	Franja de tractament (m ²)	Àrea no cremada (m ²)	Àrea cremada (m ²)	η (%)
600	120,68	26,45	94,23	78
601	177,59	55,26	122,33	69
602	179,91	86,31	93,61	52
603	168,57	76,45	92,12	55
604	137,44	74,43	63,01	46
605	172,14	113,51	58,63	34
606	205,04	111,63	93,41	46
607	183,30	113,57	69,74	38
608	122,44	95,44	26,99	22
609	176,36	73,95	102,41	58

5.2. Segona campanya experimental

5.2.1. Emplaçament i descripció de la zona

Aquesta tingué lloc al perímetre forestal de Trevim, al terme municipal portuguès de Candal, situat també a la serralada de Lousâ, molt proper a la primera àrea experimental. La coberta d'aquest perímetre consta, de la mateixa manera que en la zona de Gestosa, d'espècies arbustives mediterrànies; brucs (*Erica umbellata*, *Erica australis*), gaiols (*Chamaespartium tridentatum*) i gatoses (*Ulex parviflorus*).

En la figura 5.9 s'observa la disposició final de les parcel·les delimitades després del treball de sectorització. En la taula 5.6 es recullen les dades de l'estudi topogràfic i de l'inventariat de combustible, dut a terme amb idèntics procediments que en la campanya anterior, d'aquelles parcel·les en les què s'efectuà l'estudi aprofundit dels paràmetres del comportament del foc. Aquestes foren les següents: 702, 703, 706, 709, 710, 711, 714 i 715.

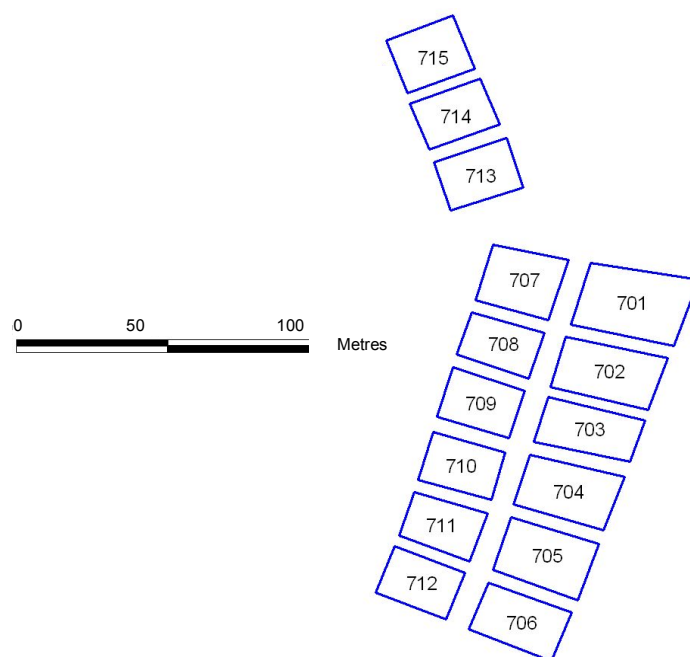


Figura 5.9 Parcel·les d'estudi de la segona campanya experimental.

Taula 5.6. Caracterització de les parcel·les de la segona campanya experimental.

Parcel·la		702	703	706	709	710	711	714	715
Característica									
α (°)		6°	6	6°	8	8	9	7°	7°
θ (°)		135°	135°	135°	135°	135°	135°	135°	135°
A (m ²)		450°	425°	425°	293,7	305,8	340,3	340°	340°
P (m)		90°	88°	88°	70,7	71,8	75,1	78°	78°
h (cm)		45	24	36	30	29	42	22	24
Co (%)		85	100	95,35	98,2	96,2	98,2	96,6	94
C_s (kg/m ²)	Fi	3,73	1,89	3,25	2,51	2,54	3,38	1,64	1,78
	Total	4,26	1,89	3,32	2,57	2,60	3,79	1,64	1,79
ρ_{aps} (kg/m ²)	Fi	7,32	7,92	10,82	8,59	8,80	7,90	7,23	7,42
	Total	8,26	7,95	11,05	8,77	9	8,83	7,25	7,48
σ (m ⁻¹)		7699	6786	6336	6788	6492	7039	7030	6989
ρ_m (kg/m ³)		523	554	569	554	564	546	546	547
PCS (kJ/kg)		23315	22508	22201	22781	22665	23037	22795	23143
β	Fi	0,014	0,0143	0,01902	0,01551	0,01560	0,01447	0,01324	0,01356
	Total	0,01579	0,01435	0,01942	0,01583	0,01596	0,01617	0,01328	0,01367

* Valors estimats

5.2.2. Descripció de les proves

L'objectiu principal de la segona campanya d'experiments fou el de realitzar una anàlisi quantitativa aprofundida de l'efecte dels retardants, tot aplicant els coneixements adquirits durant la primera campanya. Certament les condicions foren més favorables per a la consecució d'aquesta fita, ja que les parcel·les foren en aquest cas idònies –tant pel que fa a la seva homogeneïtat i topografia– les condicions ambientals en el moment de la crema també foren adequades i les ignicions es pogueren dur a terme de la manera desitjada. Així, es milloraren les metodologies implementades a Gestosa i se n'incorporaren de noves, atenent el disseny d'aquestes realitzat durant la campanya anterior.

Aplicació de retardant. Disseny de franges i metodologia

Els retardants disponibles i llurs característiques foren els mateixos que anteriorment. Altrament, s'incorporaren modificacions pel que fa al disseny de franges. Les parcel·les tractades amb FIRETROL 934, també dissenyades pel projecte europeu ERAS, seguiren la pauta de Gestosa. En aquest cas, tingueren una amplada de 4 m, ja que les parcel·les en sí també foren de menor mida. Pel que fa a les tractades amb FR CROS 134P, diferiren en quant als anteriors criteris de disseny. Per tal de poder observar millor la reducció en la propagació del front, es disposaren sobre tota la superfície del terç superior de les parcel·les, que correspongué a 7 m d'amplada, aproximadament. Les dilucions i dosificacions es recopilen en la taula 5.7 i segueixen, en termes genèrics la tendència de Gestosa. La figura 5.10 a) il·lustra aquesta tasca.

Taula 5.7. Paràmetres d'aplicació del retardant.

Paràmetres d'aplicació	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715
Dilució (%)	15	15	15	20	20	20	15	10	20	10	5	15	15	20	20
Dosificació (l/m ²)	3	3	3	3	3	3	5	1	1	1	1	5	5	5	5

L'aplicació es dugué a terme el dia abans de la realització de la crema i el mecanisme d'aplicació fou, per les parcel·les de FIRETROL 934, el sistema mànega-motobomba (Figura 5.10. b)). Degut a la problemàtica detectada a Gestosa amb l'aplicació automàtica del producte FR CROS 134P, aquest es distribuï

manualment mitjançant uns dipòsits de dispersió. D'aquesta manera s'assegurà una aplicació homogènia i més controlada de la mescla. En la figura 5.11 s'hi representen diverses imatges d'aquesta fase.

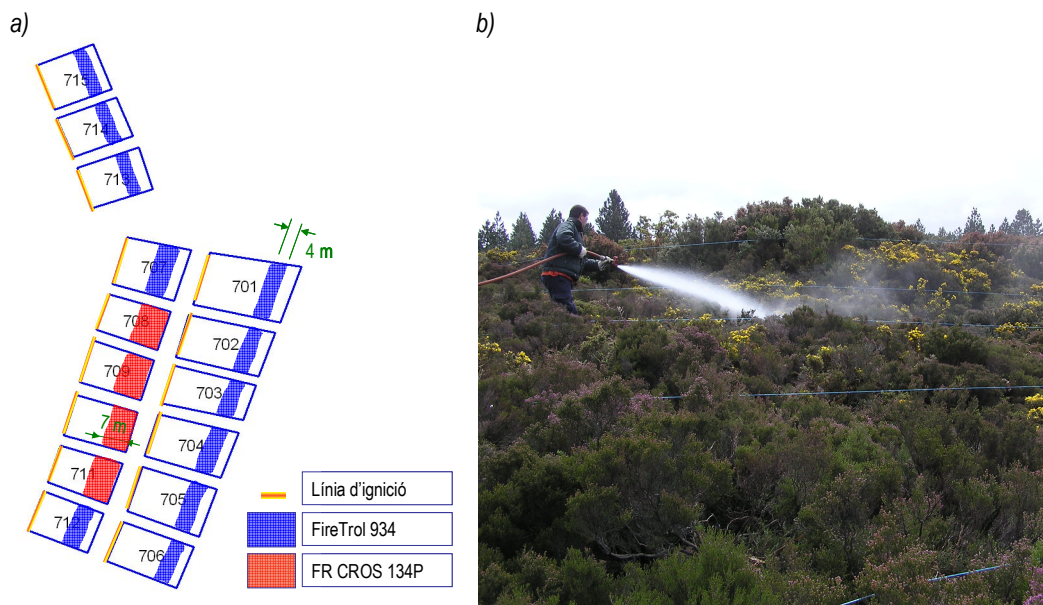


Figura 5.10. a) Configuració de les franges retardants. b) Aplicació del producte Fire Trol 934.

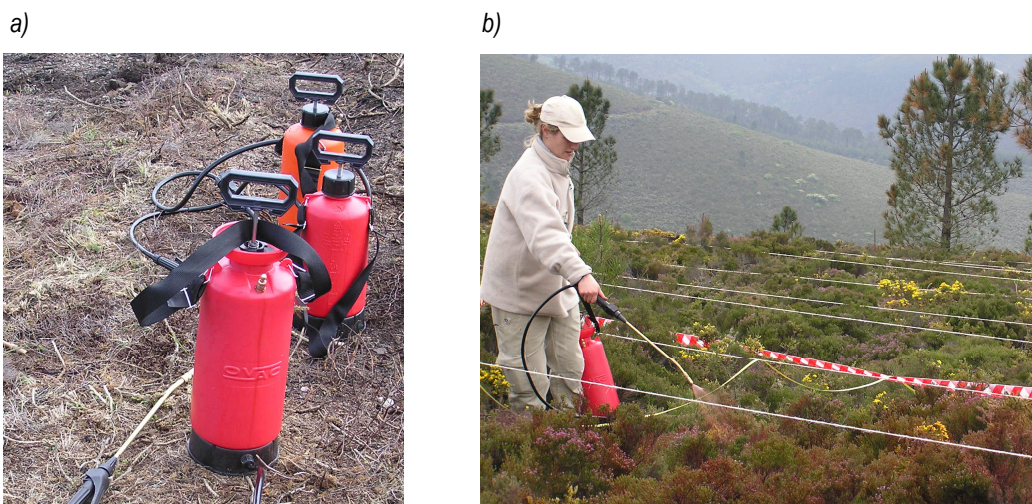


Figura 5.11. a) Dipòsits de dispersió b) Aplicació manual del producte FR Cros 134 P.

c)



Figura 5.11 continuació c) Àrea parcialment tractada amb FR Cros 134 P.

Sistemes de mesura per a l'estudi del comportament de foc

Amb l'experiència adquirida, es procurà millorar els sistemes de mesura més reeixits de l'experimentació anterior, implementar nous mitjans desenvolupats per tal d'adquirir aquelles variables de les que no es disposaven dades a Gestosa i, en darrer lloc, invalidar els sistemes menys eficients de la campanya precedent. D'aquesta manera, les tasques finals resultaren ser com s'explica tot seguit:

- *Mesura de la velocitat de propagació.* Es mantingué el sistema visual clàssic amb fils de nylon tensats i s'aplicà a totes les parcel·les. Es col·locaren els fils a menys distància, cada 2 o 3 m en les zones del primer estadi d'evolució del front i cada 1 m en la franja de tractament (figura 5.12). D'aquesta manera es pogué disposar de més dades per a l'estudi de la velocitat de propagació. Pel que fa a l'enregistrament d'imatges de vídeo –en aquest cas des de terra, en la posició de millor angle per a cada parcel·la– es realitzà per tal de tenir un registre complet de les proves. No es considerà, en primera instància, com a sistema per a la mesura de la propagació, degut a la

major complexitat que representa l'obtenció d'aquest paràmetre amb sistemes de tractament d'imatges. D'altra banda, es considerarà la validesa del primer mètode prou contrastada, sempre i quan es pogués garantir un front de característiques idònies.



Figura 5.12. a) Parcel·la discretitzada amb fils de nylon. b) Detall d'ancoratge.

- *Mesura de la taxa de combustió.* Les dimensions reduïdes de les parcel·les, impossibilitaren l'ús del GPS per resseguir el contorn de les illes no cremades dins les franges de tractament. Per aquest motiu, aquesta dada s'obtingué amb sistemes de mesura convencionals i mitjançant el tractament d'imatges de diverses fotografies preses amb posterioritat a la crema.
- *Mesura de temperatures.* Les cremes foren filmades amb la càmera de termografia infraroja emprada al laboratori de Barcelona. Concretament es pogué disposar d'aquest registre de les parcel·les en les que existí un camp de visió adequat. Per altra banda, la inclusió d'aquest equip significà un sistema addicional, perquè, en cas necessari, les velocitats de propagació poguessin ser contrastades.
- *Mesura de la velocitat de combustió.* Després de l'experiència adquirida en la campanya anterior es dissenyà un mètode per tal d'obtenir una estimació d'aquesta variable. Aquest mètode implicava l'execució d'un mostreig destructiu post-incendi per tal d'avaluar la massa residual

present en les franges de tractament. Amb les dades de l'inventari inicial i amb el còmput del temps de residència del front dins la zona amb retardant, es podia tenir un valor mitjà de la velocitat de combustió. Les inclemències meteorològiques dels dies posteriors a la segona campanya impediren efectuar el mostreig requerit.

- *Mesura de la humitat del combustible i de les variables atmosfèriques.* El contingut d'aigua del combustible fou avaluat de la mateixa manera que a Gestosa. Pel que fa a les variables atmosfèriques, foren extretes d'una estació meteorològica situada a la zona experimental. Paral·lelament, es disposà d'equips manuals més senzills per tal de tenir un control immediat de la velocitat del vent, la temperatura ambient i la humitat relativa.

Execució de la crema

S'aconseguien reproduir ignicions lineals amb les torxes de degoteig en la majoria de les parcel·les. A banda, aquesta linealitat es mantingué durant bona part de l'avanç del front en la majoria de parcel·les, ja que les condicions de vent i pendent hi afavoriren. Durant el transcurs de cada prova s'anotaren les observacions del trencament dels fils de nylon (amb les mateixes particularitats que en la campanya precedent), s'enregistraren les imatges termogràfiques i visuals i es prengueren fotografies digitals de detall, com les que mostra la figura 5.13. La imatge 5.13 a) correspon a la ignició lineal d'una de les parcel·les, b) exemplifica un instant del front ja evolucionat i, en darrer lloc, a c) s'hi observa com es va aturant el front per l'efecte del retardant.

5.2.3. Resultats

Mesura de la velocitat de propagació

Anàlisi de la velocitat de propagació control

En el cas de l'experimentació a camp, la velocitat de propagació control (R_0) es determinà avaluant l'avanç del front per la zona prèvia a la franja retardant. De la mateixa manera que al laboratori, s'estudià d'entrada l'efecte de les característiques del combustible sobre aquesta velocitat. Atesos els resultats trobats als assajos al laboratori pel que respecta a la influència dels paràmetres del combustible sobre V_0 i R_0 , es restringí l'estudi de R_0 a camp, a l'anàlisi de les dues combinacions de paràmetres seleccionades en el capítol anterior, expressades en les equacions 4.3 i 4.8.



Figura 5.13. a) Ignició, b) evolució c) retard del front en l'execució d'una prova.

D'aquesta manera s'avaluà la dependència de R_0 , observant les correlacions següents:

$$R_0 \left(\frac{\eta \sigma h PCS}{\rho_m Hs} \right) \tag{5.1}$$

$$R_0 \left(\frac{\eta \sigma h}{\rho_m Hs} \right) \tag{5.2}$$

Ambdues relacions s'observen en la figura 5.14 a) i b). En la primera d'elles es representen els valors de la velocitat de propagació atenent l'expressió (5.1). S'observa una clara alineació dels punts ($R^2 = 0,945$), exceptuant-ne dos d'ells (corresponents a les parcel·les 702 i 715). En la següent representació, s'observa igualment l'alineació de l'expressió (5.2), en aquest cas amb una coeficient de correlació una mica menor ($R^2 = 0,940$), exceptuant-ne també dos dels punts experimentals. En aquesta segona gràfica també s'hi inclou l'evolució de la velocitat de propagació amb les mateixes característiques combinades del combustible per als assajos de control del laboratori, representada en la figura 4.39 del capítol anterior. S'observa com dos dels punts experimentals de Trevim 2004 queden molt més propers a la correlació del laboratori que no pas a la genèrica del treball experimental a camp. Aquesta gran diferència es pot interpretar analitzant les velocitats del vent que afectaren a l'avanç del front en cadascuna de les parcel·les. En la taula 5.8 es recullen les mitjanes d'aquestes velocitats, confrontades amb els valors de R_0 .

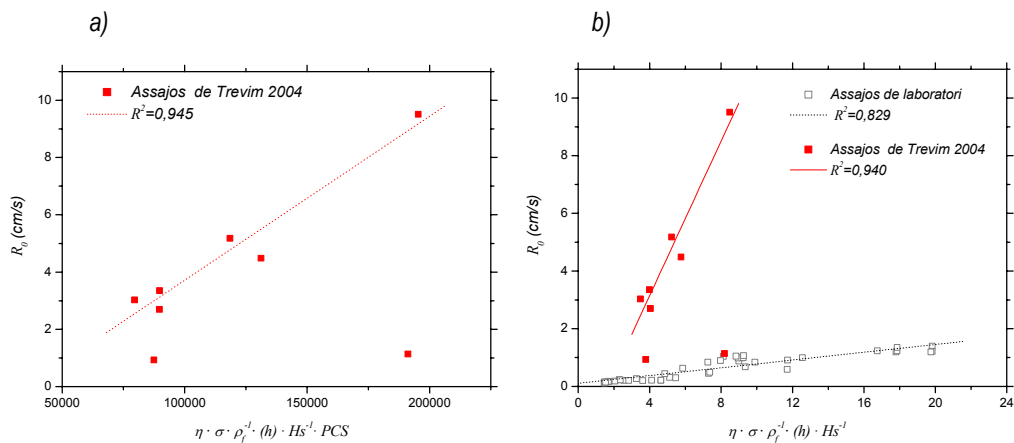


Figura 5.14. a) i b) Relació de la velocitat de propagació control amb els paràmetres característics del combustible.

Taula 5.8. Valors de les velocitats de propagació i les velocitats del vent, per a les parcel·les d'estudi.

Paràmetre	702	703	706	709	710	711	714	715
Velocitat de propagació R_0 (cm/s)	1,14	3,35	2,7	4,49	5,18	9,51	3,03	0,93
Velocitat del vent u (m/s)	-1,6	4,1	4,1	4,5	4,1	5	4	0,01

Si bé tots els assajos de Trevim que es poden representar alienats es dugueren a terme amb velocitats mitjanes del vent d'entre 4 i 5 m/s, els dos que se situen propers a la correlació experimental del laboratori es realitzaren amb velocitats de vent pràcticament nul·les. A més, en el cas de la parcel·la 702, la velocitat del vent, tot i ser suau, fou contra pendent. Aquesta observació porta a concloure que el mecanisme de transferència de calor que actuaren en la propagació dels fronts experimentals al laboratori i en la propagació dels fronts de les parcel·les 702 i 715 foren els mateixos. La radiació és el mecanisme de transferència de calor dominant en la propagació de fronts sense vent ni pendent. Els del laboratori certament tingueren aquestes característiques i els dos de Trevim sense vent foren realitzats, a l'igual que tots els altres, sobre pendents molt suaus. És per aquest motiu pel què els punts experimentals de les parcel·les 702 i 715 s'alineen amb els del laboratori, tanmateix queden posicionats per la banda superior de la recta de regressió.

A fi d'alinejar tots els punts experimentals enregistrats en aquesta campanya, incloent els de les parcel·les 702 i 715, es modificà l'expressió (5.1) –que fou la relació que manifestà major correlació d'entre les dues anteriors– incorporant la velocitat del vent en l'equació, de la següent manera:

$$R_0 \left(\frac{\eta \sigma h PCS}{\rho_m Hs} \cdot \left(1 + \frac{u}{u_{\max}} \right) \right) \quad (5.3)$$

On:

u_{\max} Velocitat del vent mitjana màxima d'entre tots els assajos; 5 m/s.

Per bé que l'efecte del vent en la propagació d'un incendi és certament complex, l'expressió precedent representa una manera senzilla i conceptualment molt entenedora per a quantificar-lo. Aquesta darrera dependència es representa en la figura 5.15. Cal destacar-hi l'elevat coeficient de correlació. $R^2 = 0,945$.

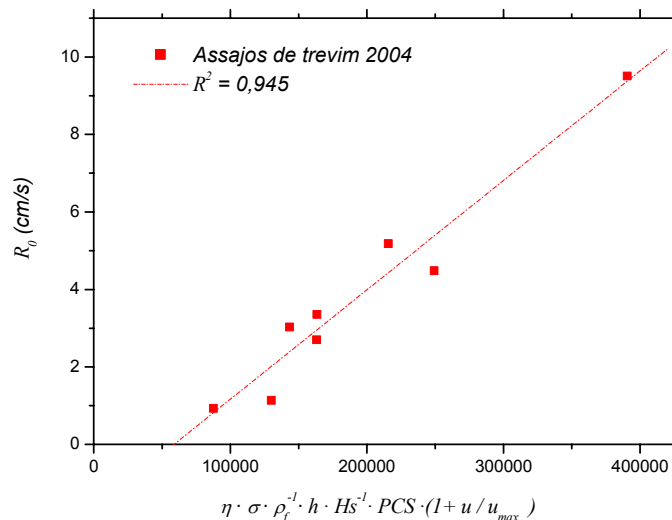


Figura 5.15. Relació de R_0 amb els paràmetres característics del combustible, considerant l'efecte del vent.

Anàlisi de l'efecte del retardant sobre la velocitat de propagació

Per tal de aconseguir la màxima analogia amb l'anàlisi dels assajos a laboratori, s'estudià la velocitat de propagació en les franges retardants per mitjà de la definició dels mateixos paràmetres emprats en el capítol precedent. D'aquesta manera s'utilitzà m_r (g/kg) per a designar la quantitat total present de retardant sec (és a dir, sense contar-hi l'aigua de dilució de la formulació líquida concentrada) per kg de combustible.

El paràmetre m_a (g/kg) designà l'aigua residual del tractament present en el moment de la ignició. Degut a que aquesta s'efectuà al cap de 24 hores de l'aplicació de tractament, es considerà que l'aportació a aquest paràmetre provingué únicament de l'aigua present en el líquid concentrat, és a dir, es tingué en compte que tota l'aigua emprada en la preparació de les dilucions s'havia evaporat. D'aquesta manera, la posició relativa i l'ordre de magnitud d'aquests dos paràmetres queda tal i com es representa en la figura 5.16. S'hi distingeixen amb colors vermell i blau els assajos realitzats amb retardant FR Cros 134P i amb Fire Trol 934, respectivament. La posició sobre el pla (m_a , m_r) de cadascun d'aquests punts, il·lustra molt bé les

diferències existents entre les metodologies que s'utilitzaren en l'aplicació del tractament de les dues formulacions diferents. A més a més, en aquesta figura també s'hi pot observar el rang experimental amb què es treballà al laboratori en comparació amb el rang dels assajos a camp.

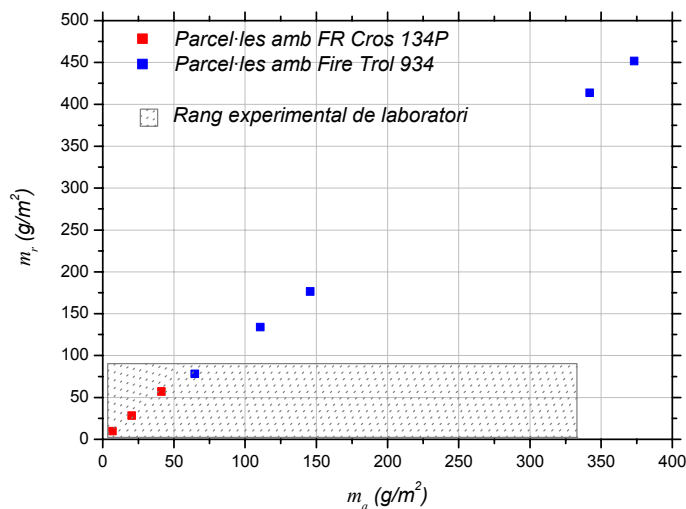


Figura 5.16. Representació gràfica del pla experimental generat per la combinació dels paràmetres m_a i m_r pels assajos a camp a Trevim 2004.

Finalment s'utilitzà el paràmetre ω , emprat també en el capítol anterior, per a designar la taxa de reducció de la velocitat de propagació. La corba de nivell $\omega(m_a, m_r)$ extrapolada a partir de les dades experimentals de camp, es representa en la figura 5.17. S'hi inclouen conjuntament els assajos de FR Cros 134 P i de Fire Trol 934 per tal d'observar la tendència global del paràmetre ω , tot i tractar-se de dues formulacions clarament diferenciades.

La morfologia de la corba de nivell descriu un descens molt evident de la velocitat de propagació a mesura que s'incrementa la quantitat de retardant i la quantitat d'aigua. En comparació amb les corbes de nivell calculades en el capítol anterior, aquesta corba presenta una relativa simetria, la qual cosa indica una resposta similar o del mateix ordre en ω , enfront de canvis iguals de m_a i de m_r . Això és degut a que la quantitat d'aigua que es té en compte en aquesta anàlisi és únicament l'aigua present en la formulació líquida concentrada i, aleshores, el percentatge màssic de retardant i aigua en aquest líquid és de l'ordre de

40-45% d'aigua per un 60-55% de retardant, en a totes les formulacions estudiades. En cap cas es considerà l'efecte de l'aigua de dilució necessària per a preparar les mescles, responsable de la diferència d'escala entre els eixos m_a i m_r del capítol anterior.

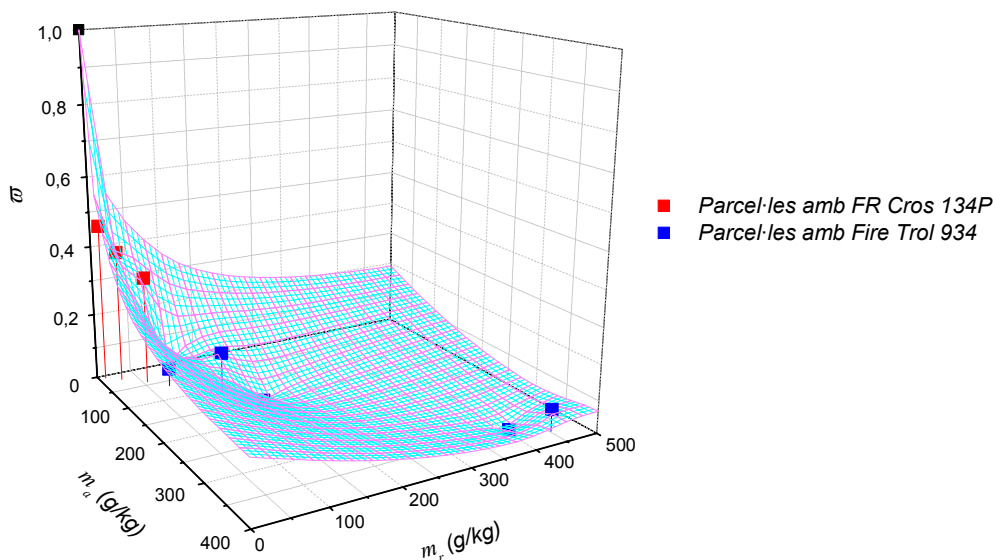


Figura 5.17. Taxa de reducció de la velocitat de propagació pels assajos a camp de Trevim 2004.

D'altra banda, l'ordre da magnitud dels valors m_a i m_r , en els assajos a camp és sensiblement superior als assajos al laboratori, ja que el volum de mescla distribuït per metre quadrat de llit fou també major. Nogensmenys, observant més detingudament qualsevol dels plans (ω, m_a) o (ω, m_r) de la figura precedent, i centrant l'atenció dins la part del rang experimental coincident amb el rang de laboratori, s'observa l'alt grau de similitud entre ambdues escales (figura 5.18).

En aquesta figura es representa la variació de ω en funció de la quantitat de retardant aplicada per kg de combustible. S'hi distingeix una ampliació de l'escala de l'eix d'abscisses just en l'interval $(0 < m_r < 90)$, que correspon a la part del rang que coincideix amb el rang experimental de laboratori. La disminució de ω en aquesta zona d'estudi presenta una morfologia molt similar a l'observada al laboratori, per tant, es calculà una funció polinòmica de tercer ordre que s'ajustés millor als valors experimentals.

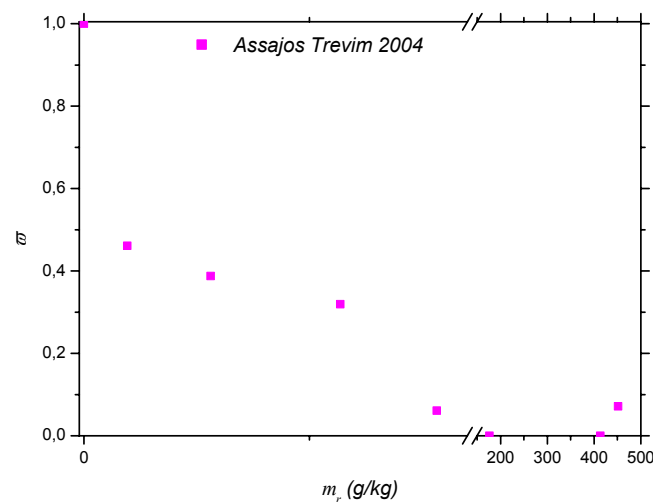


Figura 5.18. Tendència $\omega(m_r)$ observada en els assajos de camp a Trevim 2004.

Cal dir que la correlació no fou òptima i que la funció determinada no fou sempre decreixent en tot el seu domini (restricció fonamental tant a l'estudi de laboratori com a l'estudi a camp). Amb tot, s'ha de tenir present la convivència de les dues formulacions així com una heterogeneïtat més gran observada a camp en multitud de factors (configuració del llit de combustible, distribució del tractament, condicions atmosfèriques variables, etc.), en comparació amb les condicions més controlades i homogènies amb les què es treballà al laboratori.

En qualsevol cas, l'interval d'estudi més adequat per a l'observació de la tendència de decreixement $\omega(m_r)$ en assajos a camp és sens dubte el seleccionat $[0,90]$, ja que més enllà d'aquest interval el paràmetre ω és molt proper a 0 o equivalent. Això significa que els fronts d'incendi experimentals que s'inclouen en la part del domini m_r més elevada ($100 < m_r < 500$) s'extingiren instantàniament o gairebé de manera immediata a l'arribar a la franja de tractament.

Mesura de les temperatures i càlcul de la taxa de refredament

La utilització de la càmera de termografia infraroja permeté dur a terme un estudi aprofundit sobre l'efecte dels productes retardants en la temperatura de l'incendi i la taxa de refredament degut a la presència d'aquests. Degut a les dificultats inherents al treball de camp, es realitzà aquesta tasca en tres de les

parcel·les del programa, 709, 710 i 711, ja que foren únicament aquestes les que possibilitaren una ubicació idònia dels aparells. El procediment d'anàlisi fou similar al dissenyat al laboratori, salvant òbviament les diferències en la metodologia experimental. Així, en primer lloc, s'enregistrà el pas del front per a cadascuna d'aquestes parcel·les a una velocitat de 5 imatges per segon –la màxima que permet aquest equip– des de la posició més adequada pel que fa al camp de visió. La figura 5.19. il·lustra, a tall d'exemple, 3 instants de la crema de la parcel·la 709. Corresponen respectivament a la ignició, desenvolupament i pas a la franja retardant. La taula 5.9 recull els paràmetres de l'enregistrament requerits per a cada parcel·la, per tal de poder realitzar els càlculs tèrmics de manera correcta.

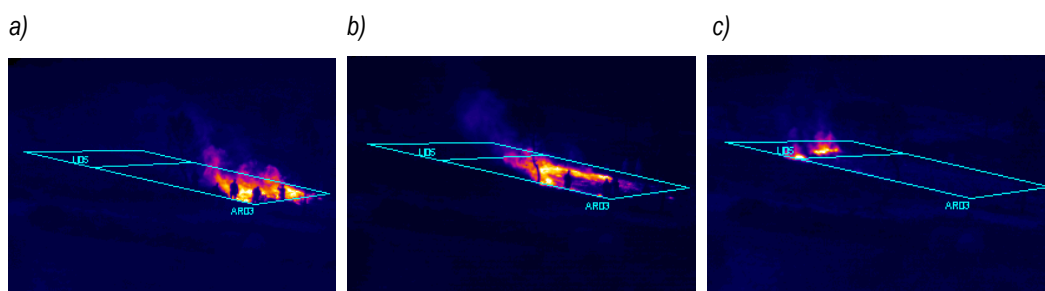


Figura 5.19. Imatges termogràfiques de la parcel·la 709. a) Ignició, b) evolució c) retard del front.

Taula 5.9. Paràmetres de l'enregistrament termogràfic.

Paràmetres d'aplicació	709	710	711
Distància de l'enregistrament (m)	100	120	140
ε (-)	0,9	0,9	0,9
HR (%)	50	48	48
T_{amb} (K)	19	15	15

El següent pas de l'anàlisi fou la detecció dels punts calents de la parcel·la al llarg de tot el transcurs del front d'incendi, definits com aquells la temperatura dels quals era superior a 600K. Així, es discretitzà la filmació seleccionant l'interval comprès entre la ignició i el trencament de l'últim fil de nylon –per tal de poder tenir una seqüència comparativa amb l'estudi de la velocitat de propagació– i d'aquest se n'extragué una

imatge per minut, aproximadament. De la mateixa manera que al laboratori, s'emprà el programari *ThermaCAM™ Researcher 2001* per a la detecció dels punts. La figura 5.20 recull dues imatges termogràfiques on s'hi observen les taques conformades per aquests. 5.20.a) correspon a un instant del desenvolupament de l'incendi en la parcel·la 709 i 5.20.b) il·lustra el pas d'aquest front per la franja retardant. Es presenten acolorides atenent els intervals de l'escala tèrmica inclosa a la part dreta de la figura.

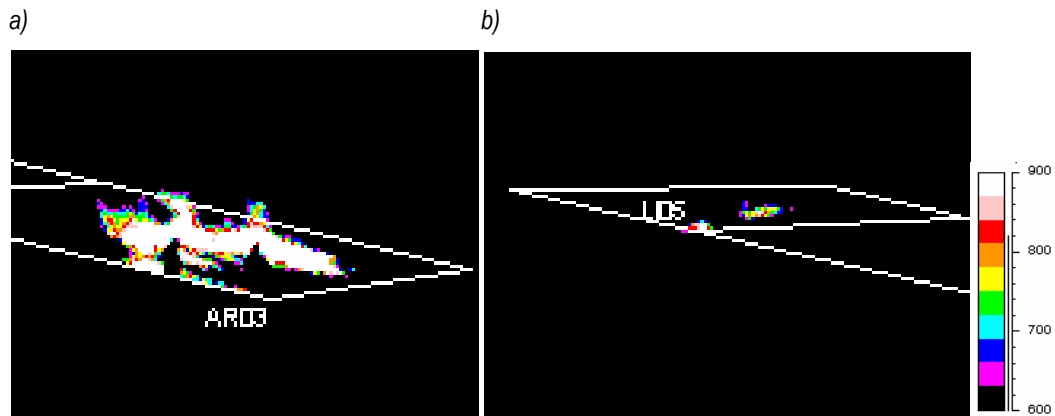


Figura 5.20. Imatges termogràfiques de la parcel·la 709. a) evolució b) retard del front.

Seguidament s'estudiaren les dimensions d'aquestes taques al llarg del temps per tal de determinar-ne el seu factor de reducció degut a la presència de retardant. La figura 5.21 a) correspon a la representació gràfica de l'evolució temporal de la mida de la taca. Aquesta darrera s'expressa com a relació no dimensional entre la mida instantània i la dimensió màxima assolida al llarg de tot el seu recorregut, mentre que l'escala temporal s'expressa percentualment. D'aquesta evolució se'n determinaren uns valors mitjans representatius del dos períodes del transcurs del foc, el primer corresponent a l'avanç sense efecte de retardant i el segon referit al pas per la franja tractada. La relació d'ambdós valors donà un tercer que il·lustrà la taxa de reducció de la taca de punts calents per efecte del retardant (γ).

Aquesta taxa es representa gràficament en la figura 5.18 b) en funció del factor de dilució del tractament aplicat a cada parcel·la. En aquesta figura queda palesa la linealitat de l'efecte. Així, per a una concentració del 20% corresponent a la parcel·la 709, la taca de punts calents es reduí en un 73%. Pel que fa a la parcel·la 710, on s'hi aplicà la mateixa quantitat de mescla, diluïda en aquest cas al 10%, la reducció fou

d'un 41%. En darrer lloc, s'assolí una disminució de grandària de taca d'un 21% en la parcel·la 711 on el tractament fou al 5%.

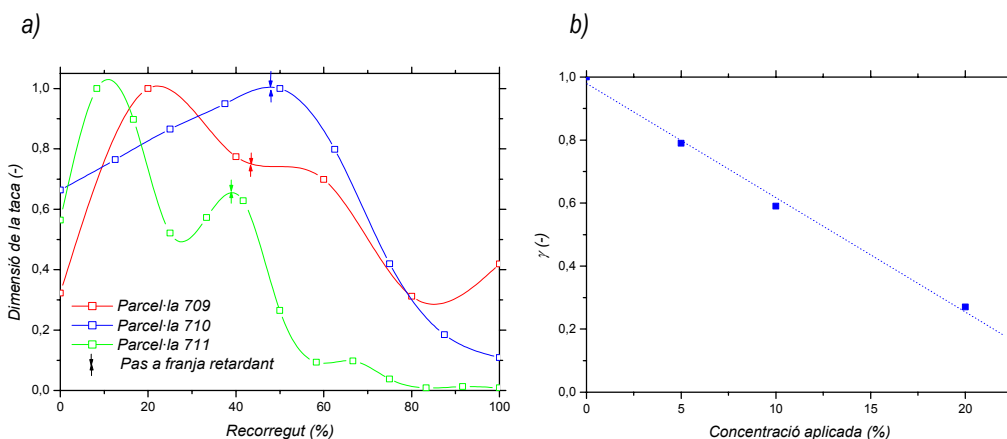


Figura 5.21. a) Evolució temporal de la grandària de la taca de punts calents per a les parcel·les 709, 710, 711. b) Representació gràfica del factor de reducció γ en funció del factor de dilució de la mescla retardant.

A continuació, es dugué a terme l'anàlisi de la distribució de temperatures assolides dins la taca de punts calents durant el recorregut del front, diferenciant-ne novament les dues fases referides a l'absència o presència de retardant. Es determinà el percentatge de punts inclosos dins els següents intervals de temperatura (K): [600-700], [700-800], [800-900] i [>900]. D'aquesta manera es generaren les gràfiques il·lustrades en les figures 5.22.a) b) i c). En elles s'hi observen les quatre regions referents als intervals de càlcul. A la seva vegada, cadascuna d'aquestes es subdivideix en dues, atès el moment en què el front creuà la franja. En la imatge 5.22 a), realitzada a partir de l'anàlisi de la parcel·la 709, s'evidencia clarament la disminució de temperatures causada pel retardant al llarg del transcurs del front per la franja. Així, les àrees corresponents als intervals [>900], [800-900] i [700-800] es veuen reduïdes substancialment a mesura que el foc es veu afectat pel producte, en detriment, però, de l'àrea de l'interval [600-700], la qual es veu òbviament incrementada. Aquesta tendència, més diluïda, s'observa també en la figura 5.22 b), que correspon a la parcel·la 710, mentre que en la 5.22 c) l'efecte s'evidencia únicament durant els primers estadis de la franja retardant, desapareixent pràcticament en els últims instants de pas del front. Aquesta darrera imatge correspon a la parcel·la 711, tractada amb una mescla del 5%.

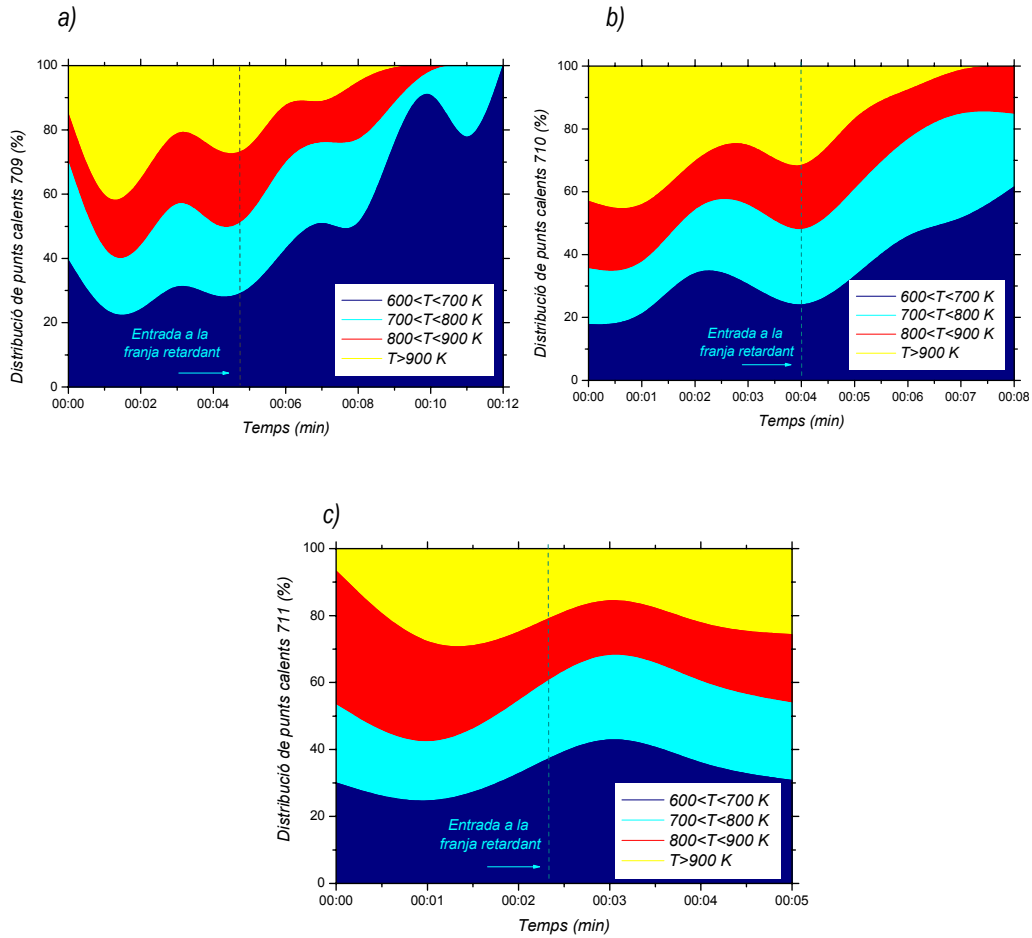


Figura 5.22. a) Evolució de la distribució percentual de temperatures durant el pas del front per les parcel·les a) 709, b) 710 i c) 711.

D'aquestes imatges se n'extragueren el percentatges ocupats per a cadascuna de les vuit regions descrites. En la taula 5.10 s'hi recullen sengles resultats. S'hi observen els paràmetres p_n , que corresponen als valors percentuals que componen l'àrea referida a l'avanç del front sense retardant, i per altra banda també s'hi inclouen els paràmetres p'_n , per l'àrea on l'avanç del front transcorre sota l'efecte del tractament. Així es pogué avaluar, seguint l'expressió (4.13) desenvolupada en el capítol anterior, les reduccions parcials de la taca calenta, atesos aquests intervals de temperatura.

Taula 5.10. Distribució percentual de temperatures.

Parcel·la	Avanç sense retardant				Avanç amb retardant			
	p_1 [>900 K]	p_2 [800-900 K]	p_3 [700-800 K]	p_4 [600-700 K]	p'_1 [>900 K]	p'_2 [800-900 K]	p'_3 [700-800 K]	p'_4 [600-700 K]
709	30,2	20,4	22,1	27,3	6,9	11,1	19,6	62,4
710	35	18,4	20,4	26,2	10,6	17,9	29,2	42,3
711	23,4	28,3	20,1	28,2	20,6	17,7	24,5	37,2

A partir d'aquests percentatges, tal i com es feu en el capítol 4, es pogueren determinar les temperatures mitjanes ponderades del front durant el seu pas per la zona tractada i per la franja retardant. D'aquesta manera es pogué calcular també el paràmetre κ , corresponent a la taxa de reducció de temperatura. En la taula 5.11 es recullen els valors de temperatura mitjans enregistrats, així com el corresponent factor de reducció d'aquests.

Taula 5.11. Temperatures i taxa de reducció.

Parcel·la	T_0 (K)	T (K)	κ
709	803	712	0,886
710	812	747	0,918
711	797	772	0,969

Finalment, elevant el factor κ a la quarta potència i multiplicant-lo per γ , tal i com es contempla en l'expressió (4.19), s'obtingué la taxa de refredament per aquests tres assajos a camp. En la figura 5.23 se n'observa llur evolució en funció de la concentració de retardant aplicada.

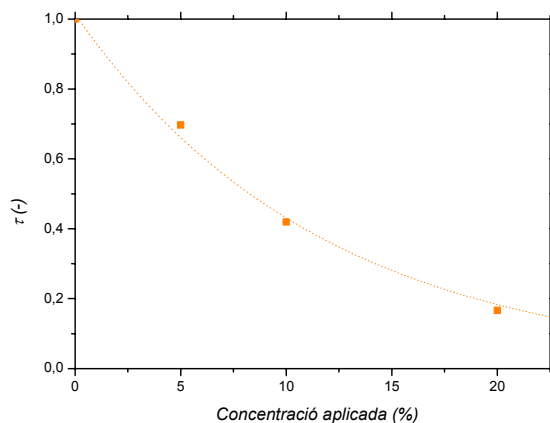


Figura 5.23 Representació gràfica de la taxa de refredament en funció de la concentració aplicada per a les parcel·les 709, 710 i 711.

Mesura de la taxa de combustió

En aquesta segona campanya experimental, la taxa de combustió es mesurà igualment a partir del càlcul de l'àrea cremada respecte tota la zona tractada amb retardant, per a les parcel·les d'estudi. En aquest cas les mesures es realitzaren gràficament sobre fotografies de vistes aèries de la zona experimental, preses des d'un helicòpter. Amb els programaris adequats de tractament d'imatges i amb eines tipus CAD s'obtingueren les relacions percentuals pel que fa a les dimensions de la zona combustionada en referència a la totalitat de la franja. Conceptualment, aquesta tècnica fou exactament la mateixa que l'aplicada en la campanya anterior. En la taula 5.12 es recullen aquests valors i en la figura 5.24, una vista aèria de les parcel·les 714 i 715 amb l'extracció d'aquestes parcel·les acolorides per al seu anàlisi.

Taula 5.11. Taxa de combustió.

Paràmetre	702	703	706	709	710	711	714	715
η (%)	7,5	7,1	7,2	53,6	87,6	98	36,3	35,8

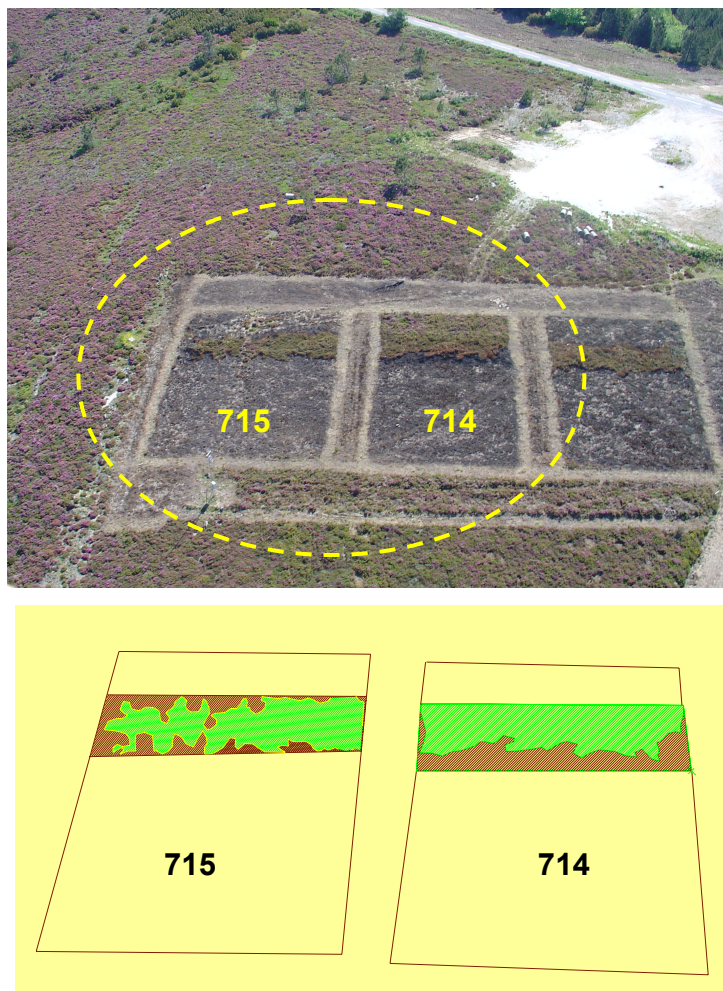


Figura 5.24. Fotografia aèria de les parcel·les 714 i 715 i tractament de la imatge per al càlcul de la taxa de combustió.

En la figura 5.25 es representa gràficament la disminució de la taxa de combustió en funció de la concentració de retardant aplicada per a les parcel·les 709-711, que foren les seleccionades per a l'estudi de la formulació FR Cros 134 P. Pel que fa a la taxa de combustió de les altres parcel·les, cal dir que llurs resultats són merament anecdòtics; les franges retardants aplicades sobre aquestes no cobriren la part superior de la parcel·la i, degut a aquesta configuració, un cop aturada la crema, el combustible disponible més enllà de la franja fou eliminat en algunes parcel·les com la 715 amb una línia d'ignició que avançà de

cap i contrapendent. Quan aquesta arribà a la franja retardant s'anà aturant, per bé que consumí també part del combustible tractat.

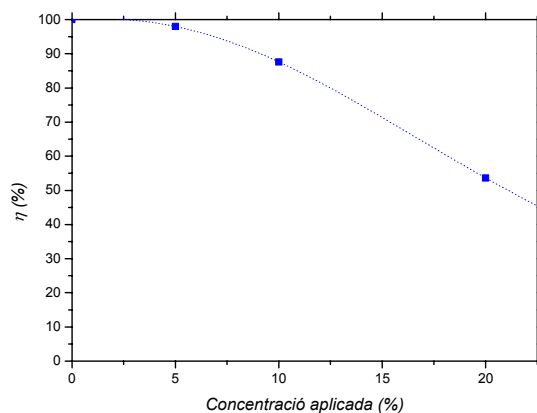


Figura 5.25. Representació gràfica de la taxa de combustió en funció de la concentració aplicada per a les parcel·les 709, 710 i 711.

5.3. Conclusions

Les dues campanyes experimentals a camp foren molt profitoses en tots els sentits. D'una banda, la preparació de les cremes permeté conèixer i aplicar tècniques de mostreig de combustible i de mesura de les variables topogràfiques i atmosfèriques, amb la qual cosa es tingué un coneixement exhaustiu del territori de les cremes en tots els aspectes que influeixen en el comportament del foc. Això es pogué dur a terme gràcies a la sinergia entre tots els grups i projectes de recerca implicats en ambdues campanyes.

S'aplicaren diferents metodologies experimentals tant pel que fa a l'aplicació del tractament retardant com a la mesura de les diferents variables del comportament de l'incendi. En primer lloc, es practicaren dues tècniques de distribució de tractament –una manual i l'altra mecanitzada– amb la qual cosa es pogué tenir una idea contrastada sobre la dificultat i la precisió relatives d'ambdues. Seguidament es pogué avaluar les avantatges i els inconvenients de dues tècniques de mesura de la velocitat de propagació, ateses llurs implementacions pràctiques i també considerant la qualitat i facilitat de l'anàlisi dels resultats que se n'obtingueren. De la mateixa manera, es procedí amb la taxa de combustió i amb la temperatura.

S'aconseguí implementar metodologies experimentals anàlogues a les emprades al laboratori per estudiar els mateixos paràmetres a escales diferents.

Així doncs, l'experiència adquirida durant la campanya del 2003 permeté millorar els diferents procediments de mesura per tal d'obtenir unes dades fidels i de qualitat en la segona campanya. En aquest sentit cal remarcar que els resultats esdevinguts de Trevim 2004 han permès analitzar amb certa profunditat la influència de les característiques del combustible i del vent en la velocitat de propagació dels fronts experimentals. Paral·lelament s'ha estudiat amb detall l'efecte del retardant en la velocitat de propagació i ha pogut ser comparat amb els resultats obtinguts al laboratori, observant-ne grans similituds. En aquest sentit, també han estat adaptades amb èxit les metodologies d'anàlisi de temperatures desenvolupades en el capítol anterior, podent descriure i computar igualment una taxa de refredament per a tres de les proves a camp.

6. MODELITZACIÓ MATEMÀTICA DELS FENÒMENS OBSERVATS

Al llarg d'aquesta memòria han estat identificats diversos fenòmens pel que fa al comportament de foc, tant a escala de laboratori com a camp, i a més, s'ha distingit en tot moment els condicionants de l'evolució del front. És a dir, s'ha fet especial atenció a les característiques físiques del combustible, a les condicions ambientals de les proves i òbviamment, als tractaments retardants aplicats, exceptuant, és clar, el cas dels assajos anomenats de control.

En aquest capítol es pretén fer un pas més en aquest sentit, i desenvolupar, mitjançant la modelització matemàtica una eina de predicció que permeti explicar algun d'aquests fenòmens. Per bé que tant els assajos de laboratori com els de camp són d'un interès inqüestionable, en els propers apartats s'aborden únicament certs aspectes en la modelització dels primers. Això és degut principalment al major nombre de dades disponibles de laboratori en comparació als assajos a camp, requeriment certament indispensable per a efectuar un procés de modelització rigorós i amb finalitat predictiva.

Així doncs, d'entre tots els fenòmens observats al laboratori, el que té una importància cabdal és, sens dubte, la propagació del foc. Tot seguit es modelitza la velocitat de propagació dels assajos realitzats a Barcelona, tant els de control, com els que estigueren condicionats a la presència de tractament.

6.1. Modelització matemàtica de la velocitat de propagació dels assajos control

En el capítol 2 ha estat recopilada una revisió bibliogràfica extensa dels principals models de propagació d'incendis elaborats des dels inicis dels anys quaranta. S'ha realitzat una crítica de les diferents tendències en modelització; teòrica, semi-empírica i empírica, observant les avantatges i els inconvenients de cadascuna d'aquestes línies, però en cap cas s'ha entrat en detall en l'observació de les expressions matemàtiques que els han conformat.

En aquest apartat és pertinent doncs l'observació amb detall de la configuració d'aquests models. D'entre tots ells, a continuació es presenta el model teòric desenvolupat per Anderson (1969) a finals de la dècada dels seixanta, ja que després d'una anàlisi prèvia dels models recopilats en la taula 2.1, fou aquest el que acomplí certs requisits. El model d'Anderson (1969) conté una base teòrica sòlida i tanmateix de gran simplicitat conceptual, i la seva vàlua resideix en la bona fiabilitat del model ateses aquestes particularitats.

6.1.1. Descripció del model teòric d'Anderson (1969)

Anderson (1969) desenvolupà una expressió matemàtica per a la determinació de la velocitat de propagació d'un front de foc bàsic, sense vent ni pendent, basat en la radiació com a principal mecanisme de transferència de calor.

Partint dels treballs de Thomas (1963) i Emmons (1964), Anderson expressà la calor necessària per a què un volum diferencial de combustible entrés en ignició, segons l'equació que segueix:

$$q = \int_0^{\infty} \frac{E_0}{R_0} e^{-\frac{x}{4\lambda}} dx \quad (6.1)$$

On:

q Calor, kJ/m².

λ Volum buit del llit de combustible, per unitat d'àrea, m³/m².

x Distància del front de foc al volum diferencial de combustible, m.

Integrant aquesta expressió i relacionant q amb les propietats intrínseques del combustible (σ , ρ_m) i amb la calor d'ignició (Q_i),

$$q = \frac{Q_i \rho_m}{\sigma/4} \quad (6.2)$$

Anderson obtingué la següent expressió compacta per a determinar la velocitat de propagació:

$$R_0 = \frac{\sigma \lambda E_0}{\rho_m Q_i} \quad (6.3)$$

Un estudi amb detall d'aquesta expressió porta a observar grans analogies amb les relacions exposades en el capítol 4, pel que fa a les correlacions de V_0 i R_0 amb les propietats del combustible (expressions 4.3 i 4.8). Tot seguit s'esmenten els punts més importants d'aquesta anàlisi.

Adequació del model als assajos control de laboratori

Les velocitats de combustió i de propagació són dos clars indicadors del vigor d'un front d'incendi. En l'apartat 4.3.3 ja ha quedat palesa la dependència entre ambdues i han estat apuntats els paràmetres bàsics que les relacionen. D'altra banda, aquesta relació ha quedat demostrada a la pràctica amb la gran similitud entre les equacions 4.3 i 4.8. Així, s'han correlacionat les dues velocitats amb una combinació de paràmetres tal que, en ambdós casos, el numerador es compon del producte entre la porositat del llit (η), la relació superfície-volum de les partícules (σ) i l'altura del combustible (h). L'única lleu divergència en aquest sentit és la inclusió del poder calorífic superior (PCS) de cada espècie en el cas de la velocitat de combustió i la supressió d'aquest en la velocitat de propagació, per bé que la consideració o omisió d'aquest paràmetre no afectà significativament el coeficient de correlació R^2 , emprat per a avaluar-ne la linealitat. Pel que fa al denominador d'aquestes dues expressions, es compon en tot cas amb el producte de la densitat (ρ_m) i el contingut d'aigua (H_s) de les partícules de combustible.

Atès aquest recordatori, l'observació de similituds d'aquestes relacions amb el model d'Anderson (1969) segueix a continuació, analitzant en primer lloc la consideració de les característiques intrínseques del combustible. Així, cal observar que en les tres expressions (4.3, 4.8 i 6.3) s'hi inclou la combinació σ/ρ_m , essent doncs aquesta la primera coincidència remarcable. Per altra banda, la consideració de les propietats

extrínseques del llit combustible també és equivalent, si bé cal introduir un petit incís en aquest sentit. L'empacament del llit fou considerat per Anderson (1969) amb el paràmetre λ , definit com el volum lliure del llit (volum total menys volum ocupat pel material) dividit per l'àrea superficial del llit. La correspondència dimensional i conceptual amb els paràmetres referits a les propietats extrínseques emprats fins al moment pot expressar-se amb la porositat (η) i l'altura (h) del llit:

$$\lambda = \eta h \quad (6.4)$$

Això explica la presència de la porositat i l'altura del combustible multiplicant al numerador, per a les expressions (4.3 i 4.8).

Pel que fa a la calor d'ignició contemplada en l'expressió d'Anderson (1969), pot ser determinada de manera senzilla a partir de la següent equació:

$$Q_i = C_f \Delta T_i + Hs (C_p \Delta T_{eb} + L_v) \quad (6.5)$$

On:

ΔT_i Increment de temperatura fins a la ignició, K.

L_v Calor latent de vaporització de l'aigua, 2254 kJ/kg.

La calor d'ignició es compon bàsicament de tres termes. D'una banda, de la calor necessària per a escalfar el combustible fins al seu punt d'ignició, determinada a partir de la calor específica del material –considerada constant per a totes les espècies i equivalent a $1,37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – i el salt tèrmic fins a la temperatura d'ignició. El segon terme correspon a la calor per escalfar la humitat present al combustible fins al punt d'ebullició i, finalment, cal comptabilitzar la calor latent de vaporització d'aquesta humitat. Queda clara doncs la dependència de la calor d'ignició amb el contingut d'aigua del combustible. En aquest cas l'analogia rau en la inclusió d' Hs en el denominador de les expressions 4.3 i 4.8 en referència al paràmetre Q_i situat també al denominador de l'expressió 6.3.

Finalment cal fer un darrer apunt sobre el poder emissiu inclòs en el model d'Anderson (1969). Aquest autor considera que la potència calorífica radiant responsable de la ignició del combustible prové de dues aportacions ben diferenciades. D'una banda, de l'energia emesa en forma de radiació per la zona de

combustió i, de l'altra, de la radiació emesa pel front de flames. Ambdós termes s'expressen amb la constant d'Stefan-Boltzmann, i amb sengles emissivitats i temperatures, aquestes darreres elevades a la quarta potència. En qualsevol cas, per tal de contemplar adequadament la part de radiació que rep el combustible adjacent al front d'incendi, Anderson (1969) també considera posteriorment un determinat factor de vista per a cadascuna de les dues aportacions. Aleshores, la correspondència en aquest sentit entre les expressions 4.3 i 4.8 i el model final d'Anderson (1969) no és tan directa com en els altres paràmetres. Si bé el PCS del combustible (contemplat únicament en l'expressió 4.3) és un indicador de la quantitat màxima d'energia que es pot desprendre en la combustió, no és un factor clau per a determinar la potència calorífica radiant que rep el combustible situat per davant del front. Amb tot, aquesta darrera similitud pot ser considerada com a tal, pel fet que en les expressions 4.3 i 6.3 hi apareixen el PCS i el E_0 respectivament al numerador, com a termes representatius de la font d'energia d'on prové la calor necessària per a la ignició del combustible.

6.1.2. Ajust del model d'Anderson (1969) a les dades experimentals

Tenint en compte totes aquestes consideracions prèvies, les expressions 4.3 i 4.8 foren finalment complementades per tal de poder testar el model escollit amb les dades experimentals dels assajos control. Primerament, es calculà la calor d'ignició per a cada assaig, amb les constants L_v , C_f , C_p , considerant una temperatura d'ignició de 600 K i prenent els valors experimentals d' H_s i T_{amb} . En la figura 6.1 es representa la calor d'ignició en funció de la humitat del combustible, pels assajos control realitzats a Barcelona. La linealitat que s'observa en aquesta figura permet l'adequació de la substitució d' H_s per Q_i en les expressions 4.3 i 4.8.

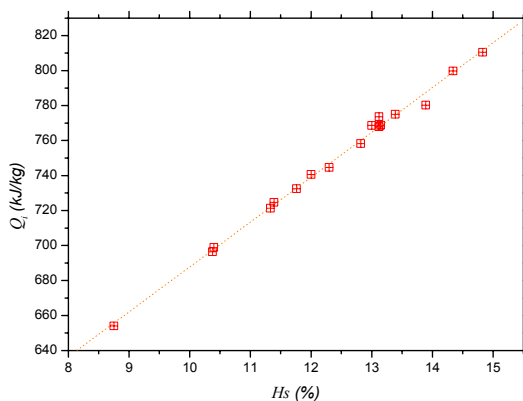


Figura 6.1. Evolució de la calor d'ignició amb la humitat del combustible, pels assajos control de Barcelona.

Seguidament, es realitzà un petit estudi per introduir al model, a partir de les dades experimentals, el terme corresponent a la font d'energia radiant proposat per Anderson (1969). Al capítol 4 ha estat exposada amb detall una metodologia de càlcul per tal d'avaluar la temperatura i la potència calorífica radiant d'un foc mitjançant termografia infraroja. Aquest procediment es desenvolupà però considerant les dues fonts d'energia radiant conjuntament (zona de combustió i front de flames). Nogensmenys, les dades que se n'extragueren permeteren dur a terme una aproximació del poder emissiu global en cada assaig control de Barcelona, enregistrat amb la càmera de termografia.

Amb la temperatura mitjana calculada tal i com s'explica en l'apartat 4.4 i emprant l'expressió 4.16, s'avaluaren els poders emissius dels assajos de control realitzats amb ordi, blat vell, blat nou i pi blanc. En la figura 6.2 es representen aquests valors per a cada espècie, en funció de la càrrega massica disposada en cada assaig.

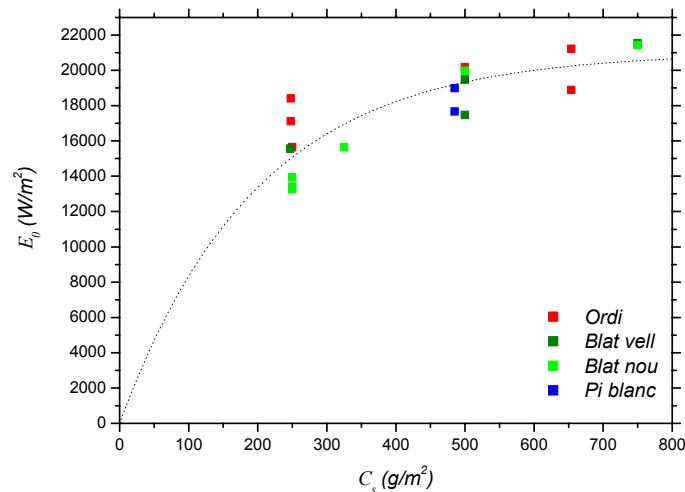


Figura 6.2. Evolució del poder emissiu amb la càrrega massica, pels assajos control de Barcelona.

En aquesta figura no s'observa una tendència clarament diferenciada per espècies, per bé que sí que s'hi intueix una tendència exponencial global de $E_0(C_s)$, reflectida tanmateix amb una línia de punts. Això posa de manifest que la intensitat total de radiació captada per la càmera de termografia augmentà, amb poca dependència de l'espècie utilitzada, a mesura que s'incrementà la càrrega dels assajos. Això fou degut,

d'una banda, a l'increment del poder emissiu de la zona de combustió amb la càrrega; i de l'altra, a l'increment de l'altura i gruix de les flames, esdevenint aquestes més emissives a mesura que s'augmenta C_s .

Tal i com ja s'ha mencionat prèviament, Anderson (1969) estimà uns factors de vista per a la zona de combustió i per a les flames, per tal d'avaluar correctament quina part de sengles poders emissius arribava al combustible adjacent a l'incendi i, per tant, participava en la ignició d'aquest. Per realitzar aquests càlculs Anderson (1969) es fixà amb la geometria del llit combustible i amb les dimensions del front d'incendi.

En l'experimentació duta a terme tant a Barcelona com a Coimbra, no es prengueren mesures detallades i exactes de la geometria del front de flames. Amb tot, sí que es detectà qualitativament un increment substancial de l'altura i el gruix de les flames a mesura que s'incrementà la càrrega massica d'una determinada espècie combustible. Amb aquesta observació, s'estimaren les longituds de flama a partir de l'expressió desenvolupada per Nelson i Adkins (1986) i es calculà un factor de vista horitzontal per una superfície diferencial de combustible adjacent a un front de flames rectangular i vertical, mitjançant l'expressió desenvolupada per TNO (1997):

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left[\arctg\left(\frac{1}{x_r}\right) - A x_r \arctg A \right] \quad (6.6)$$

$$x_r = \frac{x}{b} \quad (6.7)$$

$$h_r = \frac{L}{b} \quad (6.8)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}} \quad (6.9)$$

On:

- x Distància de la superfície diferencial de combustible al front de flames; 0,02 m.
- b Amplada del front de flames; 1 m.
- L Longitud del front de flames, m.

D'aquesta manera es quantificà la part del poder emissiu total que participà en la ignició del combustible adjacent de la següent manera:

$$E_i = F_h E_0 \quad (6.10)$$

E_i Radiació rebuda pel combustible adjacent al front de flames, W/m².

Cal dir que la fórmula aplicada pel càlcul del factor de vista, resultà ser molt robusta a les variacions detectades en les altures de flama, car tot i ser aquestes altures prou diferenciades per espècies i assajos, totes estigueren dins d'un mateix ordre de magnitud. D'aquesta manera, el factor F_h prengué per valor mitjà 0,25, per a tots els assajos contemplats. Amb totes aquestes consideracions, finalment, es calculà la velocitat de propagació seguint l'expressió d'Anderson (1969) adaptada als paràmetres enregistrats durant l'experimentació:

$$R_0 = \frac{\sigma \eta h E_i}{\rho_m Q_i} \quad (6.11)$$

Els resultats es confrontaren amb els valors experimentals de R_0 . La tendència descrita es presenta a continuació (figura 6.3).

La correlació de les dades d' R_0 provinents de l'adaptació del model d'Anderson (1969), amb les dades R_0 obtingudes en l'experimentació, tingué un coeficient $R^2=0,725$. Aquest resultat es pot considerar satisfactori, donades totes les particularitats exposades, sobretot aquelles referents a la metodologia de càlcul del poder emissiu implicat en la ignició del combustible.

Cal dir a més, que en la figura 6.3 s'observa un bon ajust pels assajos de pi blanc, blat nou i blat vell, tret d'un únic punt corresponent a aquesta darrera espècie combustible. Pel que fa a l'ordi, certament és el que es desvia més de la correlació exposada. Aquest fet podria ser explicat pel l'elevada dificultat que representà la modelització de llurs propietats intrínseques.

$$R_0 = 0,3 \frac{\sigma \eta h PCS}{\rho_m Q_i} \quad (6.13)$$

En la figura 6.4 es representa aquesta darrera expressió confrontada amb els valors experimentals. S'hi observa la recta de correlació amb el seu coeficient R^2 , lleugerament superior a l'obtingut amb l'expressió (6.11), il·lustrat en la figura 6.3.

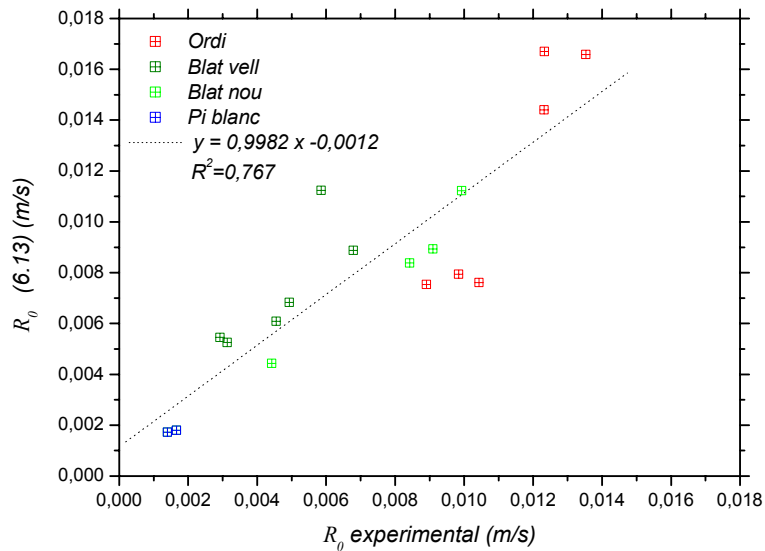


Figura 6.4. Confrontació dels valors experimentals d' R_0 amb el model empíric de l'equació 6.13.

6.2. Inclusió de l'efecte del retardant en el model

Un cop reajustat empíricament el model d'Anderson (1969) per a la predicció –a partir les característiques físiques del combustible i de les condicions ambientals– de la velocitat de propagació dels assajos control R_0 , es proposà una expressió final per a predir la velocitat de propagació dels assajos amb tractament, atesos els resultats del capítol 4. Així, prenent el valor de la funció $\omega(m_a, m_r)$ corresponent al tractament aplicat, tant pel que fa a retardant com al combustible d'assaig, R pren la forma següent:

$$R = \varpi R_0 \quad (6.14)$$

Per tant,

$$R = \varpi \left(0,3 \frac{\sigma \eta h PCS}{\rho_m Q_i} \right) \quad (6.15)$$

I a banda, recordant l'equivalència entre la velocitat de combustió i de propagació exposada en l'expressió (4.9), l'efecte del retardant sobre la velocitat de combustió pot expressar-se,

$$V = \nu V_0 \quad (6.16)$$

$$V = \nu \left[\left(1 - \frac{\chi}{100} \right) \left(1 + \frac{H_s}{100} \right) C_s R_0 \right] \quad (6.17)$$

per bé que aquesta darrera equació, tampoc pot considerar-se com a eina predictiva, donat que depèn de la taxa de cendres, calculada òbviament a l'acabar l'assaig.

6.3. Conclusions

En aquest capítol s'ha assolit una expressió matemàtica per a predir la velocitat de propagació d'un front de flames bàsic, sense vent ni pendent, sobre un llit experimental de combustible en assajos de laboratori. Aquest model té una forta base teòrica, ja que parteix de l'adaptació d'un dels models físics de propagació d'incendi més reeixits (Anderson, 1969), tanmateix, no utilitzat com a eina de predicció. Aquest fet es deu a que Anderson (1969) centra el seu desenvolupament teòric en la influència del poder emissor de l'incendi com a font d'energia necessària per a la progressió del front. Aleshores, considera la temperatura i el factor de vista com a paràmetres a determinar experimentalment durant el transcurs del foc. Així doncs, amb una aproximació empírica del poder emissor que participa en la ignició de combustible adjacent al front, obtinguda a partir del PCS, s'ha desenvolupat una eina predictiva, que depèn exclusivament d'una acurada caracterització del combustible, així com de l'enregistrament de les condicions ambientals en les que s'efectuarà la prova.

Amb l'obtenció d'aquest model i amb la inclusió de les funcions tridimensionals empíriques descrites en el capítol 4 que descriuen la reducció de la velocitat de propagació donat un determinat tractament retardant, s'ha assolit una expressió final, també predictiva, per a valorar aquest efecte matemàticament.

7. CONCLUSIONS

1. L'anàlisi bibliogràfica realitzada ha aportat les següents conclusions:
 - No existeixen models matemàtics teòrics d'incendis de superfície implementats com a eines de predicció. Aquesta observació, així com els reculls i les anàlisis genèriques de les diferents tipologies de models i sistemes de càlcul per a l'estudi del comportament d'incendis forestals han estat inclosos dins l'article "Pastor, E., Zárate, L. Planas, E. i Arnaldos, J. (2003) "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour". *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2), pp 139-153.
 - Manquen models matemàtics que puguin predir l'eficàcia dels productes retardants, així com metodologies d'assaig estandarditzades per a estudiar aquest paràmetre amb més rigor científic.
 - Existeix un buit important en el coneixement de l'emissivitat de les flames d'incendis forestals.
 - Manquen dades referides a les propietats intrínseques i extrínseques de les diferents espècies combustibles utilitzades habitualment en assajos de laboratori per a l'estudi d'incendis forestals.

2. S'ha dissenyat una metodologia per a l'estudi de l'emissivitat en incendis forestals experimentals, basada en termografia infraroja. S'ha detectat la dependència de l'emissivitat amb el gruix i l'altura de les flames i se n'han proposat correlacions empíriques.
3. Han estat posades en pràctica metodologies senzilles i amb un alt grau de fiabilitat per a caracteritzar la relació superfície-volum, la densitat del material, l'altura del llit combustible, la densitat aparent, la porositat i el poder calorífic d'espècies combustibles utilitzades al laboratori: ordi, blat comú, blat dur, pi blanc i pi pinyoner. També han estat caracteritzades totes aquestes propietats de les parcel·les experimentals, combinant algunes dades presents en la bibliografia amb treballs d'inventariat.
4. S'ha dissenyat i construït a l'ETSEIB una instal·lació experimental de laboratori de 4,5 m² de superfície útil de crema que permet obtenir amb gran fiabilitat i precisió la velocitat de propagació, la velocitat de combustió, la temperatura i la potència calorífica radiant de fronts d'incendi experimentals de control o bé afectats per la presència de retardant.
5. S'ha desenvolupat una nova metodologia per a estudiar l'eficàcia dels retardants, de gran potencial tant a laboratori com a camp. En la part experimental, s'ha aconseguit una reducció considerable del temps d'operació i de la quantitat de producte. Pel que fa a l'obtenció de resultats permet comparar l'efecte individual i conjunt de l'aigua i el retardant en la reducció de la velocitat de propagació, la velocitat de combustió i les temperatures, mitjançant l'observació de representacions gràfiques tridimensionals. Té una gran flexibilitat i permet comparar diversos fenòmens d'una manera molt senzilla, com l'eficàcia relativa sobre cada paràmetre descriptor del comportament del foc d'un determinat retardant actuant sobre un cert llit de combustible; l'eficàcia relativa de reducció d'algun d'aquests paràmetres, d'un determinat producte retardant actuant sobre diverses tipologies de combustible; l'eficàcia de diverses formulacions retardants actuant sobre un mateix combustible, en la reducció de cadascun dels descriptors del foc.
6. La termografia infraroja ha resultat ser una tècnica molt vàlida per a analitzar l'efectivitat dels retardants. Ha permès estudiar la reducció de les temperatures i de la potència calorífica radiant

de focs experimentals a camp i a laboratori, així com també la reducció de la velocitat de propagació en aquests darrers.

7. De l'aplicació de la nova metodologia per a estudiar l'eficàcia dels retardants, n'han derivat les següents observacions:
 - Com més gran és el grau de reducció de la velocitat de propagació o de combustió que es vol assolir amb la presència d'un agent extintor en un front d'incendi, major és l'eficàcia relativa que mostra el retardant envers l'aigua.
 - La presència de retardant fa disminuir només lleugerament la temperatura del foc experimental de laboratori. El que sí disminueix dràsticament és l'àrea ocupada per la zona de combustió i del front de flames.
 - El comportament del foc que transcorre sense vent i amb poca pendent sobre disposicions naturals d'espècies arbustives de poca alçada és comparable, pel que fa a l'escala experimental, al comportament del foc experimental al laboratori. En aquest sentit són comparables la velocitat de propagació d'assajos control, i la reducció d'aquesta degut a la presència de formulacions retardants.

8. La modelització dels resultats obtinguts amb la nova metodologia ha permès obtenir tres correlacions empíriques que determinen, a partir de les característiques del combustible, la velocitat de propagació dels assajos a camp sense retardant contemplant l'efecte del vent; la velocitat de combustió dels assajos control de laboratori i la velocitat de propagació dels mateixos i de les proves a camp sense vent. També s'ha obtingut un model empíric que permet predir la reducció de la velocitat de propagació i combustió d'un retardant actuant sobre un determinat llit de combustible experimental. S'ha proposat una adaptació del model teòric d'Anderson (1969), de la qual n'ha sorgit una expressió matemàtica predictiva per a determinar la velocitat de propagació en assajos control de laboratori, a partir de la caracterització del combustible i les condicions ambientals i un model empíric per a determinar el factor de reducció de la velocitat de propagació causat per l'efecte del retardant, en assajos de laboratori.

9. L'obtenció d'un model predictiu per a determinar l'eficàcia d'un determinat tractament retardant en la reducció de la velocitat de propagació d'un front d'incendi pot ajudar enormement a optimitzar les tasques d'extinció en emergències reals. Els resultats obtinguts en aquesta tesi són un primer pas encaminat cap a aquesta direcció.

NOMENCLATURA

A	Àrea del llit de combustible, m ² .
A_t	Àrea de combustible calent d'un front tractat amb retardant, m ² .
A_{to}	Àrea de combustible calent d'un front no tractat amb retardant, m ² .
b	Amplada del front de flames, m.
C_{cal}	Massa equivalent d'aigua en l'assaig calorimètric, g.
C_f	Calor específica del combustible, en base seca, J/gK.
C_h	Càrrega superficial de combustible en base humida, kg/m ² , g/m ² .
C_p	Calor específica de l'aigua, J · g ⁻¹ · K ⁻¹ .
C_s	Càrrega superficial de combustible en base seca, kg/m ² , g/m ² .
C_t	Massa total de combustible, kg/m ² , g/m ² .
CO	Grau de coberta superficial d'un llit de combustible, %.
d_c	Diàmetre característic de la partícula de combustible de major fracció massica, mm.
E	Poder emissiu d'un front tractat amb retardant, W/m ² .
E_t	Radiació rebuda pel combustible adjacent al front de flames, W/m ² .
E_0	Poder emissiu d'un front no tractat amb retardant, W/m ² .
F_h	Factor de vista horitzontal, -.
h	Altura del llit de combustible, cm, m.
HR	Humitat relativa de l'aire, %.
H_s	Humitat del combustible en base seca, %.

H_{Seq}	Humitat del combustible en base seca, en condicions d'equilibri, %.
ΔH_c	Calor de combustió, J/g.
ΔH_v	Calor latent de vaporització, J/g.
I_b	Intensitat de radiació del cos negre, W/m ² .
I_f	Intensitat de radiació de les flames, W/m ² .
I_t	Intensitat de radiació total captada per la càmera, W/m ² .
k	Conductivitat tèrmica, W m ⁻¹ ·K ⁻¹ .
L	Longitud del front de flames, m.
L_v	Calor latent de vaporització de l'aigua, kJ/kg.
$m_{H_2O\ cal}$	Massa d'aigua en l'assaig calorimètric, g.
m_p	Massa del combustible en l'assaig calorimètric, g.
x_m	Fracció massica d'una tipologia de combustible dins la totalitat del llit, %.
P	Perímetre del llit de combustible, m.
p_i	Percentatge de punts calents situats dins un interval de temperatura determinat, % o -.
PCI	Poder calorífic inferior, kJ/kg.
PCS	Poder calorífic superior, kJ/kg.
P_s	Punt de saturació de la fibra, %.
q	Calor, J/m ² .
Q_i	Calor d'ignició, kJ/kg.
Q	Potència calorífica radiant, W.
R	Velocitat de propagació sobre franja retardant, cm/s, m/min.
R_0	Velocitat de propagació sobre combustible sense tractar, cm/s, m/min.
T	Temperatura, K.
T_{amb}	Temperatura ambient, K.
\bar{T}	Temperatura mitjana, K.
ΔT	Increment de temperatura, K.
ΔT_{eb}	Increment de temperatura a ebullició, K.
ΔT_i	Increment de temperatura fins a la ignició, K.
u	Velocitat del vent, m/s.
x	Distància de la superfície diferencial de combustible al front de flames, m.
V	Velocitat de combustió sobre franja retardant, g s ⁻¹ m ⁻¹ .

V_0 Velocitat de combustió sobre combustible sense tractar, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Lletres gregues

α	Pendent del llit de combustible, °.
β	Relació d'empacament del llit de combustible, -.
$\bar{\gamma}$	Taxa mitjana de reducció de la taca de punts calents, -.
γ_i	Taxa parcial de reducció de la taca de punts calents, -.
ε	Emissivitat, -.
η	Porositat, -, o taxa de combustió, -.
θ	Orientació del llit de combustible, °.
κ	Taxa de reducció de temperatura, -.
λ	Volum buit del llit de combustible, per unitat d'àrea, m^3/m^2 .
ρ_m	Densitat de les partícules de combustible en base seca, kg/m^3 .
ρ_{mc}	Densitat de la partícula de combustible de major fracció màssica, en base seca, kg/m^3 .
ρ_{aph}	Densitat aparent del llit de combustible, en base humida, kg/m^3 .
ρ_{aps}	Densitat aparent del llit de combustible, en base seca, kg/m^3 .
σ	Relació superfície-volum, m^{-1} .
σ_c	Relació superfície-volum de la partícula de major fracció màssica, m^{-1} .
τ	Taxa de refredament, -.
τ_f	Transmissivitat de les flames, -.
v	Taxa de reducció de la velocitat de combustió, -.
χ	Taxa de cendres, %, o coeficient en l'expressió 6.12, -.
ω	Taxa de reducció de la velocitat de propagació, -.

BIBLIOGRAFIA

- Albini, F.A. (1985). "A model for fire spread in wildland fuels by radiation". *Combustion Science and Technology*, 42, pp 229-258.
- Albini, F.A. (1986). "Wildland fire spread by radiation, a model including fuel cooling by convection". *Combustion Science and Technology*, 45, pp 101-113.
- Alexander, M. E. (1982). "Calculating and interpreting forest fire intensities". *Can. J. Bot.*, 60, pp 349-357.
- Andersen, W.H., Brown, R.E., Louie, N.A., Katio, K.G., Buchfield, I.A., Dalby, J.D. i Zerpow, L. (1976). "Correlation of rheological properties of liquid fire retardant with aerielly delivered performance" *Contract 26-3198. to USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp Stn, Ogden, UT.*
- Anderson, H.A. (1964). "Mechanisms of fire spread Research progress report No 1". *USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Ogden, Utah. Research Paper INT-8.*
- Anderson, H.E. (1969). "Heat transfer and fire spread". *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Res. Pap. INT-69.*
- Anderson, H.E. (1990). "Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels" *Canadian Journal of Forest Research*, 20, pp 315-325.

- Anderson, H.E., Schuette, R.D. i Mutch, R.W. (1978) "Timelag and equilibrium moisture content of Ponderosa Pine Needles. *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Res Pap. INT-202:1-25.*
- Arnaldos, J., Navalón, X., Pastor, E., Planas, E. i Zárata, L. (2004). "Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales". *Mundi-Prensa, Madrid*, 414 pp.
- Barrett, L.I. (1931). "Possibilities of fire-extinguishing chemicals in fighting forest fires". *Journal of Forestry*, 29, 214.
- Beyreis, J.R., Monsen H.W., Abbasi, A.F. (1971). "Poperties of wood crib flames". *Fire Techonology*, may 1971, pp 145-155.
- Blakely, A.D. (1983). "Monoammonium phosphate: effect on flammability of excelsior and pine needles". *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Ogden, Utah, Research Paper INT-313.*
- Blakely, A.D. (1985). "Combustion Recovery: a Measurement of Fire Retardant Extinguishment Capability", *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Research Paper INT-352.*
- Blakely, A.D. (1988). "Flammability Reduction Comparisons of Four Forest Fire Retardants", *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Research Paper INT-381.*
- Blakely, A.D. (1990) "Combustion Recovery of Flamming Pine Needle Fuel Beds Sprayed With Water/MAP Mixtures", *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Research Paper INT-421.*
- Bradford, S.A. (1973). "Corrosion of aircraft metals in fire retardants"., *North. For. Res. Cent.. Can. For. Serv., Edmonton, Alberta, Information Report NOR-X-66*, 60 pp.
- Brown, J. K. (1969). "Porosity of cheatgrass fuel related to weight" *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn, Research Note INT-97.*
- Byram, G. M. (1959). "Combustion of forest fuels. A Forest fire control and use". *K.P Davis, McGraw-Hill, New York.*
- Burrows, N.D., Ward, B. i Robinson, A. (1991) "Fire behaviour in spinifex fuels on the Gibson Desert Nature Reserve, Western Australia". *J Arid Environ*, 20, pp 189-204.
- Burrows, N.D. (1999). "Fire behaviour in jarrah forest fuels: 1. Laboratory Experiments". *CALMScience*, 3, pp 31-56.

- Burrows, N.D. (1999). "Fire behaviour in jarrah forest fuels: 2. Field Experiments". *CALMScience*, 3, pp 57-84.
- Butler B.W. (1993). "Experimental measurements of radiant heat fluxes from simulated wildfire flames". *Proceedings of the 12th Conference on Fire and Forest Meteorology*, 26-28 Octubre 1993, Jekyll Island, GA.
- Canfield, R.H. (1941). "Application of the line interception method in sampling range vegetation" *Journal of Forestry*, 39, pp 388-394.
- Castelló, J.I. (1999). "Participación de los municipios de Barcelona en la prevención de incendios forestales". *Primer fórum sobre prevención de incendios forestales*, pp 13-23. Oficina Tècnica de Prevenció Municipal d'Incendis Forestals, Diputació de Barcelona.
- Catchpole, W.R., Bradstock, R.A., Choate, J., Fogarty, L.G., Gellie, N., McCarthy, G.J., McCaw, W.L., Marsden-Smedley, J.B. i Pearce, G. (1998a). "Cooperative development of equations for heathland fire behaviour". *Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research*, Luso, Portugal. Viegas, D.X., Univ of Coimbra; pp 631-645.
- Catchpole, W.R., Catchpole, E.A., Rothermel, R.C., Morris, G.A., Butler, B.W. i Latham, D.J. (1998b) "Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel". *Combustion Science and Technology*, 131, pp 1-37.
- Cekirge, H.M. (1978). "Propagation of fire fronts in forest". *Comp. And Maths. With Appls*, 4, pp 325-32.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas P., Trabaud L. i Williams, D. (1983). "Fire in Forestry, Vol. I: Forest Fire Behavior and Effects". *John Wiley & Sons, New York*, 450 pp.
- Chatris, J.M. (2001). "Velocitat de combustió i distribució de temperatures en incendis de bassals d'hidrocarburs". Tesi Doctoral, *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Cheney, N.P i Gould, J.S. (1995). "Fire growth in grassland fuels". *International Journal of Wildland Fire*, 5, pp 237-247.
- Cheney, N.P., Gould, J.S. i Catchpole, W.R. (1998). "Prediction of fire spread in grasslands". *International Journal of Wildland Fire*, 8(1), pp 1-13.

- Cohen, J.D. i Butler, B.W. (1998). "Modeling potencial structure ignitions from flame radiation exposure with implications for wildland/urban interface fire management". *Proceedings of the 13th Fire and Forest Meteorology Conference*, Lome, Australia 1996. Ed. IAWF, USA. pp 81-86.
- Cohen, M., Cuiñas, P., Diez, C., Fernandes, P., Guijarro, M. i Moro, C. (2003). "Wildland fuel particles characterisation: database content". *Fire Star: a decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland-urban interfaces*. Deliverable D6-03_A1.
- Countryman, C. M. (1982). "Physical characteristics of some northern California bush fuels". *USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn.*, Gen. Tech. Rep. PSW-61, 8 pp.
- Croba, D., Lalas, D., Papadopoulos, C. i Tryfonopoulos, D. (1994). "Numerical simulation of forest fire propagation in complex terrain". *Proceedings of the 2nd International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal. *Viegas DX, Univ of Coimbra*, pp 491-500.
- Cruz, M.G. (2004). "Ignition of crown fuels above a spreading surface fire". Tesi Doctoral, *College of Forestry and Conservation, University of Montana*, Missoula.
- Davis, J.B. (1959). "Air drop tests". *California Air Attack Coordinating Committee*, 22 pp. *Calif. Div. For.*, Sacramento.
- Davis, J.B. (1960). "Air drop tests, Willows, Santa Ana, Ramona, 1955-59". *California Air Attack Coordinating Committee, USDA Forest Service, Pacific Southwest For Rang Exp Stn.*
- Davis, J.B. i Phillips, C.B. (1965). "Corrosion of air tankers by fire retardants". *California Air Attack Coordinating Committee*, 38 pp. *Calif. Div. For.*, Sacramento.
- De Mestre, N.J., Catchpole, E.A., Anderson, D.H. i Rothermel, R.C. (1989). "Uniform propagation of a planar fire front without wind". *Combustion Science and Technology*, 65, pp 231-244.
- Dibble, D.L., Richards, S.S. i Steck, L.V. (1961) "Testing and evaluating chemical fire retardants in the laboratory". *USDA, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn*, Miscellaneous paper 59.
- Drysdale, D. (1997) "An introduction to fire dynamics" *John Wiley and Sons, New York*.

- Dupuy, J.L. (1997). "Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts: expérimentation, test et propagation de modèles" Tesi Doctoral, *Université Claude Bernard, Lyon I, Centre National de la Recherche Scientifique, Villeurbanne, França*, 272 pp.
- Dupuy, J.L.; Maréchal, J. i Morvan, D. (2003). "Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties". *Combustion and Flame*, 135(1-2), pp 65-76.
- Duke, J.A. (1983). "Medicinal plants of the Bible". *Trado-Medic Books, Owerri, New York*.
- Emmons, H. (1964). "Fire in the forest". *Fire Res. Abs. Rev*, 5, pp 163-178.
- Fernandes, P.M. (1998) "Fire spread modelling in Portuguese shrubland". *Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research*, Luso, Portugal. *Viegas, D.X., Univ of Coimbra*, pp 61-628.
- Fernandes, P.M. i Rego, F.C. (1998). "A new method to estimate fuel surface area-to-volume ratio using water immersion". *International Journal of Wildland Fire*, 8(2), pp 59-66.
- Fons, W.L. (1946). "Analysis of fire spread in light forest fuels". *J. Agri. Res*, 72 (3), pp 93-121.
- Fons, W.L., Clements, H.B., Elliot, E.R. i George, P.M. (1962). "Project fire model. Summary progress report II". *USDA Forest Service. Southern Forest Exp. Stn., Southern Forest Fire Laboratory, Macon, GA*.
- Forestry Canada Fire Danger Group. (1992). "Development and structure of the canadian forest fire behaviour prediction system". *For. Can. Sci. And Sust. Devl. Dir, Inf. Rep. ST-X-3*.
- Frandsen, W.H. (1971). "Fire spread through porous fuels from the conservation of energy". *Combustion and Flame*, 16, pp 9-16.
- Frandsen, WH. (1987). "The influence of moisture and mineral soil on the combustion limits of smoldering forest duff". *Canadian Journal of Forest Research*, 17, pp 1540-1544.
- Fujii, N., Hasegawa, J. Phallop, L. i Sakawa, Y. (1980). "A nonstationary model of firespreading". *Appl. Math. Modelling*, 41, pp 76-180.

- George, C.W. i Blakely, A.D. (1970). "Energy release rates in fire retardant evaluation". *Fire Technology*, 6(3), pp 203-210.
- George, C.W. i Blakely, A.D. (1972). "Effects of ammonium sulfate and ammonium phosphate on flammability". *USDA. Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp Stn*, Ogden, Utah, Research Paper INT-121, 1972.
- Giménez, A., Pastor, E., Zárate, L., Planas, E. i Arnaldos, J. (2004) "Long term forest fire retardants: quality, effectiveness, application and environmental considerations". *The International Journal of Wildland Fire*, 13 (1), pp 1-15.
- Giraud, F. i Picard, C. (2000). "Acre Project". *Euromediterranean Wildfire Meetings. Research Special Session*. Hyères-les-Palmiers, França.
- Griffin, G.F. i Allan, G.E. (1984). "Fire behaviour". *Anticipating the inevitable: A patch burn strategy for fire management at Uluru (Ayers Rock-Mt. Olga) National Park, Saxon, E.C., Melbourne*, CSIRO Austràlia, pp 55-58.
- Grigel, J.E. (1970). "Air drop tests with the snow commander airtanker and Gelgard fire retardant". Tesi de Master, *University of Montana*, Missoula, MT.
- Grigel, J.E. (1971). "Air drop tests with Fire-Trol-100 and Phos-Check 205 fire retardants." *Canadian Forest Service, Information Report NOR-X-8*, Edmonton.
- Grigel, J.E. (1972). "B-26 Airtanker air drop tests with liquid concentrate". *Canadian Forest Service, Northern Forest Research Centre, Forest Report 2 (1)*, pp 4-5, Edmonton.
- Grishin, A.M., Gruzin, A.D. i Zverev, V.G. (1983). "Mathematical modelling of the spreading of high-level forest fires". *Sov. Phys. Dokl*, 28, pp 328-330.
- Grishin, A.M. i Perminov, V.A. (1996). "Ignition of forest crowns from a ground-fire source". *International Journal of Multiphase Flow*, 22 (1001), pp 105-105.

- Grishin, A.M. (1997). "A mathematical model of forest fires and new methods of fighting them". *Publishing house of the tomsk state university*, Tomsk, Rússia.
- Hagglund, B. i Persson, L.E. (1976). "An experimental study of the radiation from wood flames". *FoU-Brand* 1, pp 2-6.
- Hardy, C.E., Rothermel, R.C. i Davis, J.B. (1962). "An evaluation of forest fire retardants: a test of chemicals on laboratory fires". *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn*, Res. Pap. 64.
- Hardy, C.E. (1977). "Chemicals for forest fire fighting". *National Fire Protection Association, Boston*.
- Hargrove, W.W., Gardner, R.H., Turner, M.G., Romme, W.H. i Despain, D.G. (2000). "Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes" *Ecological Modeling*, 135(2-3), pp 243-263.
- Hottel, H.C., Williams, G.C. i Steward, F.R. (1965). "Modelling of firespread through a fuel bed". *10th Symposium International on combustion*, Pittsburgh, PA, pp 997-1007.
- Huang, C.C. i Xie, Y. (1984). "Flame propagation along matchstick arrays on inclined base boards". *Combustion Science and Technology*, 42, pp 1-12.
- Johansen, R.W. i Shimmel, J.W. (1963). "Increasing the viscosity of water and chemical fire retardants with clays and gums". *Georgia For. Res. Pap.* 19, pp 1-7.
- Johnson, W.W. i Sanders, H.O. (1977). "Chemical forest fire retardants: acute toxicity to five freshwater fishes and a scud". *U.S. Fish and Wildlife Service, Fish-Pesticide Research Laboratory*, Columbia, Missouri.
- Kelsey, K.E. (1957). "The sorption of water vapour by wood". *Austalian Journal of Applied Sciences*, 8, pp 42-54.
- King, N.K. (1973). "The influence of water vapour on the emission spectra of flames". *Combustion Science and Technology*, 6, pp 247-256.
- Konev E.V. i Sukhinin, A.I. (1977). "The analysis of flame spread through forest fuel". *Combustion and Flame*, 28, pp 217-223.

- Larini, M., Giraud, F., Porterie, B. i Loraud, J.C. (1998). "A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media". *Int. Jour. of Heat and Mass Trans*, 41(6-7), pp 881-897.
- Larson, J.R. i Duncan, D.A. (1982). "Annual grassland response to fire retardant and wildfire" *Journal of Range Management* (35) 6, pp 700-703.
- Linn, R.R. (1997). "A transport model for prediction of wildfire behaviour" Tesi Doctoral. *New Mexico State University, Dept. of Mechanical Engineering*, Las Cruces, New Mexico.
- Mans, V. i González, J.C. (2002). "Retardant forestal 134 P". Informe intern, *Budenheim Ibérica*, La Zaida, Saragossa.
- Margerit, J. i Sero-Guillaume, O. (1999). "Modelling forest fires" Informe Intern *INFLAME*.
- Marsden-Smedley, J.B. i Catchpole, W.R.(1995). "Fire behaviour modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. II. Fire behaviour". *International Journal of Wildland Fire*, 5, pp 215-228.
- McArthur, A.G. (1966). "Weather and grassland fire behaviour". *Department of National Development, For. and Tim. Bur.* Leaflet 100, Canberra, Austràlia.
- McCaw, W.L. (1998). "Predicting fire spread in Western Australia mallee-heath shrubland" Tesi Doctoral, *University College UNSW*, Canberra, Austràlia.
- McPherson, J.I. (1968). "An improved theoretical model for the ground distribution of water released from a fire-bomber". *Natl. Res. Counc. Can. Aeronaut.* Rep. LR-498.
- Melendez, J., De Castro, A.J., Aranda, J.M., Lerma, A.M., López, F., Dupuy, J.L., Vachet, P., Marechal, J. i Portier, D. (2004). "Infrared measurements methods adapted to laboratory fires of wildland fuel". *Fire Star: a decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland-urban interfaces*. Deliverable D5-02.
- Mercer, G.N. i Weber, R.O. (2001), "Fire Plumes" *Forest Fires: Behaviour and Ecological Effects*. Johnson, E.A i Miyanishi, K. *Academic Press, San Diego*, 594 pp.

- Muraro, S.J. (1960). "A laboratory evaluation of aerielly applied forest fire retardants". Tesi de Mater, *School of Forestry, University of Montana, Missoula, Montana*.
- Nelson, R. M., Jr. (1980). "Flame characteristics for fires in southern fuels". *USDA For. Serv., Southeast. For. Exp. Stn. Asheville, North Caroline*. Res. Pap. SE-205.
- Nelson, R.M.Jr. (2001). "Water Relations of Forest Fuels". *Forest Fires: Behaviour and Ecological Effects*. Johnson, E.A i Miyaniishi, K. *Academic Press, San Diego*, 594 pp.
- Nelson, R. M., Jr. i Adkins, C.W. (1986). "Flame characteristics of wind-driven surface fires". *Can. J. For. Res.*, 16, pp 1293 - 1300.
- Newstead, R.G. (1973). "Recent airtanker drop tests". *Canadian Forest Service, Northern Forest Research Centre, Forest Report 3(1)*, Edmonton, Alberta.
- Noble, I.R., G.A.V. Bary i A.M. Gill. (1980). "McArthur's fire-danger meters expressed as equations" *Australian Journal of Ecology*, 5, pp 201-203.
- Oegema, P. (2004). "Forest fire fighting chemicals: economic and r/d issues". Comunicació oral, *ERAS Meeting, Aveiro, Portugal*.
- Operation Fire Stop, (1955a). "Aerial firefighting". *USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn. Prog. Rep. 4*.
- Operation Fire Stop, (1955b). "Aerial firefighting". *USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn. Prog. Rep. 9*.
- Pagni, J. i Peterson, G. (1973). "Flame spread through porous fuels". *14th Symposium International on Combustion*, Pittsburgh, PA, pp 1099-1107.
- Palz, W. i Chartier, P. (1980). "Energy from biomass in Europe". *Applied Science Publishers, Ltd, London*.
- Pastor, E., Navalón, X., Zárata, L., Planas, E. i Arnaldos, J. (2000) "Consideracions per a la prevenció i extinció d'incendis forestals". *1er. Congrés d'Enginyers en Llengua Catalana, Manresa*, pp 69-83.

- Pastor, E., Rigueiro, A., Zárata, L., Giménez, A., Arnaldos, J. i Planas, E. (2002). "Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques". *A Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Editorial Millpress, Rotterdam*.
- Pastor, E., Zárata, L. Planas, E. i Arnaldos, J. (2003) "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour". *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2), pp 139-153.
- Planas-Cuchi, E., Chatris, J.M., López, C. i Arnaldos, J. (2003). "Determination of flame emissivity in hydrocarbon pool fires using infrared thermography". *Fire Technology*, 39, pp 261-273.
- Pereira, J.M.C., Sequeira, N.M.S. i Carreiras, J.M.B. (1995). "Structural properties and dimensional relations of some Mediterranean shrub fuels". *International Journal of Wildland Fire*, 5(1), pp 35-42.
- Pérez. Y. (2003). "Posada a punt d'un sistema per a l'estudi de l'eficàcia dels productes retardants a llarg termini en incendis forestals". Projecte Final de carrera, *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Phillips, C.B. i Miller, H.R. (1959) "Swelling bentonite clay – a new forest fire retardant". *USDA Forest Service, Pacific Southwest For. and Rang. Exp. Stn, Tech. Pap. 37*, 30 pp.
- Porterie, B., Morvan, D., Larini, M. i Laraud, J.C. (1998). "Wildfire propagation: a two-dimensional multiphase approach". *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2, pp 139-150.
- Pyne, S.J., Andrews, P.L. i Laven, R.D. (1996). "Introduction to wildland fire". *John Wiley & Sons, Inc., New York*, 769 pp.
- Quian, C. i Saito, K. (1995). "Measurements of pool-fire temperature using IR technique". *Combustion Institute/Central and Western States (USA) and Combustion Institute/Mexican National Section and American Flame Research Committee. Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings*. San Antonio, TX, Gore, J. P., pp 81-86.
- Quintiere, J.G. (1998). "Principles of fire behaviour". *Delmar Publishers, New York*.
- Rasbash, D.J., Rogowski, Z.W. i Stark, G.W.V. (1956). "Properties of fires of liquids". *Fuel* 31, pp 94-107.

- Ribeiro, L.M. (2003). "Gestosa 2003, Fire retardant application". *ADAI, Universidade de Coimbra*.
- Rothermel, R.C. (1972). "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels". *USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Res. Pap. INT-115*.
- Santoni P.A. i Balbi, J.H. (1998). "Modelling of two-dimensional flame spread across a sloping fuel bed" *The Fire Safety Journal*, 31 (3), pp 201-225.
- Sato, T., Kunitomo, T., Yoshii, S. i Hashimoto, T. (1969). "On the monochromatic distribution of the radiation from the luminous flame". *Bulletin of JSME*, 12(53).
- Schäfer, J., Dippel, S. i Wolf, D. E. (1996). "Force schemes in simulations of granular materials". *J. Phys. I*, 6, pp 5-20.
- Sneeuwjagt, R.J. i Peet, G.B. (1985). "Forest fire behaviour tables for western Australia" *Department of Conservation and Land Management, Australia*.
- Steward, F.R. (1974). "Fire spread through a fuel bed". *Heat transfer in Fires: Thermophysics, Social Aspects, Economic Impact*, P.L. Blackshear.
- Storey, T.G., Wendel, G.W. i Altobellis, A.T. (1959). "Testing the TBM aerial tanker in the southeast". *USDA Forest Service, Southeast Forest Exp Stn*, Pap 101.
- Swanson, D.H. i Helvig, T.N. (1973). "High altitude drop mechanization study: final report". *Honeywell Contract 26-2888 to Interm. For. and Range Exp. Stn.*, Vol I, II.
- Swanson, D.H. i Helvig, T.N. (1974). "Extend altitude drop mechanization study: final report". *Honeywell Contract 26-2888 to Interm. For. and Range Exp. Stn.*, 151 pp.
- Sylvester, T.W. i Wein, R.W. (1981). "Fuel characteristics of arctic plant species and simulated plant community flammability by Rothermel's model. *Canadian Journal of Botany*, 59, pp 898-907.
- Telisin, H.P. (1974). "Flame radiation as a mechanism of fire spread in forests". *Heat Transfer in Flames*, Afgan, N.H. i Beer, J.M., Wiley, New York.

- Thomas, P.H. (1963). "The size of flames from natural fires". *Proceedings of the ninth symposium on combustion*. Academic Press, Inc. pp 844-859.
- Thomas, P.H. (1967). "Some aspects of the growth and spread of fires in the open". *Forestry*, 40, pp 139-164.
- Thomas, P.H. (1971). "Rates of spread of some wind -driven fires". *Forestry*, 44, pp 155 – 175.
- TNO (1997). "Methods for the calculation of physical effects. Yellow book." *Committee for the Prevention of Disasters*, The Hague (Holanda).
- Trabaud, L. (1992). "Les feux de forêts". *Editions France – Selection, Aubervilliers*, 278 pp.
- Traux, T.R. (1939). "The use of chemicals in forest fire control". *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisc.* Rep 1199, 11 pp.
- Tyner, H.D. (1941). "Fire extinguishing effectiveness of chemicals in water solution". *Ind. Eng. Chem*, 33 (1), pp 60-66.
- U.S. Air Force (1973). "I.O.T.& E. of the modular airborne fire fighting system". *I.O.T.& E. final rep. Tactical Air Command, USAF Tactical Air Warfare Center, Eglin AFB, Florida*.
- USDA (1986). "Specification for long term retardant, forest fire aircraft or ground application" (5100-304-a), 27 pp.
- Vega, J.A., Cuinas, P., Fontrubel, T., Perez-Gorostiaga, P. i Fernandez, C. (1998). "Predicting fire behaviour in Galicia (NW Spain) shrubland fuel complexes". *Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research*, Luso, Portugal. *Viegas, D.X., Univ of Coimbra*, pp 713-728.
- Vélez M. R. (2000). "La defensa contra incendios forestales". *Mc Graw Hill, Madrid*.
- Ventura, J.M.P., Mendes-Lopes J.M.C. i Ripado, L.M.O. (1998). "Temperature-time curves in fire propagating in beds of pine needles". *Proceedings of the 3d International Confer. on Forest Fire Research 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, Vol I, pp 699 - 711, Luso, 16/20 November 1998.
- Viegas, D. X. (1998a). "Forest fire propagation". *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 356, pp 2907-2928.

- Viegas, D.X., Ribeiro, P.R. i Maricato, L. (1998b). "An empirical model for the spread of a fireline inclined in relation to the slope gradient or to wind direction". *Proceedings of the 3d International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal. Viegas, D.X., Univ of Coimbra, pp 325-342.
- Viegas, D. X. (1999). "Desenvolvimento e Aplicação de Productos Retardantes para a Protecção da Floresta contra os Incêndios". ADAI, Universidade de Coimbra.
- Viegas, D.X. (2000). "Dados diversos na mesa COS" Document Intern, ADAI, Universidade de Coimbra.
- Viegas, D.X. (2003). "Dados diversos na mesa COS con retardante Fire Trol 934/936". Document Intern, ADAI, Universidade de Coimbra.
- Viegas, D.X. (2004). "Cercados pelo Fogo". *MinervaCoimbra, Coimbra*, 274 pp.
- Ward, D. (2001). "Combustion chemistry and smoke". *Forest Fires: Behaviour and Ecological Effects*. Johnson, E.A i Miyanishi, K. Academic Press, San Diego, 594 pp.
- Weber, R.O. (1989). "Analytical models for fire spread due to radiation". *Combustion and Flame*, 78, pp 398-408.
- Wolliscroft, M.J. (1968). "A report on forest fire fieldwork (New Forest, Mar 1966)". *Joint Fire Research Organization Fire Research Note*, num 683.
- Wolliscroft, M.J. (1969a). "A report on forest fire fieldwork (New Forest, Mar 1968)". *Joint Fire Research Organization Fire Research Note*, num 744.
- Wolliscroft, M.J. (1969b). "Notes on forest fire fieldwork (New Forest 1967)". *Joint Fire Research Organization Fire Research Note*, num 740.
- Wotton, B.M., McAlpine, R.S. i Hobbs, M.W. (1999). "The effect of fire front width on surface fire behaviour". *International Journal of Wildland Fire*, 9(4), pp 247-253.

I. TERMOGRAFIA INFRAROJA

La utilització de sensors infrarojos aplicats per a la prevenció i extinció d'incendis forestals s'ha estès considerablement durant els darrers anys. Actualment s'utilitzen de manera sistemàtica amb diverses finalitats, com a visors via satèl·lit per a la monitorització del foc i l'anàlisi de risc, com a detectors guaites de punts d'ignició des de torres de control dels serveis forestals i, fins i tot, com a eines de suport al disseny d'estratègies d'extinció des dels comandaments aeris en les emergències.

La potencialitat d'aquesta tecnologia per a la lluita contra els incendis és doncs immensa i necessàriament aplicable a projectes de recerca. En aquest sentit, ofereix la possibilitat d'estudiar diversos paràmetres que descriuen el comportament del foc, com ara la velocitat de propagació d'un front, però on certament s'hi observa el seu valor afegit és en la termometria.

L'estudi a nivell de recerca de les temperatures del foc, de qualsevol naturalesa i escala, ha estat dut a terme genèricament mitjançant la utilització de diversos sistemes de mesura per contacte, com ho són els termoparells. Amb aquestes eines es pot dur a terme la mesura de temperatura d'un punt calent, gràcies a la transmissió de calor per conducció entre ambdós. Quan aquesta es produeix, es genera una força electromotriu entre els dos metalls del termoparell la qual és fàcilment relacionable amb la temperatura del punt de mesura. Amb l'avanç de la tecnologia, s'han anat incorporant noves eines termomètriques que faciliten i milloren l'obtenció de les dades. És el cas de la utilització de les càmeres de termografia infrarroja que proporcionen imatges que representen en diferents colors la distribució superficial de temperatures de l'objectiu utilitzant la transmissió de calor per radiació i, per tant, no necessiten estar-hi en contacte.

És cert que els termoparells i la termografia infrarroja poden ser dues tècniques complementàries, degut a les seves diferents característiques i prestacions. En aquest sentit, Chatris (2001) estudia i compara en tot detall els dos sistemes de mesura, especificant-ne concretament les diferents condicions d'operació i les consideracions a tenir en compte pel que fa a l'anàlisi crítica de les dades de temperatura obtingudes. Amb tot, se'n desprenen les enormes possibilitats de la termografia com a tècnica de mesura de les temperatures d'un foc, donades les característiques sempre fluctuants de les flames en tota la seva superfície i la comoditat que representa dur a terme una mesura de l'objecte a distància.

És per tot això que es decidí incorporar en l'experimentació l'ús d'una càmera de termografia infrarroja, tant a escala de laboratori com en els experiments a camp. Nogensmenys, calgué dur a terme un estudi aprofundit dels requeriments que aquest equip imposa per tal d'obtenir dades adequades i fiables. En aquest annex es resumeix l'esforç dedicat en aquest sentit. En primer lloc, es descriuen els principis bàsics que regeixen la transferència de calor per radiació, entrant en detall en el cas que ocupen els incendis forestals. En segon terme s'incideix en el camp de la radiometria, fent un esment especial a la termografia infrarroja i a un dels paràmetres claus pel que fa a l'operació amb aquesta tècnica, l'emissivitat.

I.1 Principis bàsics de radiació

I.1.1 Radiació tèrmica. Emissió, absorció, reflexió i transmissió

Qualsevol cos a una temperatura superior al zero absolut emet energia contínuament degut a l'agitació molecular i atòmica dels seus elements constitutius. Aquesta energia és transportada per ones electromagnètiques i consegüentment està caracteritzada bàsicament per la longitud d'ona d'aquestes (λ). L'espectre electromagnètic es divideix arbitràriament en un cert nombre de regions, anomenades bandes, amb longituds d'ones diferents. Així, l'energia radiant pot ser emesa per ones de gran longitud, de l'ordre de centenars de metres com ho són les de ràdio, o per contra per ones electromagnètiques de longitud ínfima (10^{-10} m) com ho són els raigs X. Dins d'aquest espectre existeix una banda compresa entre les 100 μm (longitud característica de les microones) i 0,4 μm (valor que correspon al rang visible) en la que l'energia emesa pot ser detectada en forma de calor o llum. Aquesta regió comprèn la banda espectral infrarroja i el rang de llum visible, i la radiació emesa en aquesta s'anomena radiació tèrmica.

Quan l'energia radiant emesa per una substància topa amb la presència d'un altre cos, aquest darrer pot reflectir, absorbir o transmetre una part o la totalitat de l'energia que l'incideix. D'aquesta manera es defineix l'absortivitat, α , la reflectivitat, ρ i la transmissivitat, τ , com la fracció d'energia incident en un cos que és absorbida, reflectida i transmesa per aquest. Òbviament, es verifica doncs la següent equació,

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (1.1)$$

on, genèricament, els diferents paràmetres depenen de la longitud d'ona. N'existeixen casos particulars típics, que tot seguit es mencionen i es recopilen en la taula I.1.

Taula I.1. Característiques dels cossos opacs, transparents, miralls perfectes, cossos negres i grisos.

Cos opac	$\tau(\lambda) = 0$	$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$
Cos transparent	$\alpha(\lambda) \text{ i } \rho(\lambda) = 0$	$\tau(\lambda) = 1$
Mirall perfecte	$\alpha(\lambda) \text{ i } \tau(\lambda) = 0$	$\rho(\lambda) = 1$
Cos negre	$\rho(\lambda) \text{ i } \tau(\lambda) = 0$	$\alpha(\lambda) = 1$
Cos gris	α independent de λ	$\alpha + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$

D'entre els casos recopilats, el més interessant pel que fa a l'estudi de la transferència de calor per radiació és el del cos negre, entès com aquell que absorbeix tota l'energia radiant incident que li arriba, per a qualsevol longitud d'ona. És doncs definit com un absorbidor perfecte. Si a més aquest cos es troba en equilibri termodinàmic, ha d'emetre cap a l'exterior la mateixa energia que absorbeix. Aquest principi és l'anomenat llei de Kirchhoff i permet expressar la següent relació:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (1.2)$$

On:

$\varepsilon(\lambda)$ Emissivitat, -.

Pel cas del cos negre, aquesta expressió equival a la unitat, tal i com ja s'ha vist en la taula precedent, i per tant es pot afirmar que la radiació emesa per un cos negre a una certa temperatura és la radiació màxima possible que qualsevol cos a la mateixa temperatura pot emetre. D'aquesta manera es parlarà d'un cos negre com un emissor també perfecte i és per aquest motiu pel qual s'utilitza com a patró de comparació en l'estudi de la radiació emesa per cossos reals.

I.1.2 Radiació del cos negre. Lleis de Planck, Wien i Stefan-Boltzmann

La radiació del cos negre es pot calcular a partir de la llei de distribució de Planck, que especifica la dependència espectral de l'emissió del cos negre, com a funció de la temperatura. Aquesta radiació emesa s'expressa en termes de poder emissiu (E), és a dir, per unitat de temps i superfície (W/m^2). En la figura I.1, es representa gràficament aquesta llei per a diversos valors de temperatura.

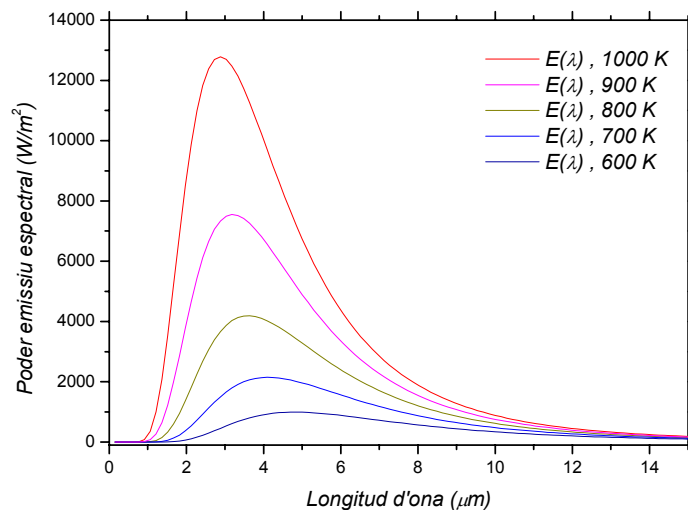


Figura I.1. Llei de Planck.

S'observa que el poder emissiu augmenta molt ràpid amb la temperatura i depèn fortament de la longitud d'ona. Així, és pràcticament nul per a longituds d'ona inferiors a $1 \mu m$, i creix bruscament fins a un màxim a mesura que λ s'incrementa. Aquest màxim depèn de la temperatura, tal i com indica la gràfica, i ho fa atenent la llei de desplaçament de Wien,

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T} \quad (1.3)$$

On:

λ_{\max} Longitud d'ona associada al poder emissiu màxim, per a cada temperatura, μm .

Aleshores, l'energia total emesa per un cos negre a una determinada temperatura es pot calcular integrant l'equació de Planck per a tota la gamma de longituds d'ona. D'aquesta manera s'obté el poder emissiu total d'un cos negre i es dóna, de manera compacta, a través de l'equació d'Stefan-Boltzmann:

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (1.4)$$

On:

σ Constant d'Stefan-Boltzmann; $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

1.1.3 Radiació emesa pel foc. El cas dels incendis forestals

La radiació emesa pel foc, compresa en la regió visible i majorment en la regió infraroja (concretament entre $1 \mu\text{m}$ i $6 \mu\text{m}$) de l'espectre electromagnètic, prové dels gasos calents – CO_2 i H_2O – i de les partícules sòlides carbonoses de sutge incandescent que el componen. S'origina des de tots els punts de la flama, considerada transparent a la seva pròpia radiació fins a un cert gruix.

L'absorció de les partícules sòlides, i per tant la seva emissió té, de manera genèrica, poca dependència espectral. És així com la majoria de cossos sòlids són considerats cossos grisos. És el cas del sutge, que emet de forma contínua al llarg d'una regió àmplia compresa des del visible a l'infraroig. Per bé que la seva intensitat disminueix lleugerament a mesura que augmenta la longitud d'ona (Sato *et al.* 1969), aquest fet és omès per la majoria d'autors (Draysdale, 1997). A banda, la seva reflectivitat i transmissivitat també es considera nul·la, per tant també es pot afirmar que les partícules de sutge tenen les propietats inherents al cos negre.

Pel que fa als gasos, que es consideren transparents al llarg de tot l'espectre pràcticament, mostren intenses bandes d'absorció / emissió en longituds d'ones específiques. Els màxims corresponents al CO_2 i a l' H_2O –

els dos gasos de presència més rellevant al foc– se situen a 2,7 μm i 4,4 μm ; i a 1,4 μm , 1,9 μm i 2,7 μm respectivament.

Comptant aquestes dues aportacions, la intensitat de radiació de les flames, es pot expressar emprant l'equació (1.4), necessàriament corregida amb l'emissivitat corresponent a cada cas, de la següent manera:

$$I_f = \varepsilon_f \sigma T^4 \quad (1.5)$$

$$I_f = I_s + I_g - I_{sg} \quad (1.6)$$

$$I_f = \varepsilon_s \sigma T^4 + \varepsilon_g \sigma T^4 - \varepsilon_s \varepsilon_g \sigma T^4 \quad (1.7)$$

On:

I_f	Intensitat de radiació de la flama, W/m^2
ε_f	Emissivitat de la flama, -.
I_s	Intensitat de radiació aportada pel sutge, W/m^2 .
I_g	Intensitat de radiació aportada pels gasos calents, W/m^2 .
I_{sg}	Intercanvi de radiació entre el sutge i els gasos calents, W/m^2 .
ε_s	Emissivitat del sutge, -.
ε_g	Emissivitat dels gasos calents, -.

L'emissivitat de flames amb poca presència de sutge és inferior a la de flames que en produeixen més. Així doncs, el sutge és el responsable de flames molt lluminoses i amb un elevat poder emissiu, que se superposa al poder emissiu de les molècules de CO_2 i H_2O . D'aquesta manera, genèricament es considera que una flama amb molta producció de sutge té una emissivitat elevada i perd molta energia per radiació, la qual cosa implica que el rang de temperatures mitjanes d'aquesta flama és inferior al de flames amb menys quantitat de sutge (Draysdale, 1997).

És així com la intensitat de radiació de les flames depèn de la seva composició i de la concentració de les molècules que les componen al llarg del llur camí òptic. D'aquí es desprèn que l'emissivitat de les flames és condicionada fortament pel seu gruix, per les condicions i el règim sota els quals té lloc la combustió i per la

composició i el tipus de combustible que es crema. Amb una mescla eficient de comburent i combustible, la producció de sutge és mínima i en resulta una flama blavosa, amb temperatures molt elevades però poc irradiant. Rasbash *et al.* (1956) demostrà aquesta afirmació experimentant amb les flames resultants de la combustió d'etanol. En mesurà una emissivitat de 0,07 i una temperatura mitjana de 1200°C. D'altra banda, la combustió incompleta –deguda a una mescla defectuosa de comburent i combustible o a una manca de comburent– provoca la formació de les petites partícules de carbó que componen el sutge. Les flames que en resulten, de tonalitats groguenques i ataronjades, tenen emissivitats molt altes però temperatures menys elevades. A Quian i Saito (1995), flames d'hexà de gruixos de 20 cm assoliren valors d'emissivitat al voltant de 0,8 amb temperatures mitjanes compreses entre 700 i 800°C; a més es demostrà un progressiu increment de l'emissivitat en funció del diàmetre de la flama en el règim laminar i en el de transició. Chatris (2001) assajà amb gruixos de flama majors, fins a 50 cm, corresponents a l'inici del règim turbulent. Aquest autor obtingué valors d'emissivitat propers a 0,85 per a flames de gasolina i gasoil i temperatures màximes al voltant dels 750°C.

Pel que fa als incendis forestals, les flames típiques són turbulentes, de difusió –els gasos combustibles i el comburent estan inicialment separats i la combustió es produeix en la zona en què aquests es barregen– i amb una lluminositat intensa deguda a la gran concentració de sutge que contenen. Amb tot, la gran variabilitat de les característiques que influeixen en el transcurs d'un incendi forestal –meteorologia, combustible, orografia– condiciona l'aparició de flames igualment variables, que evolucionen en règim gairebé sempre transitori, amb emissivitats i temperatures molt fluctuants. Així, canvis en la velocitat o direcció del vent o en la disposició del combustible, condicionen l'aportació d'aire en la combustió i, per tant, la seva eficiència, provocant l'aparició de flames amb emissivitats més altes o menys. De la mateixa manera, la composició química del combustible vegetal, molt diversa per a cada espècie, influeix en la caracterització de les flames. Espècies que en el procés de piròlisi alliberen gran quantitat de volàtils cremen amb flames molt lluminoses, amb concentracions de sutge elevades (Ventura *et al.*, 1998). Finalment, el contingut d'humitat dels combustibles també afecta la capacitat d'emissió d'energia radiant de les flames, influint tant en l'emissivitat com en la temperatura. King (1973) estudià la influència de la humitat en el poder emissiu de les flames i arribà a la conclusió que com major és el contingut d'aigua del combustible, l'aportació parcial de radiació dels gasos és sensiblement major a l'aportació parcial del sutge, la qual cosa s'interpreta com un descens de l'emissivitat amb la humitat.

I.2 Radiometria. Termografia infraroja

La radiació infraroja pot ser captada actualment per un ventall molt ampli d'instruments gràcies als progressos tecnològics en aquest sentit. De manera genèrica es classifiquen de la següent manera (Melendez, *et al.*, 2004):

- *Detectors amb resolució espectral.* Integren la radiació incident per a tot el camp de visió de l'instrument, però la discriminen entre les diferents longituds d'ona en el rang espectral en el que operen. Així, el seu resultat és un espectre i s'anomenen espectròmetres infrarojos.
- *Detectors amb resolució espacial.* Integren la radiació incident per a tot el camp de visió de l'instrument, però la discriminen entre els diferents punts del camp de visió. Així, el seu resultat és una imatge i s'anomenen càmeres infraroges.

No és objecte d'aquest annex l'explicació amb detall de cadascun dels instruments que tenen cabuda dins aquests grups. Amb tot, sí que és pertinent fer un breu apunt de com opera una càmera de termografia infraroja i, en particular, l'emprada en l'experimentació d'aquesta tesi.

La figura I.5 representa de manera esquemàtica i genèrica els paràmetres que influeixen en la detecció de la radiació infraroja d'un objecte per part d'una càmera termogràfica. La intensitat captada per la càmera prové de tres aportacions diferents. En primer lloc, hi arriba la radiació emesa per l'objecte, que, per la seva banda, és transmesa per l'atmosfera ocupada entre aquest i l'aparell. La càmera també capta radiació que arriba a l'objecte provenint d'una altra font, sempre i quan aquest tingui capacitat de reflectir-la. Finalment, si l'atmosfera emet radiació en el rang espectral de captació del sensor, també hi serà tinguda en compte.

En el cas particular referit en l'experimentació d'aquesta tesi, cal tenir en compte les següents consideracions. D'una banda la reflectivitat de les flames es considera habitualment nul·la degut a la presència de gasos calents en aquestes. Per bé que no es pugui dir el mateix de les partícules sòlides de carbó, l'aportació de radiació d'aquestes és clarament major a la possible radiació reflectida pel sutge, fet que fa que de manera genèrica ρ del foc es prengui igual a zero.

Pel que fa a la transmissivitat i emissivitat de l'atmosfera, cal introduir dues idees bàsiques per tal de comprendre amb detall què succeeix amb les altres aportacions. Tal i com ja s'ha mencionat, la radiació de les flames prové, d'una banda, de l'emissió contínua de les partícules carbonoses de sutge, que es comporten com un cos negre i, de l'altra, de l'emissió discontinua per bandes del gasos calents, compostos essencialment per CO_2 i H_2O . L'atmosfera conté, entre d'altres, aquests dos gasos, de tal manera que la radiació provenint del foc aportada per aquests serà majorment absorbida. De l'observació de l'espectre d'absorció de l'atmosfera, compostat bàsicament per les bandes referides al CO_2 i a l' H_2O , es detecten regions d'opacitat i transparència clarament diferenciades. Les primeres, corresponen òbviament a les regions espectrals on es dona l'absorció / emissió per part dels gasos atmosfèrics i les segones, a aquelles on no es detecta cap d'aquestes bandes. Generalment, les càmeres de termografia infraroja operen en aquestes darreres regions, anomenades finestres atmosfèriques, per tal d'evitar, en la mesura possible, les interferències de l'atmosfera. Nogensmenys, els equips de termografia poden corregir internament aquest efecte, amb les dades corresponents a la distància en la que s'efectua la mesura, a la temperatura atmosfèrica i a la humitat relativa.

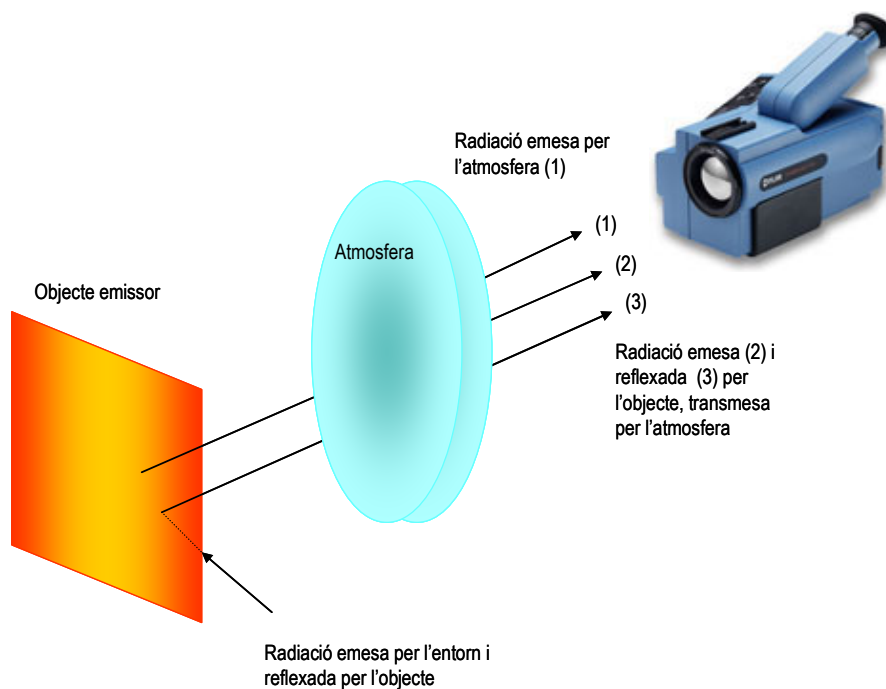


Figura 1.2. Esquema representatiu de les aportacions parcials de radiació captades per una càmera termogràfica.

La càmera de termografia utilitzada en l'experimentació operà en una d'aquestes finestres, compresa entre les longituds d'ona de 7,5 μm i 13 μm . Aquesta característica, juntament amb les altres especificacions tècniques de l'equip, es recullen en la taula I.2.

Taula I.2. Especificacions tècniques de la càmera de termografia.

Paràmetre	Valor
Rang de mesura / Precisió	- 20°C – 1500°C / \pm 2%
Sensibilitat tèrmica	< 0,15 °C
Camp de visió	24° x 18°
Tipus de detector	FPA (<i>Focal Plane Array</i>)
Rang espectral	7,5 – 13 μm
Temperatura d'operació	-15 °C – 50°C
Temperatura d'emmagatzematge	- 40 °C – 70 °C

Les càmeres de termografia treballen, de manera genèrica, de la següent manera. Associen la corba espectral detectada en el rang d'operació, a una funció $E(T)$ de la família de corbes de Planck. D'aquesta manera s'obté la temperatura de cos negre associada a l'objecte. En cas que aquest no tingui una emissivitat igual a 1, cal introduir el valor d'aquest paràmetre, per tal de corregir la temperatura resultant.

D'aquesta manera queda prou palesa la importància del paràmetre de l'emissivitat per tal d'obtenir un valor de la temperatura correcta. Ja s'han mencionat les particularitats referides a l'emissivitat de les flames, i en concret a les dels incendis forestals. Degut a això, i després d'un breu estudi bibliogràfic, es detectà la necessitat de realitzar un petit programa experimental per tal d'estudiar aquest paràmetre amb més profunditat.

I.2.1 L'emissivitat de flames d'incendis forestals

Estudi bibliogràfic

L'emissivitat de flames que provenen de matèria vegetal ha estat estudiada per diversos autors ja des dels anys setanta. En aquest estudi bibliogràfic es recopilen tots aquells treballs que tingueren com a objecte la determinació de l'emissivitat, fent especial esment a les metodologies experimentals utilitzades i a les equacions i valors d' ε que en derivaren, així com als usos concrets de l'emissivitat per part dels autors que, en el seu intent de modelització teòrica dels incendis, hagueren de menester aquesta dada. Tot seguit se'n expliquen els detalls.

Beyreis *et al.* (1971) foren els primers autors a avaluar l'emissivitat per flames provinents de matèria vegetal. Dugueren a terme una sèrie de proves a petita escala, dins d'una cambra de combustió, per a quantificar l'emissivitat en focs de llistons de fusta i estudiar-ne la seva evolució amb el gruix de les flames. La radiació de les flames va ser mesurada mitjançant una termopila de 6 cm de diàmetre d'obertura, situada a una distància horitzontal del combustible de 120 cm i a una distància vertical variable, entre 30 i 120 cm, en funció de l'evolució del foc, però sempre coincident a la d'un termoparell immers en les flames, emprat per a mesurar-ne la temperatura. D'altra banda, a través d'una ranura practicada en una de les parets laterals de la cambra va ser observat el gruix de les flames.

Aquests paràmetres van ser enregistrats en el transcurs de la fase estacionària –entre 7 i 10 minuts– de 5 proves experimentals amb diferents càrregues de combustible. Així, s'obtingueren valors entre 650°C i 1300°C per a la temperatura de les flames en focs d'entre 25 cm i 190 cm de gruix. Les emissivitats es trobaren igualment en un rang força ampli, comprès entre 0,1 i 0,6. Amb la totalitat de les dades dels 5 focs recopilades en aquesta fase i mitjançant l'equació d'Stefan-Botzmann (I.5), Beyreis *et al.* (1971) obtingueren una única expressió per a la determinació de l'emissivitat amb el gruix:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,51x} \quad (I.8)$$

On,

x Gruix de les flames, m.

Posteriorment, Hägglund i Persson (1976) realitzaren una experimentació semblant però de major complexitat. Dins d'un tancat d'amiant, dugueren a terme 16 proves amb focs de llistons de fusta i n'enregistraren igualment, la temperatura, el gruix de les flames i la radiació. La tècnica emprada en la mesura d'aquest darrer paràmetre diferí de la de Beyreis *et al.* (1971). Així, va ser utilitzat un espectrefotòmetre prismàtic de feix senzill i doble pas amb un camp de visió d'1 cm de diàmetre, posicionat a dues altures concretes –a 30 cm per les 11 primeres proves i 50 cm per les restants– per a la captació de la distribució espectral de l'energia radiant de la flama, a partir de la qual, mitjançant integració numèrica, se n'obtenia la intensitat de radiació. Tot i que en certs focs de prova treballaren amb termopiles obtenint idèntics resultats en les mesures, l'ús de l'espectrefotòmetre els va permetre un estudi més exhaustiu i aprofundit de les aportacions parcials de radiació dels diferents components de la flama. La temperatura i el gruix del foc van ser enregistrats mitjançant tècniques idèntiques a les emprades en Beyreis *et al.* (1971). Igualment, els valors numèrics dels paràmetres observats durant la fase estable de la combustió es trobaren en rangs similars als d'aquests autors. Així, a Hägglund i Persson (1976) el gruix de les flames varià des de 15 cm pels focs més petits fins a 200 cm pels majors i la temperatura ho va fer de la mateixa manera de 600°C a 1030°C. Les emissivitats calculades assoliren valors força propers a 1 en algunes de les proves, concretament oscil·laren entre 0,12 i 0,94. La funció de l'emissivitat pel gruix de la flama proposada per aquests autors és la següent:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,8x} \quad (1.9)$$

A banda d'aquesta expressió on quedà palès l'increment de l'emissivitat amb el gruix de les flames, arribaren a certes conclusions despreses a partir de l'estudi de l'espectre electromagnètic. Així, observaren que per flames primes, la radiació en bandes emesa pels gasos era la dominant, per sobre de la radiació contínua emesa pel sutge. Per contra, en flames més gruixudes l'aportació del sutge va ser sensiblement superior a la dels gasos.

Tot i la consecució final de les expressions (1.8) i (1.9) derivades d'aquestes experimentacions amb les quals es calculen valors per a l'emissivitat de les flames d'una manera molt senzilla i ràpida, la metodologia experimental i científica emprada en els dos casos no estigué exempta de certes limitacions que condicionen fortament la utilització d'aquestes equacions. La simplificació de més rellevància adoptada en els dos estudis va ser la consideració de la temperatura mitjana de tota la flama a partir de valors concrets enregistrats per

termoparells posicionats puntualment en una determinada regió. Això va portar a certes incongruències a Hägglung i Persson (1976). En una de les seves proves experimentals, la intensitat de radiació de la flama dibuixava una corba de distribució espectral que se superposava lleugerament a la del cos negre a la temperatura adoptada com a mitjana en l'experimentació. Òbviament d'aquí se'n dedueix que la temperatura de la regió concreta observada per l'espectrofotòmetre era superior a la mitjana calculada a partir de les dades dels termoparells.

Aquesta simplificació va afectar igualment a l'anàlisi de les dades i el seu tractament matemàtic. Les equacions van ser considerades en ambdós treballs com expressions representatives del comportament de la flama en la seva totalitat, no obstant això, foren extretes a partir de l'estudi gràfic de punts situats en una regió molt petita de la flama, amb unes propietats concretes i ben segur diferents de la resta de regions, atenant la variabilitat i les fluctuacions de temperatura, gruix i emissivitat en el si de la flama. A Hägglund i Persson (1976) aquests punts van ser posicionats a 30 cm i a 50 cm i no van detectar grans variacions en els espectres de les dues altures. En canvi, Beyreis *et al.* (1971) van emprar aleatòriament punts situats a quatre distàncies verticals diferents, 30 cm, 60 cm, 90 cm i 120 cm per a elaborar una única expressió. En les dades mencionades pels autors, s'observa la variació de l'emissivitat en altura, no contemplada en cap cas en aquest estudi.

A banda d'aquestes puntualitzacions, cal fer esment a les característiques del combustible emprat en aquestes experimentacions. Per bé que fou compost per llistons de fusta d'abet *Picea excelsea* no és molt representatiu del combustible forestal, el qual està subjecte a una variabilitat considerable pel que fa al seu contingut d'humitat segons les condicions meteorològiques, i presenta una morfologia i una composició molt irregular en la seva disposició igualment variable en el territori forestal. Les úniques expressions presents en la bibliografia extretes pròpiament de combustible forestal són la proposada per Telisin (1974) i la proposada per Thomas (1971). El treball de Telisin (1974) parteix de dades obtingudes en proves experimentals de Wolliscroft (1968, 1969a, 1969b). En aquests treballs es mesuraren la velocitat de propagació, l'altura, el gruix, la temperatura de les flames i l'energia radiant d'un front de foc que es desplaçava en sentit descendent sobre un llit inclinat de fulles de roure. La relació d'empacament i el contingut d'humitat del combustible foren igualment enregistrades. Així a Wolliscroft (1968, 1968a, 1969b) s'incorporà un apunt sobre l'efecte de la humitat en l'emissivitat. S'observà que per combustible amb una humitat del 12% el coeficient d'extinció era de 0,15 i quan el contingut d'aigua passava a ser del 34% el coeficient d'extinció

prenia el valor de 0,17. Per igual gruix de flama, aquest fet es tradueix en un lleuger augment de l'emissivitat, afirmació que es contradiu amb King (1973). L'equació obtinguda mostra també un augment de l'emissivitat amb el gruix de les flames, però amb un coeficient d'extinció sensiblement inferior a les altres dues expressions analitzades:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,16x} \quad (1.10)$$

Anteriorment, Thomas (1971) ja obtingué una expressió molt propera a aquesta a partir de dades de cremes de brucs i argelagues. En aquesta experimentació es mesuraren paràmetres característics de la geometria de les flames mitjançant l'estudi fotogràfic del front i també s'enregistraren la temperatura i els fluxos de calor del foc, emprant radiòmetres i termoparells. Thomas (1971) proposà dues correlacions diferents per l'emissivitat segons la inclinació de les flames. La primera per flames verticals i la segona per flames amb una certa inclinació degut a l'efecte del vent:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,1x} \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3x} \quad (1.12)$$

Les expressions (1.8.-1.12) foren considerades per diferents autors. Butler (1993), en el seu treball experimental per a l'estudi del flux de calor per radiació en focs de laboratori d'agulles de pi *Pinus pinaster* i amb encenalls d'álber *Populus tremuloides* trobà emissivitats de flama ajustables a l'expressió de Telisin (1974). D'altra banda, Quintiere (1998) tingué en consideració el treball de Hägglund i Persson (1976) a l'afirmar que per flames típiques d'incendis forestals de 2 m de gruix, el valor més ajustat de l'emissivitat corresponia a la del cos negre, mentre que Chandler *et al.* (1983) afirmà que emissivitats molt properes a 1 podien ser trobades en flames d'incendis forestals de gruix inferior.

Ateses aquestes discrepàncies, no ha existit un únic criteri pel que fa als valors d'emissivitat de les flames tinguts en compte en els models radiatius de propagació d'incendis forestals. Pagni i Peterson (1973) adoptaren valors típics de flames provinents de la combustió de materials cel·lulòsics compresos entre 0,15 i 0,30, molt propers als emprats per Anderson (1969), entre 0,16 i 0,28. Més conservadora fou l'opció de

Cohen i Butler (1998) que modelitzaren el flux de calor que emetia un front de foc proper a la interfície urbana i consideraren una emissivitat de les flames igual a 1. Altres autors preferiren ometre l'ús d'aquest paràmetre degut a la dificultat d'obtenir-ne dades precises. Així, optaren per modelitzar la transferència de calor per radiació d'un front de flames estimant-ne globalment el poder emissiu (Albini, 1985, 1986; Dupuy 1997, Porterie *et al.*, 1998). Tots aquests exemples il·lustren la necessitat d'obtenir dades dels paràmetres físics que intervenen en la transferència de calor d'un front d'incendi forestal –entre ells l'emissivitat– ja que són necessàries per a modelitzar-ne la seva propagació si es vol contemplar íntegrament els mecanismes de conducció, convecció i radiació.

Per tot això i per la necessitat de conèixer l'emissivitat de l'objecte d'estudi requerida en el treball amb termografia infraroja, fou desenvolupada i implementada una metodologia experimental i d'anàlisi basada en termografia mitjançant la qual es trobaren valors d'emissivitats de flames de combustibles forestals. Tot seguit se'n detallen les característiques essencials, els principis teòrics sobre els quals es fonamentà i els equips emprats. A continuació s'enumeren els passos que componen l'anàlisi de les dades experimentals i finalment es comenten els resultats de les proves pilot realitzades per a validar la metodologia.

Metodologia experimental

La determinació de l'emissivitat es dugué a terme a partir d'una metodologia basada en tècniques de termografia infraroja. L'emissivitat de les flames pot ser determinada amb una càmera termogràfica mitjançant dos mètodes:

- *Mesurant la temperatura d'un punt de la flama amb un termoparell o amb qualsevol altre sistema de mesura de temperatura per contacte.* Un cop es coneix la temperatura del punt, es mesura amb l'equip de termografia i es modifica el paràmetre de l'emissivitat fins que la lectura de la càmera coincideix amb la del termoparell. Aquest és un mètode molt senzill des del punt de vista conceptual, però que comporta una sèrie de dificultats i limitacions associades bàsicament al fet que la temperatura a qualsevol punt de la flama canvia contínuament i, per tant, resulta molt complicat ajustar en temps real el valor de l'emissivitat per tal que la temperatura indicada pel termoparell i la càmera coincideixin, fet agreujat, d'altra banda, per la diferència en els temps de resposta d'ambdós sistemes. A més, la mesura que s'obté amb el termoparell és puntual, mentre que la càmera proporciona un valor promitjat de temperatura superficial amb una certa profunditat.

- *Determinant la transmissivitat de la flama.* Considerant nul la seva reflectivitat, l'emissivitat de la flama es pot estimar amb la mesura de la fracció d'energia transmesa per aquesta provenint d'un cos negre a una temperatura coneguda. Considerant les aportacions parcials de radiació respecte la total captada per una càmera termogràfica, corresponents a l'energia emesa per la pròpia flama i l'energia que aquesta transmet del cos negre situat just al seu darrera (figura 1.3), es pot obtenir una expressió per a l'emissivitat de la flama (Planas-Cuchi, *et al.*, 2003) a partir del següent desenvolupament:

$$I_t = I_f + I_{bf} \quad (1.13)$$

On:

- I_t Intensitat total de radiació, W/m².
 I_f Intensitat de radiació de la flama, W/m².
 I_{bf} Intensitat de radiació transmesa per la flama, W/m².

Atesa la transmissivitat de la flama, l'equació (1.13) s'expressa,

$$I_t = I_f + \tau_f I_b \quad (1.14)$$

On:

- τ_f Transmissivitat de la flama, -.
 I_b Intensitat de radiació del cos negre situat rera la flama, W/m².

Aplicant (1.5), l'equació precedent pren la forma següent:

$$\varepsilon_i \left[(T(\varepsilon_i))^4 - T_a^4 \right] = \varepsilon_f \left[(T_f(\varepsilon_f))^4 - T_a^4 \right] + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_b (T_b^4 - T_a^4) \quad (1.15)$$

On:

- ε_t Emissivitat de la flama combinada amb l'emissivitat del cos negre, -.
- $T_t(\varepsilon_t)$ Temperatura de la flama combinada amb la temperatura del cos negre en funció de ε_t , K.
- T_a Temperatura ambient, K.
- ε_f Emissivitat de la flama, -.
- $T_f(\varepsilon_f)$ Temperatura de la flama en funció de ε_f , K.
- ε_b Emissivitat del cos negre, -.
- T_b Temperatura del cos negre, K.

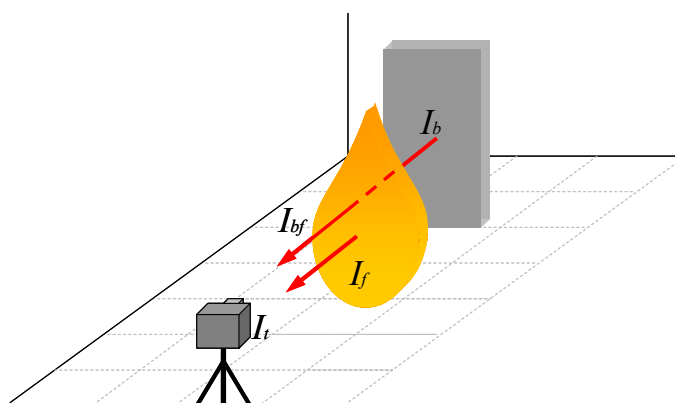


Figura I.3. Representació esquemàtica del mètode teòric per a la determinació de l'emissivitat.

Per a l'obtenció dels paràmetres inclosos en l'expressió (I-15), es dissenyà una metodologia experimental, en la que es duqué a terme una sèrie de proves amb combustible forestal per a determinar-ne l'emissivitat de les flames en funció del seu gruix. La disposició dels equips s'observa en la figura I.4 a) i b). A banda de la càmera termogràfica, amb la que s'obtingueren les distribucions de temperatura de l'experiment, s'utilitzaren dues càmeres de vídeo. La primera, posicionada al costat de l'equip de termografia per a poder confrontar imatges visibles i infraroges i la segona, en direcció perpendicular a les dues anteriors, per a filmar lateralment l'experimentació i extreure'n valors del gruix de la flama. Dos termoparells tipus K, situats a 1/4 i a 3/4 de l'alçada total de la flama, enregistraren la temperatura del cos negre, reproduït per una placa d'alumini fumada de 80 cm d'altura i 1 mm de gruix, amb una emissivitat molt propera a la unitat ($\varepsilon = 0,95$). Aquest cos negre es posicionà just darrera d'una taula de combustió, de dimensions 1m x 1m.

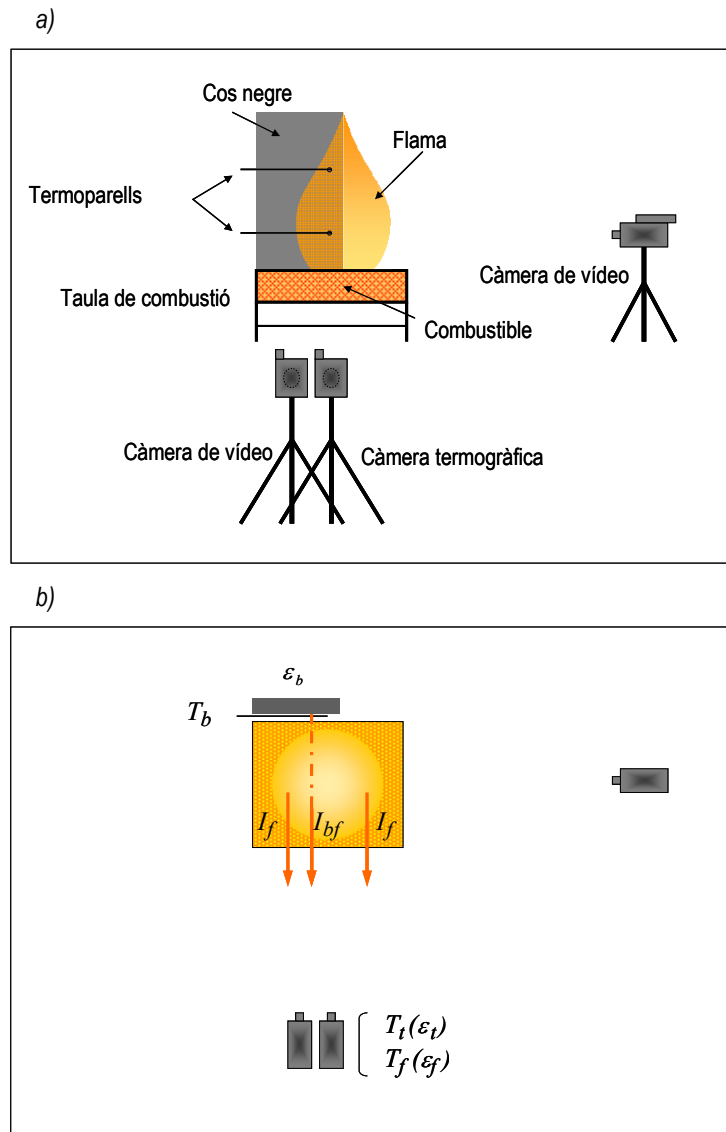


Figura I.4. Vistes del dispositiu experimental. a) Alçat b) Planta.

Aquesta metodologia s'assajà duent a terme una sèrie de 3 proves, on es cremà combustible forestal fi, de temps de resposta inferior a 1 hora, de *Pinus halepensis*. Les característiques dels assajos es detallen a la taula I.3.

Taula I.3. Característiques de les proves per a la caracterització de l'emissivitat.

Prova	Disposició		Hs (%)
	A (cm ²)	ρ_{aph} (kg/m ³)	
1	25 x 25	3,3	40
2	50 x 50	1,6	50
3	100 x 100	1,1	60

Els llits de combustible es sobrecarregaren per tal de garantir focs de llarga durada i de flama persistent, a banda de compensar-ne l'alt contingut d'humitat. Amb les dimensions dels tres assajos es garantiren gruixos de flama màxims de 25 cm, 50 cm i 100 cm, respectivament.

Determinació de l'emissivitat

Per tal d'obtenir els valors d'emissivitat de les flames corresponents a les tres proves realitzades, es dissenyà una metodologia d'anàlisi d'imatges termogràfiques mitjançant la qual es pogueren deduir les funcions $T_f(\varepsilon_f)$ i $T_t(\varepsilon_t)$, els paràmetres bàsics per a la resolució de l'equació (I.15). Amb la resta de variables mesurades experimentalment, es resolgué gràficament l'esmentada equació. Els valors obtinguts d' ε_f es confrontaren finalment amb els gruixos de flama corresponents a cada experiment.

Prèviament a tot això, fou necessari dur a terme una prova inicial a fi de comparar els dos sistemes de mesura de temperatura emprats, la càmera de termografia i els termoparells. Així, durant aquesta prova, s'enregistrà la temperatura T_b a 1/4 i 3/4 d'alçada del cos negre mitjançant termoparells i al mateix temps se n'obtingueren imatges termogràfiques de la placa d'alumini fumada. L'anàlisi de les dades mostrà valors de temperatura lleugerament superiors i més variables per a les imatges que per als termoparells. Aquest fet es deu a la diferència en el temps de resposta d'ambdós sistemes, a banda del mecanisme emprat en l'un i en l'altre per a l'obtenció de la temperatura; la conducció en el sistema per contacte i la radiació en la càmera de termografia. No obstant això, es considerarà vàlida la presa de mesures de temperatura del cos negre mitjançant termoparells. D'altra banda, cal tenir en compte que el mètode de càlcul desenvolupat fou poc

sensible als canvis de T_b , degut al poc pes del darrer sumand de l'expressió (I.15), enfront dels termes que contenen les funcions $T_f(\varepsilon_j)$ i $T_i(\varepsilon_i)$.

Anàlisi d'imatges termogràfiques

Es dugué a terme mitjançant el programa *ThermaCAM™ Researcher 2001*, del qual se'n detallen els aspectes més importants en el darrer apartat d'aquest annex. L'objecte de l'anàlisi termogràfic fou el de trobar les expressions per a les funcions $T_f(\varepsilon_j)$ i $T_i(\varepsilon_i)$ d'un seguit d'imatges seleccionades d'entre totes les seqüències enregistrades. Per a cadascuna d'elles, s'establiren quatre àrees d'estudi, dues a la meitat esquerra de la imatge (A_{lu} i A_{ld}), centrades a 1/4 i a 3/4 de l'altura total del cos negre, i dues més simètriques a l'altra meitat (A_{ru} i A_{rd}), considerant l'eix de la flama sobre l'aresta dreta del cos negre (figura I.5).

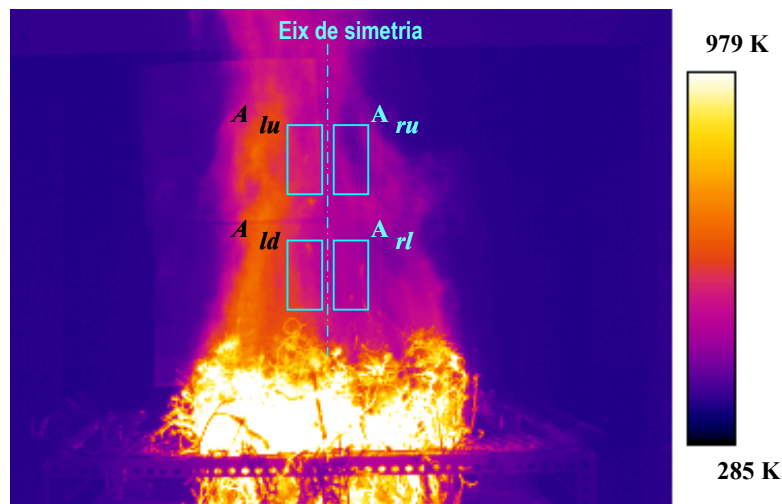


Figura I.5. Posicionament de les àrees d'estudi sobre una imatge termogràfica.

Modificant les emissivitats de les àrees (ε_i per les seccions situades a l'esquerra de l'eix i ε_j per les de la dreta) s'obtingueren diferents valors de temperatures mitjanes de les quatre seccions. La dependència entre aquests dos paràmetres seguí una llei potencial amb coeficients de correlació molt propers a la unitat. En la

figura I.6 es representen gràficament les funcions $T_f(\varepsilon_f)$ i $T_i(\varepsilon_i)$ per a les àrees A_{lu} i A_{ru} per a una de les imatges termogràfiques enregistrades durant la prova 1.

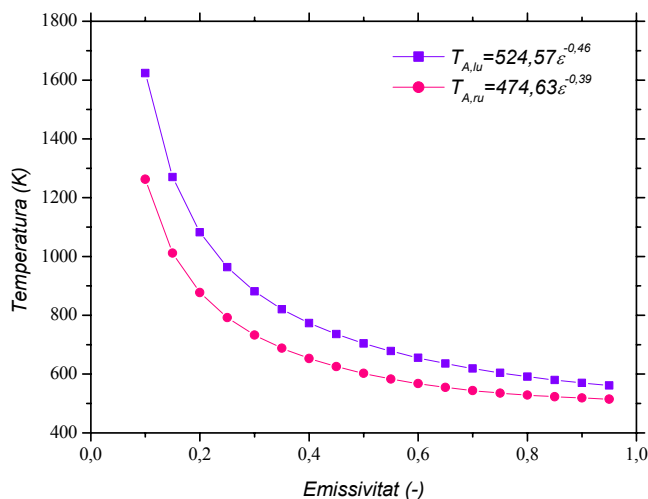


Figura I.6. Representació gràfica de la temperatura mitjana de A_{lu} i A_{ru} en funció de l'emissivitat per a una imatge de la prova 1.

Analitzant les parelles de corbes $T_f(\varepsilon_f)$ i $T_i(\varepsilon_i)$, per a cadascuna de les imatges de les diferents proves, s'observà que per a majors gruixos de flama la seva separació era menor, la qual cosa es traduí en un augment de l'emissivitat. D'altra banda també quedà palesa la disminució de l'emissivitat de la flama en alçada; representant gràficament les dues parelles de corbes d'una mateixa imatge, s'observà que les corresponents a les àrees superiors tenien una major separació i estaven representades per sota les corbes de les àrees inferiors, d'emissivitats més elevades.

Aquesta metodologia d'anàlisi termogràfica es contrastà per un conjunt d'imatges escollides aleatòriament de les tres proves. Per tal de comprovar que la funció $T(\varepsilon)$ era realment característica de la temperatura mitjana de les àrees de flama dibuixades (100 cm² aproximadament), es calculà la desviació de les emissivitats corresponents a 4 divisions de 25 cm² de les seccions inicials. En tots els casos, aquesta desviació fou suficientment petita com per a considerar $T(\varepsilon)$ una funció representativa de la temperatura mitjana de les àrees d'estudi.

Resolució de l'equació (I.15)

Un cop trobades les funcions $T_f(\varepsilon_f)$ i $T_i(\varepsilon_i)$ i amb els paràmetres ε_b , T_a i T_b coneguts, es resolgué gràficament l'equació (I.15). Es col·locaren tots els termes a un mateix cantó de la igualtat i, suposant una certa ε_i , es calculà per a quin valor de ε_f la funció resultant era nul·la.

Per a fer una estimació d' ε_i es tingué en compte que ε_f havia de ser sempre inferior a ε_b i que ε_i havia de ser sempre superior a ε_f i a $(1-\varepsilon_f)\varepsilon_b$ (Planas-Cuchi, *et al.* 2003). Graficant l'equació per a diferents valors d' ε_i s'observà que aquestes condicions es complien a partir de $\varepsilon_i > 0,7$. Així, es considerà $\varepsilon_i = 0,85$, la mitjana entre 0,7 i l'emissivitat de la placa d'alumini (0,95).

Aquest procediment es dugué a terme dues vegades en totes les imatges termogràfiques seleccionades d'una mateixa prova. D'aquesta manera s'obtingueren dues sèries de valors d'emissivitat per a cada experiment, la primera sèrie referida a 1/4 d'altura de flama aproximadament, i la segona a 3/4.

Resultats

Els valors de les emissivitats que es confrontaren amb el gruix de la flama foren les mitjanes de cadascuna de les dues sèries trobades per a les diferents proves i es representen, juntament amb les expressions desenvolupades pels diferents autors mencionats en la revisió bibliogràfica, en la figura I.7.

Els resultats experimentals, tot i el seu caràcter purament il·lustratiu, indiquen que per a les proves realitzades l'increment de l'emissivitat amb el gruix de les flames fou més accentuat que en les expressions presents en la bibliografia. En aquest sentit, confirmen a Chandler (1983) en la seva afirmació que emissivitats properes a 1 poden ser trobades en flames d'incendis forestals de gruixos menors dels proposats en la literatura. En la figura I.7, s'hi representen gràficament les corbes que correlacionaren les dades experimentals, salvant òbviament les diferències en el disseny de cadascuna de les proves. Per a l'emissivitat calculada a 3/4 d'altura de la flama, l'equació pren la forma següent:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-2,24x} \quad (I.16)$$

Per a l'emissivitat a 1/4 d'altura de la flama:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-3.11x} \quad (1.17)$$

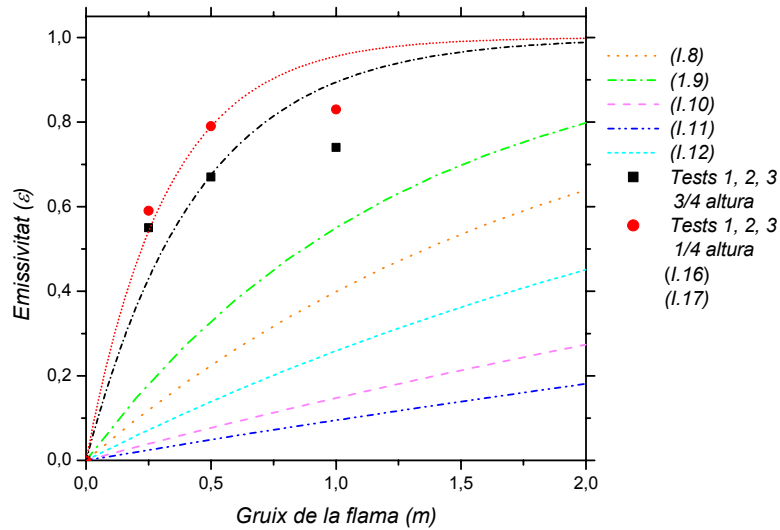


Figura 1.7. Comparació dels valors experimentals amb les expressions mencionades en la bibliografia.

Conclusions

Es desenvolupà una metodologia per a l'obtenció de l'emissivitat en flames de combustible vegetal, tant a nivell experimental com d'anàlisi, basada en tècniques de termografia infraroja. Aquesta metodologia s'implementà amb èxit realitzant tres proves pilot amb una espècie típica de la vegetació mediterrània. Amb els resultats extrets d'aquestes proves s'observà la dependència de l'emissivitat amb el gruix de les flames, tal i com apuntaren els autors recopilats en la bibliografia. Es detectà també una variació de l'emissivitat amb l'altura de les flames, consideració que no s'havia tingut en compte en la majoria dels estudis realitzats. Finalment es proposaren dues correlacions experimentals que relacionen l'emissivitat de la flama amb el seu gruix, corresponents a aproximadament a 1/4 i 3/4 d'altura de la flama.

I.2.2 L'emissivitat en les flames experimentals

Amb l'estudi detallat en el punt precedent es tingué sens dubte un coneixement aprofundit de l'emissivitat a tots els nivells, tant teòric com experimental, la qual cosa permeté establir amb garantia els criteris per a la assignació de l'emissivitat en les proves a escala de laboratori i a escala real.

Pel que fa als assajos al laboratori de Barcelona, les imatges termogràfiques obtingudes foren com la que s'il·lustra en la figura I.8. En ella s'observa que la radiació captada per la càmera termogràfica prové, d'una banda, de la radiació emesa pel llit de combustible incandescent, transmesa per les flames, i d'altra banda, de l'emissió d'aquestes. Ateses les consideracions desenvolupades en aquest capítol, el llit de combustible pot ser considerat un cos negre i al front de foc, caracteritzat per unes flames groguenques i d'un gruix d'entre 5 i 20 cm segons el cas, se li pot assignar una emissivitat propera a 0,5. La diferència de magnitud en les dues aportacions de radiació, molt més elevada la corresponent al llit de combustible que la de les flames, queda evidenciada pel fet que en les imatges termogràfiques el contorn de les flames és completament diluït. Aleshores, l'emissivitat del conjunt ha de ser molt més propera a la del cos negre que a la de les flames. Per aquest motiu, s'aplicà, en tots els casos, un valor d' ε del conjunt equivalent a 0,9.

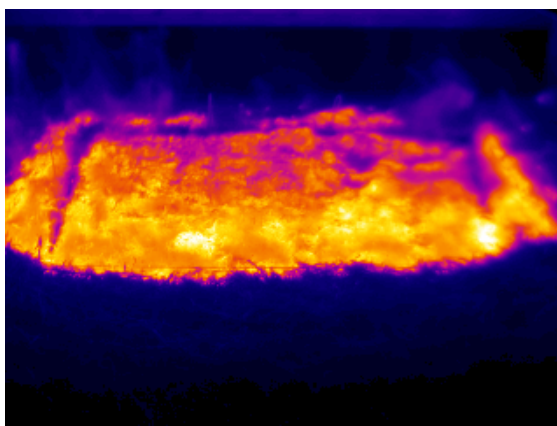


Figura I.8. Imatge termogràfica tipus d'un assaig de laboratori.

Pel que fa a l'experimentació a camp, el valor de l'emissivitat del front d'incendi s'establí igualment en 0,9, però per diferents raons. Donada la disposició de la càmera termogràfica, la radiació captada provingué essencialment del front de foc, molt més intens que els front de laboratori i amb un gruix certament més

gran. Aleshores l'emissivitat de les flames es podia considerar molt propera a 1. A la figura I.9 s'hi representa una imatge termogràfica tipus de l'experimentació a camp.

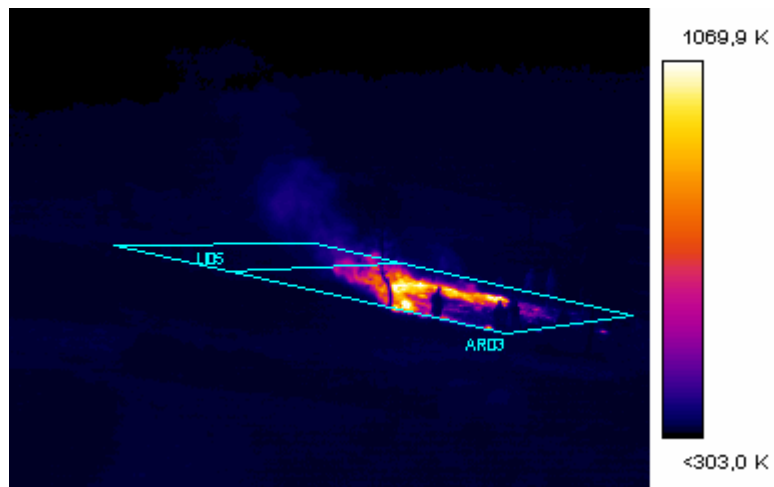


Figura I.9. Imatge termogràfica tipus d'un assaig de camp.

II. CARACTERITZACIÓ DELS RETARDANTS

Les principals característiques físiques i químiques dels productes retardants emprats varen ser facilitades per les cases comercials corresponents. Tal i com es recull en el capítol 3, es disposà de les dades referents als components actius, als additius, al pH, a la viscositat i a la densitat. Nogensmenys, la metodologia experimental dissenyada imperà la necessitat d'ampliar aquesta informació. És així com es duqué a terme un senzill programa experimental per tal d'avaluar dues característiques dels retardants, cabdals en aquest sentit. D'una banda es caracteritzà el factor de dilució amb aigua dels líquids concentrats i de l'altra es calculà experimentalment la densitat. En aquest annex s'exposen els detalls d'aquesta tasca.

II.1 Antecedents

El disseny dels assajos i la posterior metodologia experimental tingueren les característiques detallades en el capítol 3. D'entre totes elles, cal assenyalar aquí la utilització de diversos productes comercials així com l'aplicació també diferent de les mescles preparades. Així, s'utilitzaren al laboratori de Barcelona els productes FR CROS 134P i FIRE TROL 931 i al laboratori de Coimbra el FIRE TROL 934. De la mateixa manera, durant els assajos a gran escala també foren emprats el primer i el darrer dels productes mencionats, la qual cosa posa de manifest la gran varietat en tot el treball experimental. D'altra banda, la metodologia experimental al laboratori també sofrí variacions en determinades sèries realitzades a Coimbra, concretament en aquelles en què la mescla aplicada es deixà assecat mitjançant l'escalfor d'un grup halogen.

Per bé que no fou objectiu final d'aquesta tesi la determinació precisa del producte més efectiu d'entre tots ells, sí que fou necessari comparar resultats i metodologies entre les diferents sèries. Donades doncs aquestes circumstàncies i per tal de fer els càlculs comparatius amb la màxima rigurositat, calgué disposar de la dada referent al factor de dilució d'aigua del líquid concentrat. Durant el procés d'asseccament, aquesta s'evaporava juntament amb l'aigua adjuntada en la preparació de la concentració pertinent, i fou precisament aquest fet el factor més discordant en el conjunt de la metodologia. L'obtenció d'aquest paràmetre i el seu ús adequat permeté doncs realitzar comparacions entre les diverses sèries, salvant aquesta diferència. A més, com a prevenció, fou necessari esbrinar l'abast de l'escalfament de les làmpades halògenes en la possible descomposició del producte. Així doncs, es desenvolupà un petit programa de testos per obtenir les respostes a les inquietuds plantejades.

II.2 Objectius i metodologia

De manera concreta, l'objectiu plantejat fou el d'esbrinar la resposta dels diferents productes comercials utilitzats, a dos tractaments d'asseccament diferents:

- Assecat a temperatura ambient (entre 18 i 20°C aproximadament) durant 72 hores.
- Assecat a l'estufa a 95°C durant 40 hores.

Així, es prepararen quatre mostres per a cada producte, atesos els dos tractaments dissenyats i també dos estats diferents del retardant. Es testà directament el líquid concentrat i, a banda, el producte diluït un 10% en volum. La taula II.1 recull les especificacions de les proves que es realitzaren per a cada retardant.

Taula II.1. Característiques de les proves.

Mostra número	1	2	3	4
Concentració	Líquid concentrat	Dissolució 10% en volum	Líquid concentrat	Dissolució 10% en volum
Assecatge	18°C / 72 h	18°C / 72 h	95°C / 40 h	95°C / 40 h

II.3 Resultats

Es pesaren les mostres abans i després del tractament d'assecatge amb una balança de precisió. Amb aquests valors es calculà el percentatge de massa perduda durant el procés. Per ampliar l'estudi, es procedí a verificar la densitat dels líquids concentrats de tots els productes, donat l'ample marge del fabricant especificat per aquesta dada. Aquesta determinació es duqué a terme amb instrumental de laboratori de precisió. La figura II.1 il·lustra, a tall d'exemple, l'estat de les quatre mostres de FIRE TROL 931 després de sengles tractaments. Amb la dada de la densitat del líquid concentrat i realitzant senzills balanços de massa per a les quatre mostres, s'obtingueren resultats com els recopilats en la taula II.2.

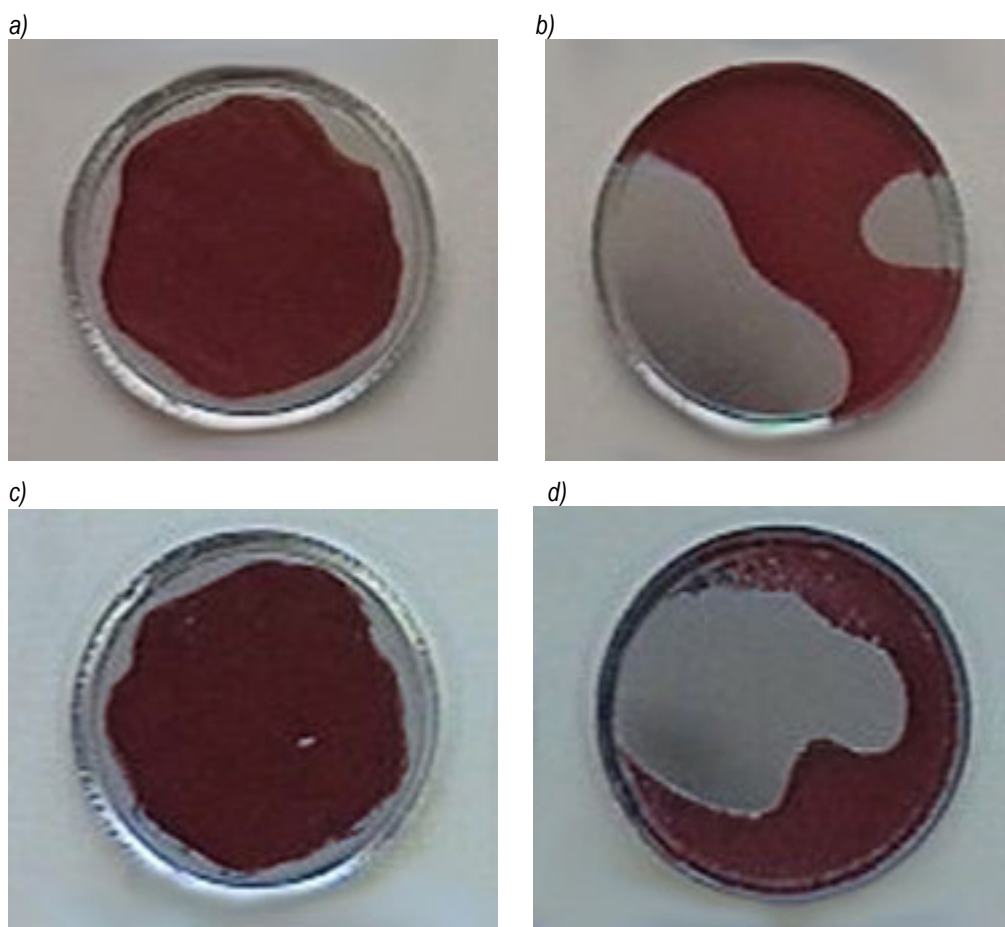


Figura II.1. Mostres assecades. a) Mostra 1, b) Mostra 2, c) Mostra 3 i d) Mostra 4.

Taula II.2. Resultats experimentals per al retardant FIRE TROL 931.

Mostra número	1	2	3	4
Densitat experimental / Densitat teòrica (kg/m ³)	1,22 / [1,39-1,45]	-	1,22 / [1,39-1,45]	-
Massa inicial (g)	7,606	10,911	7,214	8,741
Massa final (g)	5,604	1,030	4,211	0,611
Massa perduda (%)	26,32	90,56	41,63	93,01
Contingut d'aigua procedent del retardant concentrat (%)	26,32	20,67	41,63	41,21

En la taula precedent s'hi observen els resultats amb detall corresponents a la sèrie de testos per al FIRE TROL 931. Únicament s'hi inclouen aquests, degut a que els resultats dels altres dos productes foren del mateix ordre. En la taula s'hi adjunten els valors del pes inicial i final després del tractament tèrmic, el percentatge d'aquesta pèrdua, corresponent a massa d'aigua per tots els casos donades les conclusions que tot seguit es detallen, i la part d'aigua procedent del líquid concentrat, que, tal i com es pot veure és la total perduda per a les mostres 1 i 3 i és la diferència amb l'aigua adjuntada per a la dissolució del 10% per a les mostres 2 i 4. A més, s'hi inclou també el valor de la densitat avaluada experimentalment, contrastada amb el valor proporcionat pel fabricant.

De l'anàlisi conjunt de totes les proves se n'extragueren les següents conclusions, presentades a continuació de manera esquemàtica:

- *L'assecatge amb l'estufa és més eficaç que l'assecatge a temperatura ambient.* Per bé que els valors d'humitat de les mostres diluïdes assecades a temperatura ambient foren inferiors al 3% respecte als assecats en estufa en tots els casos (en el cas exemplificat prengué el valor del 2,7%) –la qual cosa indicà un assecament pràcticament total– no succeí el mateix amb les mostres de líquid concentrat, on s'obtingueren valors de l'ordre d'un 40% pel que fa a la diferència entre ambdós mètodes d'assecatge per a la mostra concentrada i la diluïda.

- *Per mitjà de l'assecatge amb estufa s'obté la pèrdua total del contingut d'aigua.* Del pesatge de totes les mostres 24 hores després d'haver finalitzat el període d'assecatge, s'observà que les mostres assecades a temperatura ambient seguien perdent aigua lentament, mentre que les mostres assecades amb l'estufa només patiren petites oscil·lacions de pes degut a les variacions de la seva humitat d'equilibri amb l'ambient. Aleshores, el valor final del contingut d'aigua s'extragué de la mitjana dels valors obtinguts de les mostres 3 i 4.
- *L'assecatge amb l'estufa aplicat no produeix la degradació de cap component present en el producte retardant.* La majoria de components que conformen aquestes substàncies (polifosfats i additius) se sintetitzen en forma de sòlid granular, per tant no volatilitzen a les temperatures aplicades. Si hi hagués una petita part de la composició del producte que no tingués aquestes característiques, l'efecte que es produiria seria negligible. Per altra banda, l'observació de les gràfiques de descomposició tèrmica subministrades pel fabricant així ho proven.
- *L'assecatge mitjançant làmpades calefactores, practicat sobre llits experimentals de combustible en proves per a l'estudi de l'eficàcia dels retardants, no produeix la degradació de cap component.* Aquesta afirmació es deu a que el mètode d'assecat amb l'estufa és molt més agressiu que l'assecatge mitjançant els halògens, ja que en aquest segon mètode el combustible no assoleix valors tan elevats de temperatura.
- *El mètode utilitzat permeté calcular la proporció real del concentrat aquós de polifosfats en tots els productes utilitzats (taula II.3).* El valors experimentals de les densitats dels productes concentrats –entre un 10% i un 14% menors que els subministrats pels fabricants– permeté fer un petit balanç de massa en les mostres diluïdes, del resultat del qual se n'obtingué el valor real del contingut d'humitat del producte concentrat (de l'ordre d'un 40% per tots els retardants). Aquesta dada, no proporcionada pel fabricant, permeté l'extrapolació dels resultats obtinguts en assajos de laboratori on foren aplicades diverses dosificacions de dissolució de retardant i diferents mètodes d'assecat o, senzillament, en aquells on s'eliminà aquest pas.

Taula II.3. Resultats definitius.

Fase experimental	Bloc experimental	Retardant	Densitat del líquid concentrat (kg/m ³)	Contingut d'aigua del líquid concentrat (%)	Producte sec contingut al líquid concentrat (%)
Laboratori	Blocs 2	FR CROS 134P	1,26	42,03	57,97
	Blocs 1	FIRE TROL 931	1,22	41,42	58,58
	Blocs 5 i 6	FIRE TROL 934	1,35	45,25	54,75
	Bloc 4	FR CROS 134P	1,37	40,5	59,5
	Bloc 3	FIRE TROL 931	1,385	41,82	58,18
Gran escala	Gestosa 2003	FR CROS 134P	1,26	42,03	57,97
	Gestosa 2003	FIRE TROL 934	1,35	45,25	54,75
	Trevim 2004	FR CROS 134P	1,37	40,5	59,5
	Trevim 2004	FIRE TROL 934	1,35	45,25	54,75

III. CARACTERITZACIÓ DEL COMBUSTIBLE

En aquest annex es detallen els procediments experimentals i de càlcul, emprats per a avaluar algunes de les propietats del material vegetal utilitzat en l'experimentació de laboratori. Es caracteritzen, d'una banda, la grandària, la forma i la densitat de les partícules que conformaren els llits de combustible. Posteriorment s'incideix en el càlcul de dues propietats extrínseques molt rellevants pel que fa a l'estudi de l'avanç d'un front de foc; la densitat aparent, la relació d'empacament i la porositat. S'estudia la interacció de tots aquests paràmetres i es proposen relacions per expressar la seva interdependència.

Finalment s'incideix en les propietats tèrmiques de les espècies, concretament en els poders calorífics i en la calor específica. S'analitzen les dades extretes de la bibliografia i es detalla el mètode experimental utilitzat per a trobar valors més adequats per al combustible d'aquest estudi.

III.1 Relació superfície-volum i densitat de partícula del combustible de laboratori

La relació superfície-volum (σ) és la propietat idònia per a descriure la geometria i les dimensions relatives dels elements que componen un llit de combustible. Va ser determinada a partir de models de geometria senzills basats en l'observació de les formes i el calibratge –per mitjà d'instruments de metrologia i eines de representació gràfica de tipus CAD (*Computed Assisted Drawing*)– de les magnituds de les partícules combustibles. Aquestes mesures van ser preses en les condicions habituals de laboratori pel que fa a

temperatura i humitat relativa, la qual cosa implicà valors d'humitat del combustible de l'ordre dels obtinguts durant el desenvolupament de les proves. Coneguts aquests valors i amb la geometria de les partícules definida, es va poder determinar la densitat de les partícules en base seca (ρ_m) mitjançant una balança de precisió.

III.1.1 Caracterització de les agulles de pi blanc (*Pinus halepensis*) i pi pinyoner (*Pinus pinaster*)

Els llits de combustible formats per agulles de coníferes són molt homogenis, no gensmenys, és certament laboriós compondre-los de partícules d'ídèntiques dimensions. És per això que les disposicions experimentals estigueren formades per agulles amb una certa dispersió pel que fa a les longituds i a les dimensions de les seccions, que, per altra banda, és tal i com es troben repartides en la natura. Per tant, el primer pas fou estudiar aquesta distribució i fixar les dimensions d'una agulla tipus per a cada espècie. Amb l'agulla caracteritzada i un cop determinada la humitat del combustible es pesaren diverses agulles tipus i se'n calculà llur densitat mitjana en pes fresc i sec. Aquesta operació es repetí novament sota unes altres condicions ambientals, que propiciaren valors diferents d'humitat respecte la primera sèrie d'estudi. En la figura III.1 s'observen les representacions esquemàtiques de les agulles i en la taula III.1 es recullen els valors mitjans obtinguts dels principals paràmetres geomètrics. S'emfatitzen les variables d'estudi; la relació superfície-volum i la densitat en pes sec.

Finalment s'observà la relació d'aquests valors amb els resultats existents en la bibliografia. Pel que fa a les relacions superfície-volum calculades, ambdues s'emmarquen dins el rang mencionat en les referències. Així, per agulles de *Pinus halepensis*, σ varia entre 7970 m⁻¹ i 11100 m⁻¹ i per *Pinus pinaster* els valors estan compresos entre 4400 m⁻¹ i 5510 m⁻¹. Aquesta variació és deguda a les diferents zones de recollida del material i als diversos mètodes de càlcul emprats (Brown, 1969; Countryman, 1982; Sylvester i Wein, 1981). Pel que fa als valors de ρ_m , són relativament superiors als trobats en la bibliografia, 519 i 790 kg/m³ per pi blanc i 640 i 660 kg/m³ per pi pinyoner, (Fernandes i Rego, 1998 i Cohen *et al.*, 2003) ja que és un paràmetre molt sensible a la metodologia emprada. Amb tot, la mostra referenciada comprèn poques dades, fet que també explica aquestes diferències.

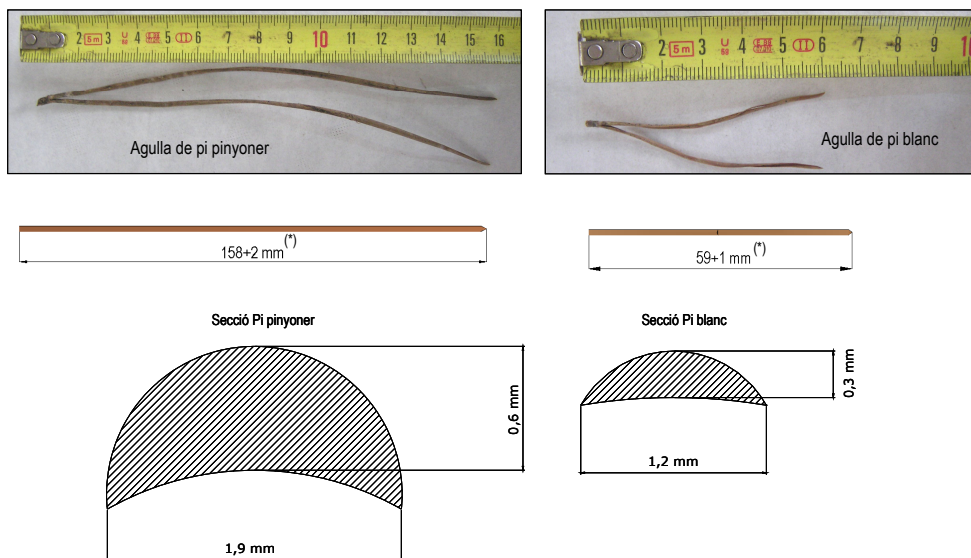


Figura III.1. Geometria de les agulles de pi. (*) El primer sumand de les cotes fa referència a la dimensió de l'agulla en el tram de longitud amb secció constant, mentre que el segon correspon a la longitud de l'extrem en forma de punxa.

Taula III.1. Paràmetres geomètrics i propietats intrínseques mitjaneres de les agulles de pi.

Paràmetres geomètrics	Pi pinyoner	Pi blanc
Longitud agulla (mm)	158	59
Secció agulla (mm ²)	0,884	0,257
Volum agulla (mm ³)	133,38	15,168
Perímetre de la secció (mm)	4,436	2,661
Àrea superficial agulla (mm ²)	700,95	157,01
σ (m ⁻¹)	5255	10351
ρ_m (kg/m ³)	686	979

III.1.2 Caracterització dels llits de gramínies: ordi (*Hordeum vulgare*), blat comú (*Triticum aestivum*) i blat dur (*Triticum turgidum*)

Els llits de gramínies són molt més heterogenis que els de coníferes, ja que la palla d'aquestes espècies es compon de partícules de diferents grandàries i formes. Essencialment, s'hi troba la tija d'aquestes plantes, de secció variable en morfologia i dimensions, barrejada amb un combustible molt fi, anomenat boll, format pels filaments de les pallofes que cobreixen el gra. Aquesta heterogeneïtat va requerir un esforç considerable a l'hora de modelitzar aquest tipus de combustible. Així, calgué definir i calcular les propietats intrínseques de les seccions característiques que diferenciaven cada espècie i determinar-ne les fraccions màssiques de cadascuna d'elles respecte la totalitat del llit. Els resultats finals de σ i ρ_m per a cada espècie –calculats amb els mateixos procediments als emprats en la caracterització de les agulles de pi– es ponderaren segons les relacions de pes estipulades. Els resultats obtinguts pel que fa a la caracterització de les seccions tipus per a cada espècie es presenten en la figura III.2. En la taula III.2 es recopilen els resultats referents a les fraccions màssiques, les relacions superfície-volum, les densitats de partícula per a cada secció definida i els valors finals ponderats. Finalment en la figura III.3 es presenten tres imatges per il·lustrar el material d'estudi.

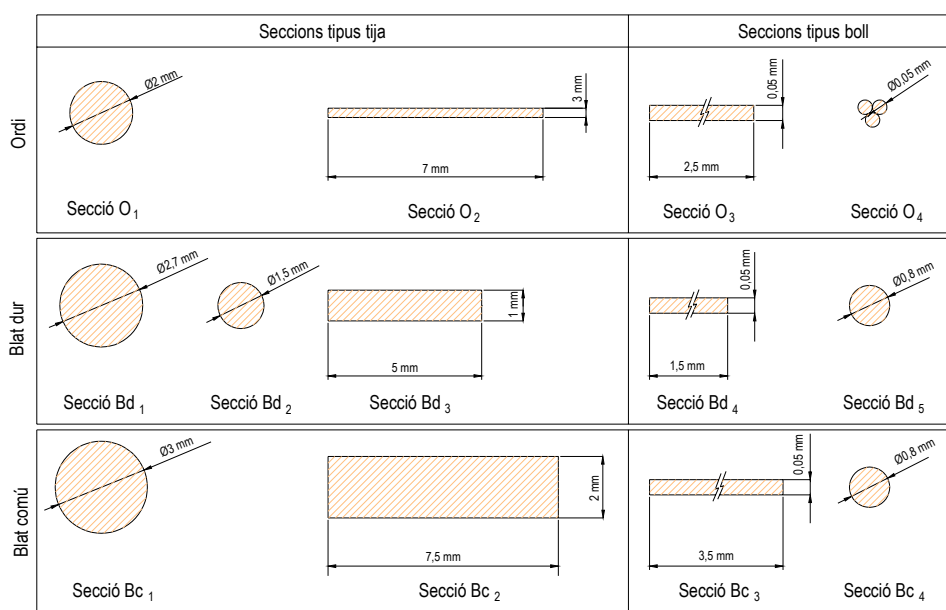


Figura III.2. Seccions tipus de les tres espècies de gramínies emprades.

Taula III.2. Propietats intrínseques de les espècies de gramínies.

Secció tipus	x_m (%)	σ (m ⁻¹)	ρ_m (kg/m ³)
Secció O ₁	11,25	2000	438
Secció O ₂	63,75	6952	363
Secció O ₃	18,75	40800	1123*
Secció O ₄	6,25	64532	1660*
Valors ponderats Ordi	100	16339	595
Secció Bd ₁	72,5	1480	205
Secció Bd ₂	9	2667	156
Secció Bd ₃	9	2400	284
Secció Bd ₄	7,5	41330	886
Secció Bd ₅	2	5000	149
Valors ponderats Blat dur	100	4734	258
Secció Bc ₁	16	1330	117
Secció Bc ₂	64	1270	136
Secció Bc ₃	16	40570	1269*
Secció Bc ₄	4	5000	147
Valors ponderats Blat comú	100	7714	315

* Els valors assenyalats són poc precisos degut a la dificultat de caracterització d'aquestes seccions, donades les seves dimensions reduïdes. No obstant això, atenent els valors baixos de les seves fraccions màssiques, no alteren substancialment el resultat mitjà final.



Figura III.3.a) Llit de combustible de graminies. b) Tiges de blat. c) Boll d'ordi.

Aquesta caracterització no es pogué comparar amb cap valor de referència, degut a la inexistència de dades publicades en aquest sentit. Amb tot, els resultats són prou congruents amb els valors de σ i ρ_m recopilats en els models de pastures de Rothermel (1973), equiparables a les disposicions naturals d'aquestes espècies.

III.2 Propietats extrínseques del combustible de laboratori

La densitat aparent (ρ_{aps}) i la relació d'empacament (β) són dos paràmetres claus per a l'estudi de l'evolució d'un front de foc i representen, juntament amb σ , les principals característiques del combustible a tenir en compte en el model de propagació d'incendis més difós i conegut en el camp forestal (Rothermel, 1972).

Per a l'avaluació de ρ_{aps} es disposaren, per a cadascuna de les cinc espècies, diversos llits de combustible de 1m per 1m de superfície (figura III.4), amb càrregues successivament més grans. Per a cada llit se'n mesurà l'altura a vuit punts diferents repartits en tota la superfície i se'n calcularen les mitjanes. Els valors experimentals de les altures (h , cm) en funció de les càrregues expressades en base seca (C_s , g/m²) es representen en la figura III.5.

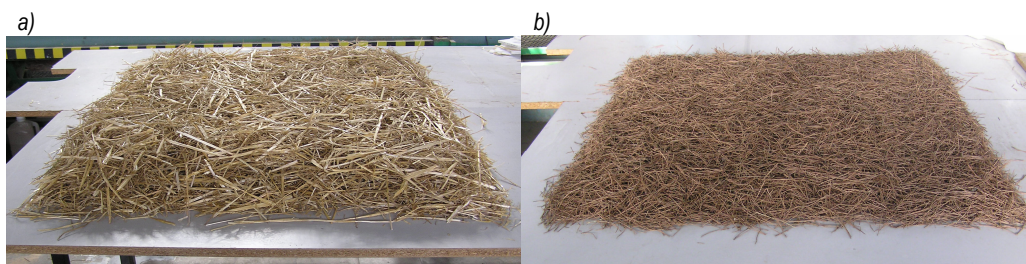


Figura III.4. a) Llit de combustible de blat. b) Llit de combustible de pi blanc.

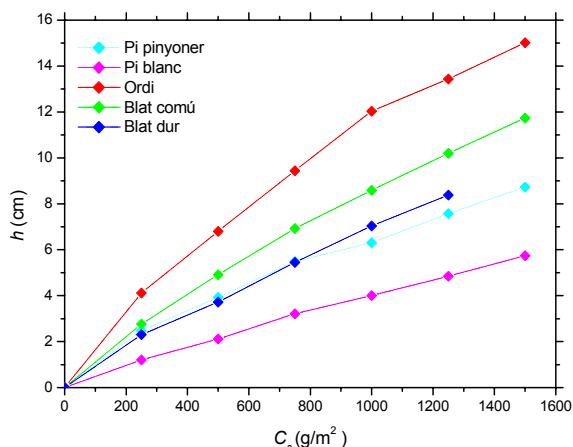


Figura III.5. Evolució de les altures dels llits de combustible amb la càrrega.

De l'anàlisi d'aquest gràfic, se'n desprèn que, per a totes les espècies estudiades, l'altura del llit no augmenta al mateix ritme que ho fa la càrrega. Això és deu a què, a mesura que s'incrementa la càrrega superficial, les partícules tendeixen a col·locar-se de manera que els espais vuits entre elles siguin cada vegada més petits. Aquest fet fa incrementar doncs la densitat aparent, entesa com la massa de material distribuïda en un cert volum, així com la càrrega superficial dividida per l'altura del llit. D'aquesta manera, s'observa que les partícules que componen els llits de pi tenen més facilitat per a compactar-se que els elements que formen els llits de gramínies, essent el pi blanc i l'ordi els més i menys compactats respectivament.

Certament, no es pot determinar una densitat aparent característica de cada espècie, però sí se'n pot estudiar la seva evolució a mesura que es disposen llits de combustible més carregats. La modelització teòrica de la compactació de partícules sòlides és un camp molt estudiat (Schäfer *et al.*, 1996). Per bé que no és objecte específic d'aquesta tesi, s'ha dut a terme una petita aportació en aquest sentit, estudiant dues de les possibles expressions empíriques (III.1 i III.2) que poden correspondre a les corbes obtingudes en la gràfica anterior:

$$h = \frac{ab + cC_s^d}{b + C_s^d} \quad (\text{III.1})$$

$$h = a'(1 - e^{-b'c_s}) \quad (\text{III.2})$$

On:

$a, b, c, d, a' i b'$ Constants empíriques, -.

En la taula III.3 es recullen els valors de les constants empíriques per les dues expressions i per a cada espècie estudiada.

Taula III.3. Constants empíriques.

Espècie	a	b	c	d	a'	b'
Pi pinyoner	0,01509	2743,856	110,345	0,7449	12,659578	0,00074353
Pi blanc	0,00357	8776,038	60,034	0,9333	16,680903	0,00027824
Ordi	0,01099	1820,644	38,07	0,9687	21,919227	0,00076921
Blat comú	-0,0005	3276,422	71,173	0,8847	21,782118	0,00050971
Blat dur	0,03159	7486,613	118,971	0,8887	20,879546	0,00040907

Degut a les bones correlacions d'aquestes funcions amb els valors experimentals i gràcies a la precedent caracterització de les partícules, s'ha estudiat la dependència dels principals paràmetres geomètrics descrits amb les constants empíriques dels dos models. Això s'ha dut a terme calculant els coeficients de correlació entre el vector V_1 , format per les diferents constants empíriques, i dos vectors de dades, V_2 i V_3 , els elements de les quals es detallen en les expressions (III.3), (III.4) i (III.5). En la taula III.4 es recullen les parelles de variables amb major dependència.

$$V_1 = (a, b, c, d, a', b') \quad (\text{III.3})$$

$$V_2 = \left(\rho_m, d_c, \sigma_c, \rho_{mc}, \frac{\sigma}{\rho_m}, \frac{\sigma}{\sigma_c}, \frac{\rho_m}{\rho_{mc}}, \frac{d_c}{\sigma_c}, \frac{d_c}{\rho_{mc}}, \frac{\sigma_c}{\rho_{mc}} \right) \quad (\text{III.4})$$

$$V_3 = \left(1/\sigma, 1/\rho_m, 1/d_c, 1/\sigma_c, 1/\rho_{mc}, \frac{\rho_m}{\sigma}, \frac{\sigma_c}{\sigma}, \frac{\rho_{mc}}{\rho_m}, \frac{\sigma_c}{d_c}, \frac{\rho_{mc}}{d_c}, \frac{\rho_{mc}}{\sigma_c} \right) \quad (\text{III.5})$$

On:

- d_c Diàmetre o longitud de la partícula de major fracció massica, mm.
 σ_c Relació superfície-volum de la partícula de major fracció massica, m⁻¹.
 ρ_m Densitat de la partícula de major fracció massica, kg/m³.

Taula III.4. Coeficients de correlació per les parelles de variables amb major dependència.

Variables	Coeficient de correlació
$a(1/\sigma)$	0,679
$b(1/d_c)$	0,705
$c(1/\sigma)$	0,997
$d(\rho_m/\sigma)$	0,76
$a'(\sigma / \rho_m)$	0,992
$b'(1/d_c)$	0,542

Amb aquests resultats, queda palesa la gran dependència de les propietats intrínseques de les partícules estudiades, σ , ρ_m i d_c , amb l'evolució de l'altura del llit de combustible en funció de la càrrega superficial. És a dir, l'increment de la densitat aparent –que es pot explicar a partir de la capacitat de redistribució de les partícules– està fortament influenciada per les característiques físiques dels elements que componen els llits de combustible. A tall d'exemple, es correlacionen els dos parells de variables que presenten una major dependència. Així, s'obtenen dues relacions hiperbòliques, la primera entre els paràmetres c i σ ($R^2=0,997$) i la segona per a' i σ/ρ_m amb $R^2=0,992$:

$$c = 4,83 + 543634 \left(\frac{1}{\sigma} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$a' = 26,22 - \frac{102,5}{\sigma/\rho_m} \quad (\text{III.7})$$

Ateses les relacions descrites i donada la major simplicitat de l'expressió (III.2) respecte la (III.1), fou la primera (III.2), és a dir l'equació exponencial, l'escollida per a representar la variació de les altures dels llits amb les càrregues superficials i, seguidament, per a determinar la densitat aparent i els paràmetres que en deriven per a cadascun dels experiments realitzats.

A partir d'aquesta expressió i considerant les dependències $a'(\sigma/\rho_m)$ i $b'(1/d_c)$, es pot deduir que partícules amb σ baixes, és a dir aquelles que tenen menys àrea superficial embolcallant un cert volum, tenen més capacitat de compactar-se les unes amb les altres, ja que deriven a altures de llit de combustible menors, i per tant, densitats aparents més grans. La relació del diàmetre característic també està molt lligat a aquest concepte, ja que es pot deduir que per diàmetres característics majors, les altures de combustible també ho són i per tant les densitats aparents disminueixen. En darrer lloc, la densitat del material també exerceix una forta influència; per partícules amb idèntiques relacions superfície-volum, aquelles amb una densitat del material menor, tindran menys capacitat de compactar-se amb les seves veïnes i per tant, donaran lloc a llits de combustible amb densitats aparents més petites.

En el banc de dades experimental, l'altura del llit de combustible es calculà per mitjà de l'expressió (III.2) degut a la seva bona correlació. Això permeté agilitzar la presa de dades durant el treball experimental, ja que les càrregues i els combustibles emprats foren molt diversos i, consegüentment, la presa de mesures d'aquest paràmetre hagués estat molt laboriosa.

Així mateix, la densitat aparent en base seca (ρ_{aps}) i la relació d'empacament (β) expressada en termes de porositat del llit (η) també es calcularen per a cada experiment a partir de l'expressió mencionada, mitjançant les següents relacions:

$$\rho_{aps} = \frac{C_s}{a'(1 - e^{-b'C_s})} \quad (III.7)$$

$$\eta = 1 - \beta = 1 - \frac{C_s}{\rho_m a'(1 - e^{-b'C_s})} \quad (III.8)$$

III.3 Propietats tèrmiques del combustible de laboratori

III.3.1 Càlcul del poder calorífic

La calor alliberada en la reacció de combustió ΔH_c en un incendi forestal és un paràmetre clau per avaluar-ne la seva intensitat i, per tant, representa un element indispensable en el procés de modelització del comportament d'un incendi. La determinació d'aquesta energia per a compostos purs es pot dur a terme de manera senzilla per mitjà del càlcul de la calor de reacció (o entalpia de reacció) produïda en quantitats estequiomètriques a pressió i temperatura constants, paràmetre que, d'altra banda, sol estar tabulat en la majoria de manuals de termodinàmica. No obstant això, el càlcul de ΔH_c per a combustibles forestals és molt més complex, degut a que aquests estan formats per moltes substàncies (de fórmula exacta desconeguda) que intervenen en diferents proporcions segons les espècies. L'única manera que existeix per a conèixer la calor de combustió de manera fiable és experimentalment, i és en aquest cas quan s'utilitza el terme de poder calorífic; el superior i l'inferior, diferint aquests segons es compti l'energia total que es desprèn en la combustió (*PCS*) o el balanç net d'energia després que part d'aquesta hagi estat emprada per a l'evaporació de la humitat del combustible (*PCI*)¹.

Degut a aquest fet, el *PCS* i el *PCI* dels combustibles forestals han estat uns paràmetres poc estudiats i avaluats per a les diferents espècies i models de combustible, i diversos autors (Byram, 1959; Rothermel, 1972; Ward, 2001) n'han utilitzat valors mitjans i genèrics per a qualsevol tipologia de combustible. Amb el desenvolupament durant la darrera dècada de la nova generació de models teòrics de propagació d'incendis, s'ha vist reflectida la necessitat d'una caracterització més rigorosa dels paràmetres intrínsecs del combustible i molt especialment dels paràmetres tèrmics. Així, Cohen *et al.* (2003) i Dupuy *et al.* (2003), entre d'altres autors, han aportat noves dades en aquest sentit.

La taula III.5 recull alguns valors significatius extrets de la bibliografia, d'interès per a aquest estudi. Nogensmenys, ateses les diferències que s'hi observen i degut a la naturalesa tan diversa del combustible emprat en l'experimentació de laboratori, aquests no es poden considerar com a conclouents, simplement es poden prendre com a referència.

¹ El *PCS* s'expressa habitualment en base màssica seca, és a dir, kJ/kg de matèria seca, mentre que el *PCI* s'expressa en base màssica humida, és a dir, kJ/kg de matèria original, amb humitat.

Per aquesta raó i donada la importància d'aquests paràmetres, es realitzà un petit programa experimental per tenir dades certes sobre la calor de combustió de les diferents espècies d'estudi. En el següent apartat se'n detallen llurs característiques i resultats.

Taula III.5. Poders calorífics del combustible forestal. Mostra representativa de la bibliografia.

Autors	Paràmetre descrit	Tipus de combustible	Valor numèric (kJ/kg)
Byram (1959) Ward (2001)	<i>PCS</i>	Fusta de pi	21290
Byram (1959) Ward (2001)	<i>PCS</i>	Virutes de fusta	19185
Rothermel (1972) Pyne (1996) Cruz (2004)	<i>PCI</i>	Espècies forestals genèriques	18600
Ward (2001)	<i>PCS</i>	Espècies forestals genèriques	20000
Palz i Chantier (1980) Duke (1983)	<i>PCS</i>	Palla de cereal genèric	17040
	<i>PCI</i>	Palla de cereal genèric	15060
	<i>PCI</i>	Cereal genèric	15000
	<i>PCS</i>	Herbàcies genèriques	17500
Cohen <i>et al.</i> (2003)	<i>PCS</i>	Agulles de <i>Pinus halepensis</i>	22331
	<i>PCS</i>	Agulles de <i>Pinus pinaster</i>	21198
Dupuy <i>et al.</i> (2003)	<i>PCS</i>	Agulles de <i>Pinus pinaster</i>	21200
	<i>PCS</i>	Virutes de fusta de pi	20200

Determinació experimental del poder calorífic

L'experimentació es dugué a terme amb una bomba calorimètrica adiabàtica del Departament de Termodinàmica de l'ETSEIB (figura III.6). El funcionament d'aquest equip és molt senzill; dins de la bomba,

pressuritzada a 30 bar, té lloc la combustió completa amb excés d'oxigen d'una mostra de combustible d'humitat coneguda (figura III.7). La calor generada en aquesta reacció es transfereix a l'aigua continguda dins el vas del calorímetre, la qual cosa li provoca un increment de temperatura. A partir de l'observació d'aquest salt tèrmic, la calor de combustió –el *PCS* en aquest cas, degut a les condicions adiabàtiques de l'experiment– pot ser obtinguda. A més, calculant la calor de vaporització de l'aigua continguda en la mostra també es pot computar el *PCI*.

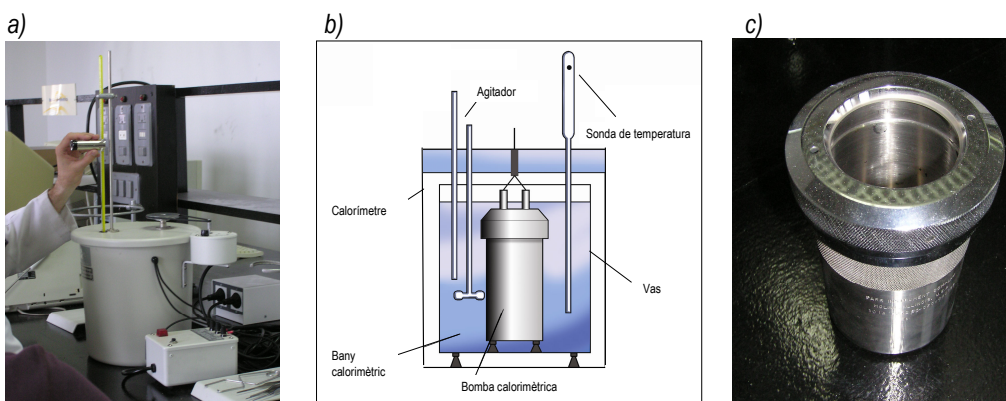


Figura III.6. a) Calorímetre. b) Representació esquemàtica dels principals elements del calorímetre. c) Bomba calorimètrica.

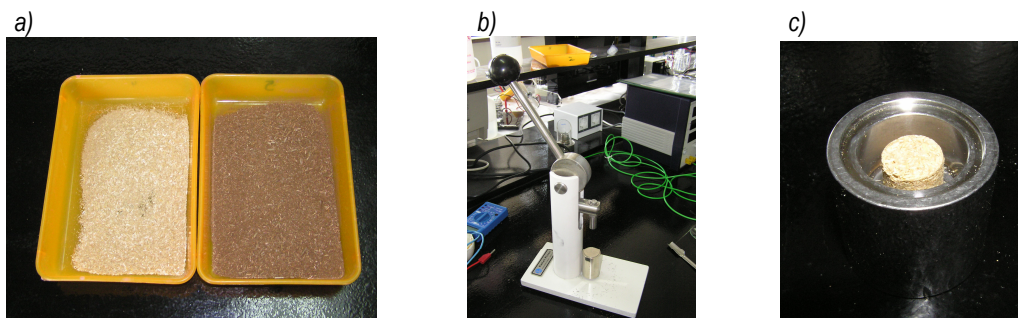


Figura III.7. a) Palla de blat i agulles de pi en pols. b) Premsa. c) Pastilla premsada de blat.

Aquests càlculs es duen a terme seguint les següents expressions:

$$PCS = \frac{((m_{H_2O_{cal}} + C_{cal})C_p \Delta T)(1 + H_s)}{m_p} \quad (\text{III.9})$$

$$PCI = PCS \left(\frac{1}{H_s + 1} \right) - \frac{Q_v}{m_p} \quad (\text{III.10})$$

$$Q_v = m_p \left(1 - \frac{1}{1 + H_s} \right) C_p \Delta T_{eb} + \Delta H_v \quad (\text{III.11})$$

On:

- $m_{H_2O_{cal}}$ Massa d'aigua continguda dins el vas del calorímetre, kg.
- m_p Massa de la pastilla premsada en base seca, kg.
- C_{cal} Massa equivalent d'aigua del calorímetre, kg.
- C_p Calor específica de l'aigua, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- ΔT Increment de temperatura de l'aigua del calorímetre, K.
- Q_v Calor de vaporització de l'aigua continguda en la pastilla del combustible, kJ.
- ΔT_{eb} Increment de la temperatura de l'aigua del combustible fins a ebullició, K.
- ΔH_v Calor latent de vaporització de l'aigua, kJ/kg.

Es realitzaren dos assajos per a cadascun dels combustibles emprats al laboratori; les agulles de pi blanc i pinyoner, la palla d'ordi, la palla de blat comú nou i vell i, finalment, la palla de blat dur. En la figura III.8 es representen les corbes de l'evolució temporal de la temperatura de l'aigua del vas del calorímetre i la seva derivada, per als assajos efectuats amb pi blanc i ordi, essent aquestes les dues espècies que presentaren major i menor calor de combustió respectivament. S'hi observen clarament els diferents períodes de l'experiment. El primer (0), correspon a l'inici de la prova, concretament al temps previ a la ignició de la mostra; el segon, quan té lloc la combustió, on (1) correspon a una primera fase de combustió ràpida que es tradueix en un increment sobtat de la temperatura de l'aigua del vas del calorímetre i (2) a una combustió més lenta i per tant a una desacceleració de l'escalfament de l'aigua; en darrer lloc (3) representa la fase d'estabilització una vegada ja s'ha completat la reacció. Les diferències entre els PCS de les dues espècies queden paleses en la gràfica a), ja que el pendent de la corba $T(t)$ per la fase (1) és més pronunciat pel pi

blanc que per l'ordi. Així mateix, s'observa igualment en la gràfica b), on el màxim de $T'(t)$ és clarament major per l'espècie amb el PCS més elevat.

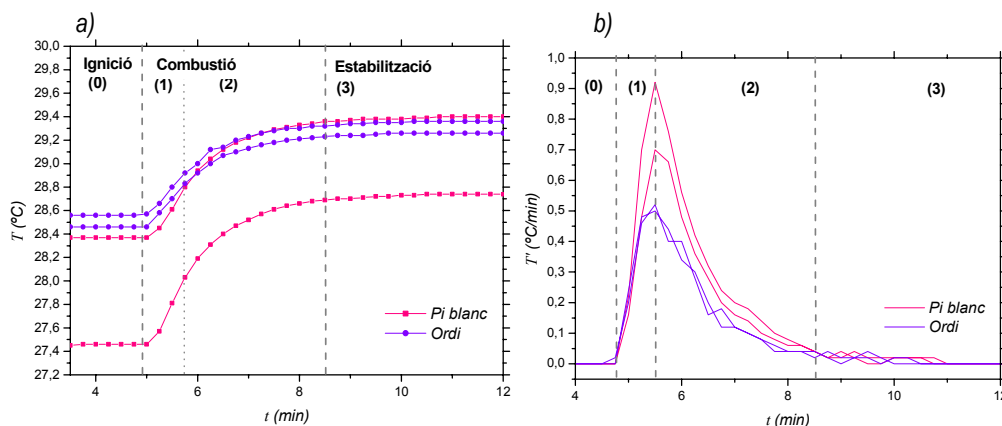


Figura III.8. Evolució temporal pels dos assajos amb pi blanc i amb ordi a) de la temperatura de l'aigua i b) de la velocitat d'escalfament de l'aigua del calorímetre.

La taula III.6 recull els resultats mitjans d'aquesta experimentació. La comparativa entre tots ells queda il·lustrada finalment en la figura III.9.

Taula III.6. Poders calorífics del combustible forestal. Valors experimentals.

Combustible	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
Pi blanc	20999	18548
Pi pinyoner	20593	18307
Blat comú nou	18976	16968
Blat dur	18868	16933
Blat comú vell	18702	16696
Ordi	18251	16148

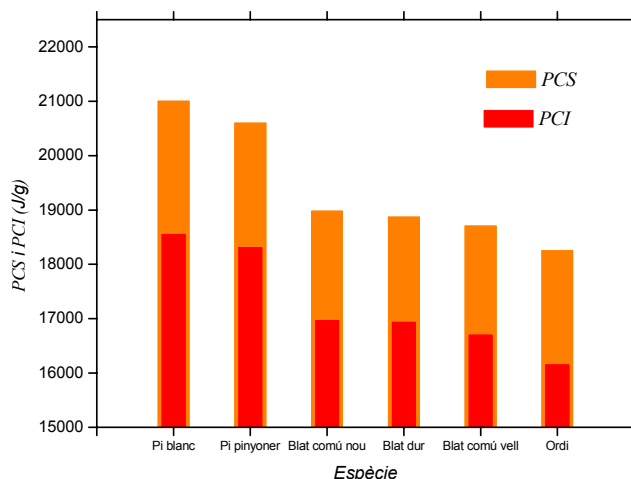


Figura III.9. Representació gràfica comparativa del PCS i del PCI per espècies.

III.3.2 Càlcul de la calor específica

La caracterització de la calor específica dels combustibles forestals (C_f) rau en la necessitat del càlcul de la calor d'ignició (Q_i), paràmetre bàsic, juntament amb el poder calorífic, per a l'estudi del comportament d'un incendi. C_f ha estat avaluada de manera genèrica per a la gran majoria d'autors, és a dir, ha estat considerat com un valor numèric únic independent del tipus de combustible i de les condicions ambientals (taula III.7).

Taula III.7. Calors específiques del combustible forestal. Mostra representativa de la bibliografia.

Autor	Tipus de combustible	C_f ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Anderson (1969) De Mestre <i>et al.</i> (1989)	Combustible forestal genèric	1,37
Pagni i Peterson (1973)	Combustibles cel·lulòsics	1,396
Albini (1985)	Combustible forestal genèric	1,927
Grishin i Perminov (1996)	Combustible de capçades	2
Cruz (2004)	Combustible de capçades	2,1

Si bé es cert que la calor específica dels combustibles forestals és pràcticament independent de l'espècie, no es pot afirmar el mateix respecte a la temperatura ambiental. Així, considerant un estat d'equilibri entre la temperatura ambiental i la del combustible, Arnaldos *et al.* (2004) proposa una relació lineal entre ambdós $C_f(T)$, de manera que a mesura que incrementa la temperatura, C_f ho fa seguint la següent expressió:

$$C_f = 0,1031 + 0,003867 T \quad (\text{III.12})$$

On:

C_f Calor específica del combustible, en base seca, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

T Temperatura, K.

Atesa aquesta relació i analitzant la bibliografia, es pot observar que el valor proposat per Anderson (1969) –emprat posteriorment per de Mestre *et al.* (1989)– correspondria a una C_f calculada a una temperatura lleugerament inferior als 60°C , mentre que per Pagni i Peterson (1973) la temperatura seria lleugerament superior a aquest valor. Aquesta temperatura correspon a la mitjana que té un combustible durant un procés continu d'escalfament fins a la temperatura d'ebullició de l'aigua. Per altra banda, els altres valors recopilats en la taula precedent propers a $2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, es calcularien a partir de l'equació (III.12) considerant una temperatura d'uns 210°C aproximadament, assent aquesta la temperatura mitjana del combustible si és escalfat fins a assolir la ignició. Aquestes diferències s'expliquen a partir del model emprat pels autors per a calcular la calor d'ignició i constaten, d'altra banda, la validesa de l'equació proposada.

Així doncs, i atès el model de Q_i aplicat en aquest estudi (vegeu capítol 6), el valor de C_f emprat per a cadascuna de les tipologies del combustible de laboratori fou de $1,37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

