

**CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DE L'EFECTE DEL CANVI D'ESCALA
EN L'EXPERIMENTACIÓ EN INCENDIS FORESTALS**

Memòria de Tesi Doctoral presentada per
Yolanda Pérez Ramírez
per obtenir el grau de Doctora Enginyera Industrial

Dirigida per Eulàlia Planas Cuchi

Barcelona, març de 2010
Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Departament d'Enginyeria Química
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Universitat Politècnica de Barcelona

ACTA DE QUALIFICACIÓ DE LA TESI DOCTORAL

Reunit el tribunal integrat pels sota signants per jutjar la tesi doctoral:

Títol de la tesi:

Autor de la tesi:

Acorda atorgar la qualificació de:

- No apte
- Aprovat
- Notable
- Excel·lent
- Excel·lent Cum Laude

Barcelona, de/d' de

El President

El Secretari

.....
(nom i cognoms)

.....
(nom i cognoms)

El vocal

El vocal

El vocal

.....
(nom i cognoms)

.....
(nom i cognoms)

.....
(nom i cognoms)

Als meus pares

AGRAÏMENTS

Durant tots els anys que he estat treballant en l'elaboració de la tesi han estat moltes les persones que m'han acompanyat al llarg d'aquest camí fent-me costat. Per això, vull donar les gràcies a tots aquells que heu compartit amb mi aquesta etapa de la meua vida, perquè directament o indirecta m'heu ajudat a arribar fins aquí i que avui escrigui aquestes paraules amb un somriure, recordant tots els moments que hem viscut plegats.

Vull agrair al Joaquim Casal, director del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC) quan vaig iniciar el doctorat, la oportunitat que em va donar de dur a terme aquesta tesi en aquest grup de recerca del Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya. Vull donar-li les gràcies també pel seu suport i perquè he pogut aprendre molt de la seva personalitat carismàtica.

A tots els companys del CERTEC tant professors, com doctors, doctorands i estudiants vull agrair-los el seu recolzament i afecte.

Dels professors voldria destacar a en Joaquim, en Josep, l'Eulàlia, l'Elsa i la Rosa Mari. L'Elsa em va introduir al món de la recerca i gràcies a ella vaig descobrir la meua passió pels incendis forestals. Però no només ha estat una gran companya a nivell professional, durant tots aquests anys hem pogut compartir molt més i avui ens uneix una forta amistat. Moltes gràcies Elsa pel teu suport i comprensió, especialment en els moments més crítics. A la Rosa Mari només puc dedicar-li paraules de gratitud, però que probablement es queden curtes per expressar el meu agraïment. Gràcies Rosa Mari per fer-me costat sempre i per la teua gran amistat.

Dels ja doctors del CERTEC, vull dedicar un agraïment especial al Miguel no només pel seu suport tècnic i científic, sempre inestimable, sinó també per la seva proximitat i qualitat humana. A l'Alba vull agrair-li l'esforç realitzat per a dur a terme part de l'experimentació d'aquesta tesi i els bons moments que compartirem en les nostres estades a Portugal. Al Jordi Dunjó vull donar-li les gràcies per la seva amistat i suport constant, a més dels bons moments viscuts, sovint compartits també amb la Mercedes. Del Luis Zárate i el Fabio Ferrero recordaré sempre la seva amistat, simpatia i constant suport durant els anys que treballarem plegats. Vull mencionar també a l'Adriana, l'Héctor, la Maria Isabel i la Rut, companys doctorands amb qui he compartit bons moments.

De tots els estudiants que han passat pel CERTEC vull recordar aquí a la Carolina, el Marcos i l'Ariadna pels moments compartits. A més, vull dedicar unes paraules al Miki, perquè ha estat un gran company, ara és un bon amic, i perquè he pogut aprendre molt del seu enginy i sapiència.

A la meva directora, l'Eulàlia, vull donar-li les gràcies per creure en mi i en aquest treball, per la seva paciència i constància, perquè sense el seu suport no hauria pogut desenvolupar aquesta tesi. Moltes gràcies Eulàlia.

També agraeixo a la Universitat Politècnica de Catalunya l'ajuda econòmica rebuda durant els anys en què vaig gaudir d'una Beca UPC per a la Recerca.

Part del treball experimental d'aquesta tesi es va dur a terme a la Universitat de Coimbra a Portugal. Així, vull expressar la meva gratitud al professor Domingos Xavier Viegas per la seva càlida acollida i el seu tracte hospitalari en tot moment. A més, vull agrair-li la possibilitat que em va donar de treballar al *Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais*. Vull expressar també la meva gratitud a l'enginyera Teresa, a l'Ana Rosa, al Luis Mario, al Luis Paulo, al Nuno, al senyor Cardoso i al Miguel Almeida. Al Pedro Palheiro i al Carlos Rossa els agrairé sempre la seva amabilitat, afecte i amistat.

Durant el doctorat vaig tenir la possibilitat de fer una estada al *Bushfire Research Group* a Austràlia. Per això vull agrair al Jim Gould la oportunitat que em va brindar de treballar amb el seu grup de recerca i de participar en les majors cremes experimentals que s'han fet fins a l'actualitat. Vull donar-li les gràcies també perquè vaig poder aprendre moltíssim treballant al seu costat. De tots els companys australians vull agrair al Matt, al Miguel i a l'Andrew la seva calidesa i companyonia. Vull donar les gràcies també a la Beccy, el David, la Maria, i el Jeremy que em van acollir com si fos un membre més de la família Chandler.

Del meu treball al Departament d'Enginyeria Química vaig conèixer a la Cintia. A ella li vull agrair el seu constant suport, els seus consells i especialment la seva amistat.

A la Laura i la Neus els vull donar les gràcies perquè són la meva família de Barcelona, perquè des del primer dia em van fer sentir com a casa, perquè hem compartit molt bons moments i perquè no han deixat mai de donar-me ànims amb la tesi. Gràcies nenes!

No puc oblidar a l'Óscar i la seva família que durant molts anys van patir els bons i no tant bons moments fruit de l'esforç personal invertit en aquesta tesi. Per això els guardaré sempre un agraïment molt especial.

A la Pilar vull agrair els seus savis consells, que m'han ajudat a veure i viure la vida d'una altra manera, a créixer com a persona, a confiar en mi i especialment a tornar a somriure.

A les companyes del "Oyster's club" perquè m'han ensenyat a gaudir dels petits plaers de la vida i veure els problemes des d'una altra perspectiva molt més optimista.

Al David vull agrair-li la seva confiança en mi des del primer moment, els ànims constants i la seva capacitat per fer-me riure. Moltíssimes gràcies David.

Les últimes paraules les vull dedicar a la meva família, pares, germanes, cunyats i nebots. Gràcies a tots per creure en mi, per donar-me suport, per aguantar-me en els pitjors moments i per estimar-me incondicionalment. MIL GRÀCIES.

1. INTRODUCCIÓ

Any rere any milions d'hectàrees són destruïdes pels incendis forestals, no només a Europa sinó arreu del món, tan sols cal recordar els dramàtics episodis viscuts a Califòrnia i Austràlia recentment. A banda de l'evident impacte mediambiental que això provoca –emissió de gasos d'efecte hivernacle, pèrdua de biodiversitat, acceleració de l'erosió del sòl, etc.– els incendis són també un problema social de primer ordre, que posa en perill a les persones i els seus béns.

A Catalunya, l'acumulació de combustible en espais forestals, conseqüència de l'abandonament de les activitats agràries i la demanda urbana creixent d'aquests espais són les principals causes estructurals dels incendis. Davant d'aquest escenari conjuntural, el règim d'incendis a Catalunya es caracteritza per incendis que generalment no superen les 10 hectàrees cremades. Tanmateix, del total d'ignicions, un petit percentatge, de l'ordre del 4 %, evoluciona fins a assolir magnituds que superen les capacitats dels mitjans d'extinció, són els anomenats grans incendis forestals, i són els responsables de la major part, aproximadament un 96 %, de les hectàrees cremades cada any (Martínez *et al.*, 2005). Aquest tipus d'incendis es troben sovint lligats a fenòmens de comportament extrem que generen una elevada virulència del foc, com són la propagació per les capçades dels arbres, els remolins de foc, els focus secundaris o la sobtada acceleració del foc, coneguda a la literatura com a comportament *eruptiu*.

Tot i la notable evolució que han experimentat les tasques de prevenció i extinció en els darrers anys, les millores assolides continuen essent insuficients per a afrontar aquests tipus d'incendis. A més, aquesta situació es veu agreujada pel canvi observat en el règim d'incendis, derivat d'efectes associats al canvi climàtic, que provoca una major freqüència d'aquest tipus de comportament extrem del foc, a causa d'una major severitat en les condicions meteorològiques (Flannigan *et al.*, 2009).

Davant d'aquesta situació, en les darreres dècades s'ha impulsat fortament la recerca en l'àmbit dels incendis forestals. Tanmateix, l'estudi dels incendis forestals és certament complex per les condicions i l'entorn on aquests es desenvolupen, a banda també del gran nombre de fenòmens –físics, químics i socials– que interaccionen al llarg de diferents escales espacials i temporals, per a donar lloc a l'inici i propagació del foc (Van Wagner, 1971; Sullivan, 2009a). A més, pel que fa a la modelització dels incendis forestals, un problema afegit ve donat pel seu caràcter transitori, ja que els incendis es propaguen a la natura, generalment, de forma no uniforme i no estacionaria a través de complexos de combustible heterogenis. Aquest fet ha forçat als investigadors a seleccionar els elements amb més pes específic, realitzant simplificacions per tal de reduir el nombre de paràmetres a considerar. Aquestes simplificacions, comencen amb la mateixa definició del terme comportament dels incendis, que tradicionalment s'ha considerat com la forma en què el foc propaga al interaccionar amb el combustible, les condicions meteorològiques i la topografia, i també com la forma en què crema el combustible i desenvolupa flames (Merrill i Alexander, 1987), sense ponderar altres interaccions que poden modificar total o parcialment la propagació, com aspectes socials.

Així, bona part de la recerca en incendis forestals s'ha centrat en intentar predir el comportament del foc i extrapolar aquestes prediccions a escales espacials i temporals adequades per a la presa de decisions en la gestió d'emergències (Simard, 1991). Per a això s'han desenvolupat models matemàtics de propagació que es poden classificar d'acord a la naturalesa de les seves equacions, en models físics, semifísics, empírics i semiempírics (Sullivan, 2009a). En el cas dels models físics i semifísics són necessàries dades per a validar les hipòtesis sota les quals han estat formulats. En el cas dels models empírics i semiempírics, aquests es formulen a partir de dades obtingudes experimentalment. No obstant, és òbvia la dificultat que implica l'experimentació en aquesta àrea de coneixement, ja que no es poden reproduir a escala real els episodis d'emergències d'incendis forestals. A més a més, en molts casos l'extracció de dades durant el decurs d'un incendi és una tasca impracticable pels riscos inherents a la pròpia naturalesa dels incendis forestals. Precisament per això, l'experimentació en incendis forestals ha tingut lloc bàsicament al laboratori, i també, més recentment, a camp en condicions més o menys controlades.

L'experimentació al laboratori permet controlar pràcticament tots els paràmetres que influiran en el comportament de l'incendi i permet a més poder fer rèpliques dels experiments, fet que garanteix la representativitat estadística dels resultats. Però en el cas dels incendis forestals presenta l'evident inconvenient que el fenomen s'allunya d'aquell que es vol modelitzar. Els experiments realitzats de forma controlada a camp, permeten acostar-se més al fenomen real però no sempre es poden controlar tots els paràmetres i és difícil aconseguir rèpliques (Van Wagner, 1971).

No obstant, no es poden utilitzar les dades obtingudes experimentalment, bé sigui a laboratori o a camp, sense tenir en compte l'escala en què han estat obtingudes (Cheney i Gould, 1995). Per tant, cal tenir present com canvien les interaccions i el pes específic dels diferents fenòmens físics, químics i termodinàmics que intervenen en un incendi al canviar l'escala de treball, per a d'una banda poder

validar les hipòtesis sota les quals han estat formulats aquests models matemàtics (Wotton *et al.*, 1999), i per altra banda poder determinar la validesa de l'extrapolació dels resultats de l'experimentació duta a terme en una escala, a una altra escala diferent. Actualment, i després de quasi un segle de recerca en matèria d'incendis forestals, el coneixement assolit en aquesta àrea és insuficient per a dur a terme de forma rigorosa les tasques descrites. De fet, aquest és un debat obert en la comunitat científica, que encara es planteja com traslladar els resultats experimentals, principalment els obtinguts a laboratori, a casos reals.

D'aquesta pregunta fonamental, en sorgeixen d'altres més concretes com per exemple fins a quin punt l'experimentació a laboratori és útil en l'estudi dels incendis forestals, o què és el que realment es pot extrapolar i què no, en quina escala cal treballar, etc. Tot i que la majoria d'investigadors són conscients de la necessitat de respondre a aquestes preguntes, encara no és possible donar una resposta clara a cap d'elles. Precisament d'aquí sorgeix la motivació d'aquesta tesi, que no és altre que abordar aquestes qüestions mitjançant les tècniques de l'anàlisi dimensional i l'anàlisi de semblança.

Aquesta tesi representa l'inici d'una nova línia de recerca en l'àmbit dels incendis forestal al *Centre d'Estudis del Risc Tecnològic*, de manera que és un primer pas en l'anàlisi del canvi d'escala en l'experimentació en incendis forestals.

En aquest primer capítol es presenten alguns aspectes i conceptes bàsics sobre els incendis forestals i anàlisi dimensional i de semblança, necessaris per a la comprensió i desenvolupament de la tesi.

1.1. Els incendis forestals. Conceptes generals

Sullivan (2009a) descriu els incendis forestals com la combinació de l'energia alliberada en forma de calor degut a les reaccions –principalment d'oxidació– que tenen lloc en el procés de combustió, el transport d'aquesta energia cap al combustible no cremat i la subsegüent ignició d'aquest. De forma general doncs, aquests processos es poden incloure en els camps de la cinètica química, la transferència de calor i la mecànica de fluids.

A banda, els incendis forestals es classifiquen genèricament en funció del combustible que en facilita el seu avanç i n'assegura el seu sosteniment de manera que es poden dividir en incendis de sòl, de superfície i de capçades. Els processos que intervenen en el desenvolupament de cadascun d'aquests tipus d'incendis són diferents, així com també el grau d'intensitat que poden arribar a assolir. Al llarg d'aquest treball només es tractaran els incendis de superfície. Aquest incendi es caracteritzen per consumir qualsevol tipus de material combustible disponible, situat immediatament per sobre de la superfície de terra i delimitat superiorment per les capçades dels arbres.

1.1.1. La combustió en els incendis forestals

La combustió és una reacció química que va acompanyada d'un despreniment energètic. Per tal que aquesta reacció es produeixi cal que hi hagi simultàniament uns reactius –combustible i comburent– i una aportació externa d'energia inicial. El resultat d'aquesta reacció serà la formació de noves substàncies.

Els comburents són substàncies oxidants (com l'oxigen present a l'aire). Un combustible és 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 temperatura, etc.) per tal que s'iniciï la combustió.

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. En aquest cas a més de diòxid de carboni i aigua es poden obtenir molts altres compostos derivats de la degradació parcial del combustible.

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 etapes diferenciades, la ignició, la combustió i l'extinció (Arnaldos *et al.*, 2004).

La ignició sol ser l'etapa més complexa, sobretot en funció de l'estat del combustible i requereix l'aportació externa de calor per al seu inici. Així, aquesta fase comença amb la deshidratació del

combustible en la que s'evapora la humitat present en aquest i pot anar acompanyada també de l'alliberament de compostos com les resines, terpens, ceres, etc., més volàtils que l'aigua. Seguidament, s'inicia la fase de piròlisi, on la calor aportada és utilitzada per a la descomposició tèrmica del combustible. Aquest procés comença aproximadament als 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. La temperatura a la que això ocorre es troba al voltant dels 600 K (Pyne *et al.*, 1996, Dupuy, 1997, Mercer i Weber, 2001). En realitat, la ignició és pot donar o bé per contacte directe o per ignició espontània. La ignició per contacte directe és aquella en la que l'aportació de calor es fa aplicant directament una flama o espurna sobre el combustible. En l'autoignició l'aportació de calor es fa indirectament (per convecció o radiació) de manera que si la temperatura del combustible augmenta prou, la inflamació es produirà espontàniament (l'energia que adquireix el combustible és suficient per activar la reacció de combustió).

La combustió correspon a l'estat estacionari en què té lloc la reacció de combustió de forma contínua. Si la calor alliberada per aquesta reacció és suficient per mantenir actius els processos d'ignició, la combustió es mantindrà.

Per últim, l'extinció marca el final del procés de combustió amb flama. L'extinció es produeix per la limitació d'algun dels components indispensables per produir la reacció de combustió –combustible, comburent i aportació energètica. No obstant, si es donen les condicions adequades, poden tenir lloc altres tipus de combustió, com és el cas de la combustió sense flama que correspon a la reacció residual que té lloc en els últims estadis d'un incendi pràcticament extingit.

Alguns autors (Pyne *et al.*, 1996) divideixen el procés de combustió en quatre processos en lloc de tres: preignició, ignició, combustió i extinció. On la preignició correspon al procés de vaporització de combustible (deshidratació i piròlisi) i la ignició faria referència únicament al procés d'inflamació o activació de la reacció de combustió. Les dues darreres etapes no varien. El terme preignició coincideix amb el que a la bibliografia altres autors han anomenat preescalfament del combustible (Hottel *et al.*, 1971).

Tot seguit s'entrarà més en detall en les reaccions químiques específiques que tenen lloc en els processos de piròlisi i combustió, d'acord a les reaccions que tenen lloc en les diferents fases –sòlida i gasosa– en les que es troba el combustible. No obstant primerament es farà un breu apunt sobre la naturalesa química dels combustibles forestals per tal de comprendre millor les reaccions.

Composició química dels combustibles forestals

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, l'hemicel·lulosa i la lignina.

Tanmateix, 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. Altres components minoritaris que poden afectar la inflamabilitat són els minerals. A més solen tenir un cert contingut d'humitat, que varia en funció de l'espècie i de les condicions ambientals.

La cel·lulosa és un carbohidrat (polisacàrid) format per llargues cadenes lineals de β -D-Glucosa, de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$. El seu contingut en la fusta es troba entre el 41% i el 53%, depenent de l'espècie. Pel què fa a l'hemicel·lulosa, és també un carbohidrat però de cadena més curta que la cel·lulosa, basat en pentoses i hexoses en lloc de glucoses i en la fusta es troba en percentatges que van del 15% al 25%.

La lignina, polímer aromàtic de cadena ramificada, és la substància que dóna duresa a la fusta i la seva calor de combustió és superior a la de la cel·lulosa i l'hemicel·lulosa. Nogensmenys, com que únicament volatilitza el 50% (aproximadament), en realitat contribueix menys a la propagació de l'incendi (combustió amb flama). La resta queda en forma de carbó i cremarà en forma de brasa (combustió incandescent). Els combustibles vegetals morts tenen proporcionalment més lignina que el vius, més d'un 65% en comparació amb el 16% - 33% dels vius, ja que la cel·lulosa es descompon amb més facilitat que la lignina.

Els terpens -hidrocarburs de fórmula $(C_5H_8)_n$ - i les resines -compostos poc volàtils formats per àcids grassos, alcohols grassos, àcids resinics i fitoesterols- considerats conjuntament, tenen una calor de combustió d'aproximadament el doble de la cel·lulosa. Aquest fet dóna més poder calorífic als incendis de combustibles rics en aquests compostos.

Els minerals són components minoritaris dels vegetals però poden influir en el procés de combustió. 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.

Reaccions de la fase sòlida

Al aplicar calor a la cel·lulosa, aquesta es descompon tèrmicament. Sovint a la bibliografia a aquesta reacció de descomposició se l'anomena piròlisi, tot i que estrictament parlant aquest terme només fa referència a les reaccions de descomposició tèrmica que tenen lloc en absència d'oxigen (Babrauskas, 2003). Tot i que el procés de piròlisi de la cel·lulosa comprèn un gran nombre de reaccions, en general, es simplifica d'acord al model de Broido-Shafizadeh. Segons aquest, la degradació tèrmica de la cel·lulosa segueix dos camins competitius, la formació de residu carbonós i la volatilització. La Figura 1.1 presenta l'esquema d'aquest model en la seva versió més actualitzada, on s'inclou un pas previ de descomposició de la cel·lulosa (Bradbury *et al.*, 1979). Altres models més complexos associats a la piròlisi de biomassa es poden trobar al treball de DiBlasi (2008).

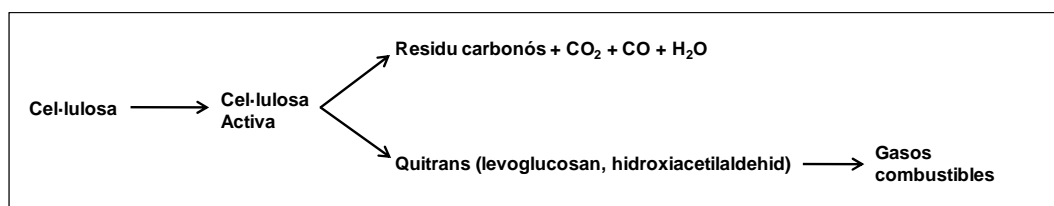


Figura 1.1 Esquema de la reacció de piròlisi de la cel·lulosa (Bradbury *et al.*, 1979).

Així, el primer camí succeeix quan la degradació tèrmica té lloc en presència d'humitat o a velocitats d'escalfament baixes i comprèn reaccions de deshidratació, rearranjament i formació de grups carbonil i carboxil. Aquest camí condueix a la formació de residu carbonós i a l'alliberament de diòxid de carboni, monòxid de carboni i aigua. Pel què fa al segon camí, la volatilització, té lloc generalment en condicions de baixa o nul·la humitat i implica la termòlisi dels enllaços glicosídics, la ciclació i el despreniment de quitrans, majoritàriament levoglucosan i hidroxiacetaldehid. Aquesta reacció és endotèrmica. El producte d'aquesta reacció és altament inestable i forma la base d'un ampli rang d'espècies que segueixen degradant-se tèrmicament de forma exotèrmica, resultant en un gran nombre de compostos intermedis i finals.

Així doncs, la degradació tèrmica de la cel·lulosa té lloc mitjançant dos camins que es troben en competició controlats per la pròpia retroalimentació tèrmica i química. Si s'allibera suficient energia en aquest procés, o bé té lloc una aportació externa de calor, llavors s'afavoreix la formació de quitrans en relació a la formació de residu carbonós. Si la subsegüent combustió dels quitrans i dels productes derivats desprèn suficient energia, llavors aquest procés s'autoalimenta. No obstant, si la calor alliberada no assoleix els reactius per efectes convectius, llavors la formació de residu carbonós es veu afavorida.

Reaccions de la fase gas

Els quitrans volàtils produïts en la descomposició tèrmica de la cel·lulosa es continuen degradant tèrmicament d'acord a reaccions secundàries que esdevenen actives en condicions de temperatura elevada i temps de residència suficientment llargs (Evans i Milne, 1987). Tal i com ja s'ha esmentat en l'apartat anterior, aquestes reaccions poden seguir diferents camins, resultant en una gran varietat de productes. Aquests productes alteren alhora la composició dels productes de la piròlisi primària de la matèria vegetal (cel·lulosa).

Les reaccions secundàries dels quitrans volàtils inclouen processos com el craqueig, la oxidació parcial, la repolimerització i la condensació (Morf *et al.*, 2002). La complexa composició dels quitrans obtinguts en la piròlisi primària requeriria un elevadíssim nombre de reaccions per a descriure en detall les transformacions que tenen lloc. Per exemple, Williams (1982) proposa un total de 14 camins possibles per a la combustió del metà, un dels possibles productes intermedis en la degradació tèrmica del levoglucosan a vapor d'aigua i diòxid de carboni. Tanmateix, tot i el coneixement sobre la descomposició d'aquesta classe de productes, el mecanisme més emprats per a descriure aquesta

descomposició consisteixen en la competició de dues reaccions tal i com s'observa a la Figura 1.2 (Di Blasi, 2008).

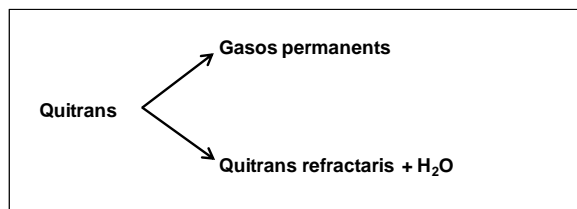


Figura 1.2 Esquema de la combustió dels quitrans obtinguts en la piròlisi primària.

Així, d'acord a la figura anterior, s'assumeix que la matèria reactiva volàtil es consumeix mitjançant dues reaccions competitives que condueixen a la formació de gasos permanents¹ i quitrans refractaris condensables. No obstant, a efectes pràctics sovint es considera únicament la descomposició bàsica del levoglucosan en una sola reacció d'oxidació que resulta en l'obtenció de vapor d'aigua i diòxid de carboni, assumint per a això que totes les reaccions de combustió intermèdies són completes (Sullivan, 2009a).

En qualsevol moment del procés de combustió però, qualsevol de les reaccions que tenen lloc es pot veure interrompuda a causa de la pèrdua d'energia o de reactius, i els seus productes poden veure's arrossegats per advecció fora de la zona de reacció de manera que deixaran de participar en la combustió. Són precisament aquest productes parcialment oxidats que formen el fum. Quan més ràpida i turbulenta és la reacció, més probabilitats existeixen de que els components de la reacció siguin arrossegats abans de que la combustió es completi, formant així una columna de fum densa i fosca (Cheney i Sullivan, 2008).

Atès que la font principal d'energia en el procés de combustió prové de les reaccions de la fase gas, i que els productes implicats en aquestes –principalment levoglucosan i derivats– es veuen generalment arrossegats fora del combustible sòlid per efectes convectius, el transport de la calor generada en aquestes reaccions és també un procés clau en l'anàlisi de la propagació dels incendis forestals. A continuació, s'expliquen més en detalls els processos relacionats amb la transferència de calor.

1.1.2. La transferència de calor en els incendis forestals

Els processos físics involucrats en la combustió de la matèria vegetal i en el comportament dels incendis forestals són, al igual que els processos químics, complicats i dependents de les condicions en què el foc es desenvolupa. El procés físic fonamental en la propagació d'un incendi forestal és la transferència de calor. El tipus i la quantitat de calor transportada influeixen en la velocitat de propagació d'un incendi, i la combustió no es pot mantenir sense un transport continu de calor.

¹ El terme gasos permanents fa referència a aquells gasos que existeixen en l'atmosfera en concentracions aproximadament constants en espai i temps.

La transferència de calor pot tenir lloc mitjançant els mecanismes de conducció, convecció i radiació. La preponderància d'un o altre mecanisme depèn del tipus d'incendi i de les interaccions amb l'entorn. Tot i això, és generalment acceptat que els principals mecanismes que governen la transferència de calor en un incendi forestal són la radiació i la convecció.

En condicions de vent suaus, el mecanisme dominant és la radiació (Weber, 1989), mentre que en condicions amb vents més intensos, és la convecció el mecanisme dominant (Grishin *et al.*, 1984). No obstant, no és raonable assumir que un mecanisme existeix independentment de l'altre, sinó que cal considerar ambdós mecanismes.

Conducció

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– es pot considerar com un mecanisme de transport de calor cap a l'interior de cadascuna de les parts del combustible. Així, quan un bosc s'incendia es pot considerar com un medi conductor, propagant-se una part de la calor per conducció cap a altres parts del combustible (troncs i branques) més fredes.

Per a l'estudi de la velocitat de propagació en incendis forestals, generalment, pot considerar-se negligible l'aportació de calor al medi combustible (bosc) mitjançant el mecanisme de conducció (Chandler *et al.*, 1983). Aquesta afirmació és certa, però depèn de la càrrega de combustible per dues raons, la primera, és que com que la fusta té una elevada capacitat calorífica, quan més massa tingui més calor transmesa necessita per a iniciar el seu procés de combustió, i la segona, és que la fusta és un mal conductor de la calor, per tant, la transmissió per conducció és lenta, sobretot quan el seu gruix és considerable. Per aquests dos motius quan un bosc format per grans masses de troncs i fulles s'incendia el procés de conducció de la calor és molt més lent que qualsevol dels altres mecanismes: convecció i radiació.

Convecció

En els incendis una gran part de la calor generada es transmet per convecció. Aquesta forma de transferència de calor és una combinació de dos mecanismes: el de difusió degut al moviment molecular aleatori (conducció), més el que transfereix energia mitjançant el moviment global o macroscòpic del fluid. El moviment macroscòpic del fluid s'associa al fet que, a qualsevol instant, grans nombres de molècules es mouen de forma col·lectiva o com agregats. Aquest moviment, en presència d'un gradient de temperatura, contribueix a la transferència de calor. Com que les molècules a l'agregat mantenen el seu moviment aleatori, la transferència total de calor es deu, per tant, a una superposició de transport d'energia per difusió i pel moviment global del fluid.

La importància del mecanisme de convecció en un incendi forestal es deu precisament a com actua aquest procés sobre una superfície en contacte. L'aire que s'escalfa per contacte amb la superfície del front de flama i els fums produïts per la combustió conformen una massa de fluid calent que surt de la

superfície de l'incendi amb una certa velocitat, que serà funció del vent de la zona i de la intensitat de l'incendi, cap a altres parts del bosc on entrarà en contacte amb altres superfícies com fulles, branques i troncs, les quals s'escalfaran, podent arribar fins i tot a la seva temperatura d'inflamació.

Radiació

La radiació és el mecanisme que transmet, juntament amb la convecció, la major part de l'energia calorífica d'un incendi. Com la convecció, és el mecanisme que escalfa el combustible molt abans de què el foc hi hagi arribat. Diferents autors (Rothermel i Anderson, 1966; Van Wagner, 1968), han considerat aquest mecanisme com el màxim responsable del preescalfament dels combustibles quan avança un front de flames en un incendi forestal.

Es defineix com a radiació tèrmica a l'energia emesa per la matèria que es troba a una temperatura finita. La radiació pot provenir tant de sòlids, com de líquids i gasos. De fet, les flames són una barreja de gasos (CO₂, CO, H₂O) i cendres incandescentes. Sense importar la forma de la matèria, la radiació pot atribuir-se a canvis en les configuracions electròniques dels àtoms o molècules constitutius de la matèria. L'energia per radiació es transporta en forma d'ones, les quals tenen una longitud d'ona que es mou en un interval que va des de part de la radiació ultraviolada fins a les microones, passant per tot l'espectre visible i l'infraroig. Per tant, mentre que la conducció i la convecció requereixen d'un medi per transmetre's, la radiació no el necessita. La transferència d'energia per radiació més eficaç és al buit. A més, l'energia radiant sempre es transmet en línia recta.

La radiació que rep un objecte és inversament proporcional al quadrat de la distància entre el focus radiant i l'objecte. Per això, la continuïtat horitzontal i vertical dels combustibles té una influència decisiva en la transmissió de calor per radiació. Altres factors influeixen també en aquest mecanisme de transport d'energia com la forma de la flama, el seu angle d'inclinació, la relació superfície - volum del combustible, i la seva compacitat entre d'altres.

1.1.3. Propietats del combustible

El combustible és un factor clau en la propagació, les seves característiques físiques i químiques determinen la possibilitat d'iniciar-se un incendi, el seu comportament posterior i l'energia potencial que es pot alliberar durant l'incendi i, per tant, la dificultat de controlar-lo. La seva implicació ve determinada tant per les seves propietats extrínseques, és a dir, les seves propietats com a conjunt o complex –entenant com a complex de combustible el conjunt de comunitats vegetals que es reparteixen en el terreny regularment en una àrea determinada– com per les propietats específiques de les partícules que el configuren, és a dir, les propietats intrínseques. D'aquesta manera, la caracterització del combustible contribueix a la predicció de la intensitat, la severitat i els efectes dels incendis forestals. A més, cal tenir en compte que el combustible és l'únic element sobre el qual l'home pot actuar i controlar parcialment per mitjà de la gestió dels espais forestals amb tractaments silvícoles, cremes prescrites, la construcció de tallafocs, etc.

A continuació es descriuen breument les propietats més significatives de cada categoria, tal i com es detallen a la Taula 1.1, a excepció de la composició química, que ja ha estat prèviament descrita.

Taula 1.1 Propietats dels combustibles forestals

Propietats intrínseques	Propietats extrínseques
Composició química i densitat	Càrrega de combustible
Propietats tèrmiques:	Mida i forma del combustible
<ul style="list-style-type: none"> • Conductivitat tèrmica • Capacitat calorífica • Coeficient d'expansió tèrmica • Calor de combustió 	Compacitat i densitat aparent
	Disposició del combustible

Densitat

La densitat dels combustibles vegetals –massa per unitat de volum– varia en funció de la humitat, ja que depenent d'aquesta tant la massa com el volum variaran, per això s'expressa sempre en termes de combustible sec. La densitat varia, a més, d'una espècie a una altra, però en la majoria dels casos està compresa entre 320 i 720 kg/m³, sense comptar la humitat, és a dir, pel combustible sec.

Propietats tèrmiques

Les propietats tèrmiques més importants a destacar dels combustibles forestals són: la conductivitat tèrmica, la calor específica, el coeficient d'expansió tèrmica i la calor de combustió.

La *conductivitat tèrmica* és una mesura de la capacitat de conducció de calor d'una substància, de valor igual al quocient entre el flux de calor i el gradient de temperatura que genera aquest flux. 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 en els arbres), les irregularitats que hi pugui haver (com els nusos que presenta la fusta) i la temperatura. En general augmenta amb la densitat, la humitat i la temperatura.

La *capacitat calorífica* és la quantitat d'energia necessària per incrementar la temperatura d'una unitat de massa –1 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.

Pel què fa al *coeficient d'expansió tèrmica*, és una mesura del canvi de dimensió que té lloc en variar la temperatura. Per a la fusta seca el coeficient és positiu en totes direccions (és a dir la fusta s'expandeix amb la calor i es contrau amb el fred). En general es pot considerar independent de la temperatura per a valors d'aquesta entre –50 °C i 55 °C.

En darrer lloc, la *calor de combustió* 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 també en funció de la humitat.

Ara bé, la calor de combustió que per a compostos purs és en principi senzilla de determinar, deixa de ser-ho quan es parla dels combustibles forestals, que com ja s'ha vist, poden estar formats per moltes substàncies (sovint de fórmula exacta desconeguda) que intervenen en diferents proporcions segons les espècies i les parts de la planta que es considerin. Per tant, la determinació de la calor de combustió per als combustibles forestals resulta pràcticament impossible, de forma que l'única manera de conèixer la calor que es desprèn durant la combustió de matèria vegetal és determinar-la experimentalment, però aleshores ja no es parla de calor de combustió sinó que es parla de *poder calorífic*.

A més, es pot distingir entre el *poder calorífic superior* i el *poder calorífic inferior*. En el primer cas es determina la quantitat de calor que lliura una unitat de massa de combustible en una combustió completa. Aquest s'obté de fer un assaig normalitzat (normes UNE-23-103, ISO-1716, NF-M-0.-005) en una bomba calorimètrica. Tanmateix, en realitzar la mesura del poder calorífic superior, part de la calor despresa en produir-se la combustió s'absorbeix per evaporar l'aigua de la mostra. Aquesta energia es perdria si el vapor d'aigua es deixés escapar, però al treballar en un recipient tancat la calor de vaporització es desprèn novament al condensar l'aigua sobre les parets del recipient, comptabilitzant-se doncs també per l'augment de la temperatura de l'aigua que envolta el recipient. Si la combustió es pogués fer a pressió constant en un recipient obert, el vapor d'aigua seria alliberat a l'atmosfera (que és el que succeeix a la realitat, en un incendi) i la calor que es comptabilitzaria seria inferior i correspondria al *poder calorífic inferior*. En realitat no és possible fer aquesta mesura de manera que el poder calorífic inferior s'ha de deduir del superior restant-li la calor d'evaporació de l'aigua que contingui la mostra, i de l'aigua que es desprèn en la reacció de combustió.

Càrrega de combustible

La càrrega de combustible es defineix com la quantitat de combustible present per unitat de superfície, mesurat en base seca, ja que d'aquesta manera és possible 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. Normalment s'expressa en tones per hectàrea [$t \cdot ha^{-1}$].

Mida i forma del combustible

La forma i mida dels combustibles vegetals s'expressa normalment en termes de la seva relació superfície/volum [$m^2 \cdot m^{-3}$], com més petit sigui el combustible més gran serà aquesta relació.

Les partícules petites tenen una superfície gran comparada amb el seu volum de manera que 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.

Compacitat i densitat aparent del combustible

La *compacitat* és una mesura de l'espai existent entre la vegetació. Com menys espai hi hagi, per tant més compacitat, 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.

La compacitat s'acostuma a donar en termes de densitat aparent, que és la massa de matèria vegetal dividida pel volum que ocupa en una determinada distribució. 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.

Disposició de 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:

- Disposició horitzontal
- 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. 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. 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 de l'incendi estarà pràcticament assegurada.

1.1.4. Contingut d'humitat dels combustibles

El contingut d'humitat present als combustibles es defineix com la massa d'aigua per unitat de massa del combustible totalment sec, és a dir, lliure d'aigua. La humitat dels combustibles depèn de les condicions ambientals, del tipus de combustible i del seu estat (si és viu o mort). En general els combustibles que tenen menys d'un 30 % d'humitat (punt de saturació de la fibra) es consideren morts. Els combustibles vius poden tenir humitats des del 30 % fins el 300 %.

El contingut d'humitat és un factor molt important a tenir en compte en la propagació dels incendis forestals, ja que part de l'energia alliberada durant la combustió és emprada per evaporar l'aigua de la vegetació adjacent a la que s'està cremant. Si aquesta energia no és suficient per evaporar l'aigua, no es produirà la ignició i per tant la combustió s'aturarà.

Així, tot i que el contingut d'humitat és una propietat més del combustible, s'ha preferit dedicar un apartat íntegre a la seva descripció atès el seu paper fonamental en el comportament del foc.

Humitat dels combustibles forestals morts

La humitat dels combustibles forestals morts depèn lògicament de les condicions meteorològiques: pluja, vent, temperatura i humitat de l'aire. La fusta (troncs) absorbeix aigua mentre la seva superfície estigui mullada (és a dir mentre vagi plovent), per tant la seva humitat dependrà més de la durada de la pluja que de la quantitat que en cau. En canvi la humitat dels combustibles disposats en forma de capa sobre el sòl (humus, fulles, etc.) depèn sobretot de la quantitat de pluja caiguda, ja que el sòl reté la major part de l'aigua caiguda que podrà anar difonent lentament cap al combustible encara que hagi parat de ploure.

El vent contribueix sobretot en l'assecament dels combustibles, arrossegant les partícules de vapor que s'estiguin alliberant. L'efecte sol ser més important en partícules de diàmetre petit (major relació superfície-volum) que en combustibles de diàmetres grans o disposats en capes sobre el sòl.

La temperatura de l'aire afecta tant la seva humitat com la seva pressió de vapor i per tant afecta la humitat d'equilibri. Com més elevada és la temperatura del combustible menor la humitat relativa de l'aire que l'envolta i per tant menor la humitat d'equilibri, cosa que alhora afavoreix l'assecament del combustible. La temperatura del combustible depèn de l'hora del dia, de l'angle del sol, del nivell d'insolació, etc.

La humitat relativa afecta sobretot els combustibles de diàmetre petit. Els canvis que es poden produir al llarg d'un dia afecten relativament poc als combustibles de diàmetres grans. Aquests només es veuran afectats per la humitat relativa quan es produeixin períodes llargs sense precipitació.

No obstant, la dependència que presenta la humitat respecte a les condicions ambientals provoca que el contingut d'humitat sigui un paràmetre difícil de determinar degut a la gran variabilitat temporal. Quan un combustible s'exposa a l'aire a una temperatura i humitat determinades, aquest combustible perdre o guanyarà aigua fins que s'estableixin unes condicions d'equilibri, en què s'assoleix una humitat d'equilibri entre la vegetació i l'aire. Les condicions ambientals varien al llarg del dia i per tant l'equilibri a assolir també. Això fa que en general el combustible es trobi en un estat transitori permanent, buscant una situació d'equilibri que va canviant.

La manera com un combustible forestal mort reacciona davant els canvis meteorològics buscant la humitat d'equilibri, depèn de diversos factors: característiques del combustible, posició respecte el sòl i topografia del terreny on es trobi. En funció doncs de tots aquests factors, el temps que tardarà un combustible en assolir la humitat d'equilibri variarà. Això fa que s'hagi definit el concepte de temps de resposta (Fosberg, 1970) a vegades també anomenat temps de retard (en terminologia anglesa *timelag period*).

Temps de resposta

El temps de resposta és el temps que tarda un combustible mort en un ambient a 26,7 °C i una humitat relativa del 20 % (Schroeder and Buck, 1970) en assolir el 63 % de la diferència entre la humitat inicial i la humitat d'equilibri en les condicions ambientals fixades. El temps de resposta és una característica del combustible (que depèn bàsicament de la mida d'aquest) i es pot expressar en minuts, hores o dies.

Alguns autors (Lancaster, 1970; Deeming *et al.*, 1977) han classificat els combustibles en funció del temps de resposta i de la seva mida (Taula 1.2). Aquesta classificació s'ha utilitzat sobretot en la definició dels índex de risc i en els models de propagació d'incendis forestals.

Taula 1.2 Classificació dels combustibles segons la seva mida i el temps de resposta.

Temps de resposta [h]	Diàmetre de branques o troncs [cm]	Altura d'una capa de combustible
1	< 0,6	Superfície
10	0,6 - 2,5	Capa des de la superfície fins una profunditat de 19 cm.
100	2,5 - 7,6	Capa entre 19 cm i 1 m per sota de la superfície
1000	7,6 - 20,3	Capa a més d'1 m per sota la superfície

Humitat dels combustibles forestals vius

Els combustibles forestals vius poden retardar, aturar o contribuir a la propagació del foc en funció del seu contingut d'humitat. Mentre la humitat dels combustibles forestals morts depèn bàsicament de les condicions meteorològiques, en els combustibles vius depèn a més i de forma important del seu cicle vegetatiu, el qual varia d'una espècie a una altra i en totes elles depèn de la variabilitat estacional. La Taula 1.3 presenta valors aproximats de la humitat de combustibles vius en diferents etapes del cicle vegetatiu (Rothermel, 1983).

Taula 1.3 Valors aproximats de la humitat dels combustibles forestals vius segons l'etapa del cicle vegetatiu en què es trobin.

Observació del fullatge i cicle vegetatiu	Humitat [%]
Fullatge tendre, inici del cicle de creixement.	300
Fullatge en maduració, avanç del cicle de creixement.	200
Fullatge madur comparable al fullatge perenne, creixement completat	100
Canvi de coloració de les fulles, inici de la caiguda. Inici del repòs vegetatiu.	50
Completament sec. Es tracta com si fos combustible mort.	< 30

Humitat d'extinció

Ja s'ha anat comentant l'efecte de la humitat sobre la propagació d'un incendi, en termes qualitius. Per a poder quantificar aquest efecte s'utilitza sovint el concepte d'humitat d'extinció (Albini, 1976; Rothermel, 1972; Rothermel, 1983), que es defineix com aquell grau d'humitat a partir del qual un incendi no es podrà propagar. Aquest paràmetre és experimental i depèn del tipus de combustible. Cal remarcar que quan les condicions per a la combustió són molt favorables, la humitat d'extinció té molt poc efecte sobre el comportament de l'incendi (Arnaldos *et al.*, 2004). Aquesta esdevé important únicament quan les condicions per a la combustió són ja de per si pobres.

1.1.5. Inflamabilitat i combustibilitat dels combustibles forestals

La inflamabilitat i la combustibilitat són dues propietats que deriven de les característiques bàsiques dels combustibles forestals que s'han tractat anteriorment. La inflamabilitat és la facilitat amb la que un determinat combustible entrarà en combustió en presència d'una font d'ignició. D'altra banda la combustibilitat és la facilitat que té un combustible per continuar cremant una vegada s'ha inflammat.

Inflamabilitat

La inflamabilitat tal i com s'ha definit no és un paràmetre directament mesurable. Un combustible es diu que és més o menys inflamable en funció de diversos paràmetres mesurables, de manera que individualment ja donen idea de la facilitat que té el combustible d'inflamar-se, però és la combinació de tots ells que permet conèixer-ne clarament la inflamabilitat. Aquests paràmetres són els límits d'inflamabilitat, la temperatura d'inflamació, la temperatura d'autoignició i el grau d'inflamabilitat.

Combustibilitat

Per tal que es produeixi un incendi forestal no només s'ha d'iniciar el foc (i per tant la inflamació del combustible), sinó que també s'ha de propagar a la vegetació circumdant. En diferents formacions vegetals el foc es propaga de diferent manera. La combustibilitat és el paràmetre que s'utilitza per tipificar la propagació del foc dins una estructura de vegetació. La manera de tipificar la combustibilitat en funció de l'estructura de la vegetació és a partir dels models de combustible. L'avantatge que

presenta aquest sistema és que permet una avaluació directa del comportament del foc a partir del coneixement del combustible.

1.1.6. Models de combustible

Cada territori pot presentar grans variacions en el tipus i estructura de la vegetació, això complica enormement la predicció del comportament dels incendis. És per això que s'han definit el que s'anomenen models de combustible.

Els models de combustible permeten dividir el territori en zones que presenten característiques similars quant a tipus i estructura de la vegetació. Cada model està caracteritzat per una sèrie de paràmetres quantitius que l'identifiquen i que li confereixen unes determinades condicions per a la propagació dels incendis.

Els models permeten crear mapes del territori on a cada zona (segons tipus i estructura de la vegetació) se li assigna el model que li correspon, de manera que una vegada iniciat un incendi serveix com a eina per a predir la seva evolució d'acord amb el tipus de propagació assignat a cada model.

La definició d'un model de combustible implica un estudi experimental acurat per associar el comportament del foc a diferents estructures de vegetació. Aquests estudis els solen fer les organitzacions de defensa forestal de cada país. No existeix per tant una única classificació de models de combustible vàlida per a tot el món. Cada país té les seves perquè les ha elaborat o bé perquè les ha adaptat (o copiat) d'un altre país.

Els països que més esforços han dedicat a la definició de models de combustible que s'adaptessin a la seva vegetació són Estat Units, Canadà i Austràlia. La resta de països en general han copiat o adaptat algun d'aquests tres sistemes. La causa més probable és que són aquests mateixos països els que més esforços han dedicat a la formulació de models de propagació dels incendis forestals, els quals necessiten com a entrada els models de combustible. Si aquests no s'adapten bé a la vegetació pròpia de cada territori, el model de propagació tampoc donarà resultats fiables.

A Europa, la tendència més generalitzada ha estat la de copiar els models d'Estat Units establerts per Rothermel (1972), que considera 13 tipus (models) distribuïts en quatre grups: pastures, matollars, fullaraca sota arbrat i restes de tala i altres operacions silvícoles. El criteri principal és determinar la classe de combustible per on avança el front del foc (això vol dir seleccionar un dels quatre grups principals). Els criteris secundaris per acabar de definir el model de combustible es basen en l'estructura de la vegetació, la inflamabilitat de les espècies principals, la quantitat de combustible acumulat, el seu grau de compactació i humitat, etc. Normalment la identificació dels models de combustible es fa mitjançant una clau fotogràfica.

A l'estat espanyol, ICONA ha desenvolupat una clau fotogràfica per a la clara identificació d'aquests models. En la seva realització es diferenciaren grans zones relativament homogènies forestalment, i després se seleccionaren les fotografies més representatives de cada model dintre de cada zona. A Vélez (2000) es descriuen i recullen aquests models. A continuació, es presenten les característiques de dos d'aquests grups, les pastures i els matollars, ja que apareixeran més endavant al llarg d'aquesta tesi. D'altra banda cal destacar que és precisament en pastures i matollars on s'inicien la major part dels incendis. A més pel què fa a incendis de superfície, és en aquests models que el foc avança amb més rapidesa.

Models de pastures

El grup de pastures inclou 3 models de combustible (Taula 1.4). Els models del grup de pastures es troben bàsicament constituïts exclusivament per combustibles ràpids d'1 hora. Tot el combustible present pot classificar-se com a disponible per a humitats inferiors a la d'extinció. La relació superfície - volum és alta i la compacitat moderada. El model 1 i 2 són els més típics de la conca mediterrània. En el model 2 la presència de plantes llenyoses vives redueix la velocitat d'avanç del foc per la seva major humitat i frena l'acció del vent al augmentar la rugositat de la superfície del sòl.

Taula 1.4 Models del grup de pastures.

Model 1	Pastura fina seca i baixa que recobreix completament el sòl. Menys d'un terç de recobriment de plantes llenyoses.
Model 2	Pastura fina seca i baixa que cobreix completament el sòl. Entre un terç i dos terços de recobriment de plantes llenyoses.
Model 3	Pastura densa seca i alta. Aproximadament un terç del material és sec o mort. Els camps de conreu són un bon exemple d'aquest model.

La Taula 1.5 presenta les principals característiques dels 3 models de combustible del grup de pastures.

Taula 1.5 Models de combustible del grup de pastures (Vélez, 2000).

PASTURES	Càrrega combustible [t·ha ⁻¹]					Altura [m]	Calor de combustió [KJ·kg ⁻¹]
	1 h	10 h	100 h	Viu	Total		
Model 1 <i>Pastura fina seca i baixa</i>	1,6	-	-	-	1,6	0,3	18840
Model 2 <i>Pastura fina seca i baixa</i>	4,5	2,2	1,1	1,1	8,9	0,3	18840
Model 3 <i>Pastura densa seca i alta</i>	6,7	-	-	-	6,7	0,75	20515

Models de matollar

El grup de matollar inclou 4 models de combustible (Taula 1.6). Aquests models poden sustentar incendis d'un ampli ventall d'intensitats i velocitats de propagació; i el foc acostuma a propagar-se pel combustible de superfície tant viu com mort.

Taula 1.6 Models del grup de matollars.

Model 4	Matollar o plantació jove molt densa amb més de 2 m d'alçada i branques seques a dins. La propagació del foc és per les capçades.
Model 5	Matollar dens i verd amb menys d'1 m d'alçada. La propagació és per la fullaraca i la pastura.
Model 6	Semblant a l'anterior però amb espècies més inflamables o restes de tala i plantes de major alçada. Amb vent moderat el foc es propaga pel matollar i amb poc vent el foc pot anar arran de terra.
Model 7	Matollar d'espècies molt inflamables. El foc es propaga pel matollar i fullaraca per igual. La propagació es deu més a la inflamabilitat que al possible contingut d'humitat.

La Taula 1.7 recull les principals característiques quant a càrrega de combustible, altura i calor de combustió dels 4 models de combustible del grup matollars.

Taula 1.7 Models de combustible del grup de matollars (Vélez, 2000)

MATOLLARS	Càrrega combustible [t·ha ⁻¹]					Altura [m]	Calor de combustió [KJ·kg ⁻¹]
	1 h	10 h	100 h	Viu	Total		
Model 4 <i>Matollar o plantació jove molt densa</i>	11,2	9,0	4,5	11,2	35,9	2,00	21770
Model 5 <i>Matollar dens i verd</i>	2,2	1,1	-	4,5	7,8	0,60	21770
Model 6 <i>Igual que el model 5 però amb espècies més inflamables</i>	3,4	5,6	4,5	-	13,5	0,75	20515
Model 7 <i>Matollar d'espècies molt inflamables</i>	2,5	4,2	3,4	0,83	10,9	0,75	20935

1.1.7. Característiques dels incendis forestals

Els incendis forestals presenten un seguit de característiques físiques i geomètriques que permeten descriure i entendre el seu comportament. L'estudi d'aquests paràmetres aporta un coneixement essencial pel desenvolupament de les tasques d'extinció i prevenció d'incendis.

Característiques físiques

Les característiques físiques amb les que es pot descriure un front de flama són diverses i cadascuna d'elles aporta certa informació valuosa per a predir-ne el seu comportament. La intensitat lineal, la

velocitat de propagació i el temps de residència són les més importants, tot i que també es farà esment en aquest punt a la velocitat de combustió i a la distribució de temperatures al front de foc.

Intensitat lineal i velocitat de propagació del front de foc

La intensitat lineal es defineix com la quantitat de calor que s'allibera en el front per unitat de temps i de longitud, és a dir, la potencia calorífica total per metre de llargada del front. Degut a les relacions d'aquest terme amb els paràmetres visibles de la flama, és la forma més comuna de mesurar la intensitat d'un incendi.

La velocitat de propagació d'un incendi es refereix a l'espai recorregut pel front de foc per unitat de temps. De la mateixa manera que el concepte d'intensitat lineal, s'aplica per qualsevol segment del perímetre de l'incendi. La velocitat està relacionada directament amb el vent i el pendent; implica, per tant, un comportament variable.

Temps de residència del front de flama

Una altra característica física d'especial rellevància és el que es coneix com temps de residència del front de flama. Es defineix com el període de temps en el que un front de foc roman en un punt concret, i, per tant, determina la velocitat de l'esmentat front. És un paràmetre difícil de mesurar, ja que el combustible que crema és continu en l'espai i dificulta el càlcul del temps en què la flama es troba actuant en un punt fix.

Segons Burrows (1995) el temps de residència és directament proporcional a factors com el grau de compactació del llit de combustible, i també al grau d'humitat. McArthur (1967) suggereixen que quan més gran és la velocitat del vent, menor és el temps de residència de la flama.

Velocitat de combustió

La velocitat de combustió es defineix com la quantitat de combustible que crema per unitat de temps i està relacionada amb la velocitat d'alliberació d'energia. Alguns autors utilitzen el terme velocitat de pèrdua de massa per referir-se a aquest paràmetre.

Temperatura del front de flama i el plomall

La temperatura del front de flames és funció del tipus de combustible, de la seva mida, de la seva distribució espacial, del seu contingut hídric i de la velocitat del vent. Aquest és un dels paràmetres més difícils de mesurar en grans incendis. La seva dificultat rau en què en un incendi forestal la temperatura fluctua permanentment en l'espai i en el temps. Per exemple, Trabaud (1992) va mesurar la temperatura a diferents altures en un incendi de garrigues de 1,5 m d'altura, de manera que mesurà valors de 280°C a 3 m d'altura, 100°C a 6 m d'altura i de 1000°C a nivell de la vegetació.

Característiques geomètriques

Les característiques geomètriques dels incendis forestals es poden descriure a dos nivells diferents, seguint el desenvolupament de tot el perímetre o atenent únicament el front del foc.

La morfologia que presenten els incendis forestals no és en general regular, ja que la seva progressió ve marcada per un gran nombre de factors, tractats de forma més àmplia en el següent apartat, tals com les condicions meteorològiques (direcció i velocitat del vent, temperatura i humitat atmosfèriques), topogràfiques (pendent, orientació) i ecològiques (disposició i espècies vegetals). De tota manera, existeixen certs patrons morfològics que permeten identificar de manera orientativa, atenent a les condicions esmentades, la forma amb la que evolucionarà l'incendi.

Els incendis que es produeixen en terreny pla, amb combustibles homogenis i sense vent presenten una forma circular. Els incendis amb vent, combustibles homogenis i que es propaguen sobre terreny pla o pendent regular tenen formes el·líptiques. I aquells incendis que es propaguen sota la influència de vents variables i/o combustibles heterogenis i/o pendents irregulars presenten una forma totalment irregular.

En qualsevol d'aquests patrons morfològics el perímetre de l'incendi pot ser dividit en diferents segments. La identificació d'aquestes parts i l'estudi del comportament individual de cadascuna d'elles facilita l'anàlisi completa de l'incendi. Tot seguit es descriuen els elements més representatius que poden configurar el contorn d'un incendi:

- *Front de l'incendi:* Part del perímetre de l'incendi que avança a major velocitat amb un gran desprendiment de calor. El seu avanç ve determinat fonamentalment per la topografia del terreny o pel vent.
- *Cua de l'incendi:* Zona de l'incendi oposada al front i més propera al focus d'origen del foc. De tot el perímetre, és la part que es propaga més lentament.
- *Flancs de l'incendi:* Parts del perímetre de l'incendi situats entre la cua i el front. En general, es troben paral·lelament a dreta i esquerra de la direcció principal de propagació de l'incendi.
- *Focus secundaris:* Incendis que es produeixen fora del perímetre principal, a causa d'una emissió des d'aquest de partícules combustibles incandescentes.

Pel què fa a les característiques geomètriques que defineixen el front de l'incendi són l'altura, longitud i gruix de flama, així com la inclinació d'aquesta. Les característiques geomètriques del front de flames són uns indicadors molt valuosos a l'hora d'estudiar el comportament d'un incendi forestal. No únicament són un clar reflex de com està progressant l'incendi, sinó que proporcionen dades

indispensables per al càlcul de la radiació emesa pel front. Degut a la seva importància, les característiques geomètriques de les flames han estat àmpliament estudiades i són nombroses les correlacions per determinar-les. Malauradament no existeixen encara expressions definitives per a descriure totes aquestes característiques de forma unívoca, tal i com ja apuntaren Anderson *et al.* (2006), com es pot observar en les següents figures (Figura 1.3 i Figura 1.4).

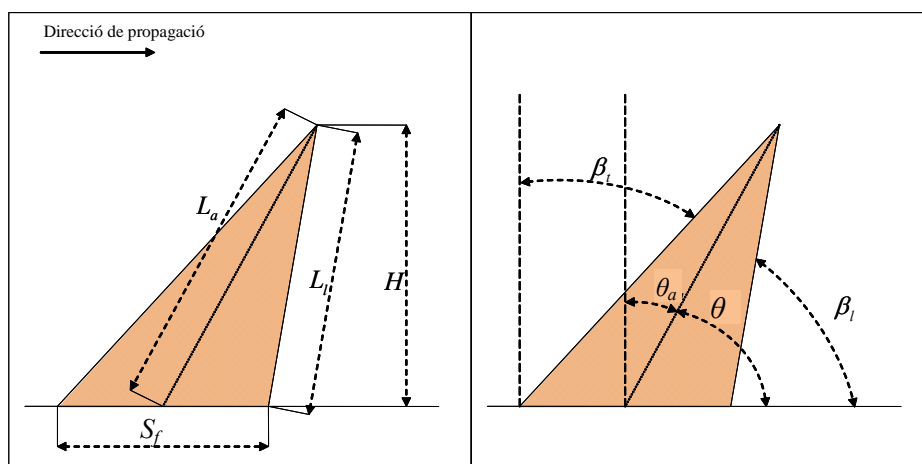


Figura 1.3 Descriptors de la geometria de flama (Anderson *et al.*, 2006).

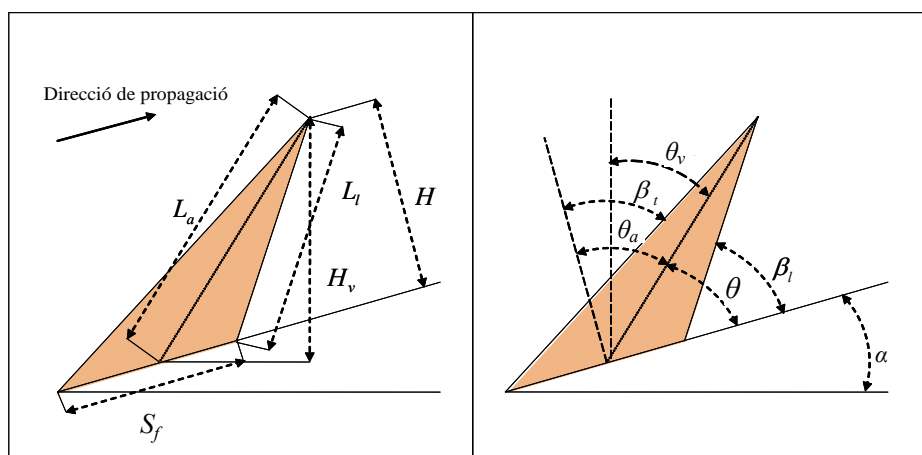


Figura 1.4 Descriptors de la geometria de flama en focs avançant pendent amunt (Anderson *et al.*, 2006).

De totes les possibles definicions que poden tenir els diferents descriptors geomètrics de la flama, Anderson *et al.* (2006) suggereixen unificar el criteri a l'hora de determinar aquests paràmetres de manera que proposen utilitzar, d'acord a la notació de la Figura 1.3 i la Figura 1.4, per a determinar l'altura de flama el valor H , per a la longitud de flama L_f , per al gruix de la flama S_f i per últim per a la

inclinació de flama β_l , ja que consideren que aquests definicions són les que tenen un significat físic més complet.

Altura de flama, H

Es defineix com l'extensió vertical màxima de les flames del front de l'incendi, mesurada des de la superfície del terreny fins a la punta de la flama. Aquest és un dels paràmetres geomètrics més comuns per a descriure el comportament i la progressió d'un incendi forestal. Està directament relacionada amb la velocitat de propagació de l'incendi, amb la quantitat de combustible i amb la velocitat del vent. L'altura de les flames es veu reduïda significativament amb l'increment de la velocitat del vent i per altra banda creix notòriament amb l'augment de la massa de combustible.

Longitud de flama, L_l

Es defineix com la longitud màxima de la vora de la flama més propera al combustible no cremat. És un paràmetre que pot proporcionar una ràpida estimació de la intensitat de l'incendi i, en conseqüència, ser un indicador en les tasques d'extinció (Rothermel, 1983) i dels efectes en la flora i en la fauna.

Gruix de flama, S_f

És la zona dins la qual es produeix una combustió amb flama de forma continuada. Representa una variable que complementa la caracterització de la flama i que pot aportar informació important en el procés de modelització. Està directament relacionat amb la velocitat de propagació de l'incendi, amb el temps de residència, amb la quantitat de combustible disponible i amb el seu contingut d'humitat.

Angle d'inclinació de flama, β_l

Es defineix com l'angle format entre la superfície del terreny i la flama del front de l'incendi, prenent com a referència la superfície del terreny. Està directament relacionat amb el pendent del terreny i la presència de vent. Diversos investigadors han estudiat aquest paràmetre arribant a conclusions diferents. Per exemple Taylor (1961) i posteriorment Albini (1986) van aplicar les teories de la flotació i empena de fluids gasosos als fums que conformen la columna de convecció, obtenint una expressió semiempírica que es fonamenta en què la inclinació de la flama és deguda principalment a la flotabilitat i empena que tenen els fums de la combustió. Més tard, Nelson i Adkins (1986) varen trobar, en experiments realitzats en túnels de vent, una altra expressió de l'angle de la flama, el qual es relaciona amb la intensitat lineal del front de l'incendi i no es considera la teoria de flotabilitat desenvolupada per Taylor i Albini.

1.1.8. Factors que influeixen en el comportament dels incendis forestals

Els factors que determinen el comportament d'un incendi forestal venen determinats per un extens nombre de variables i per les complexes interaccions que es donen entre elles. 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 una petita part 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 així com les relacions entre elements d'un mateix grup i entre grups diferents.

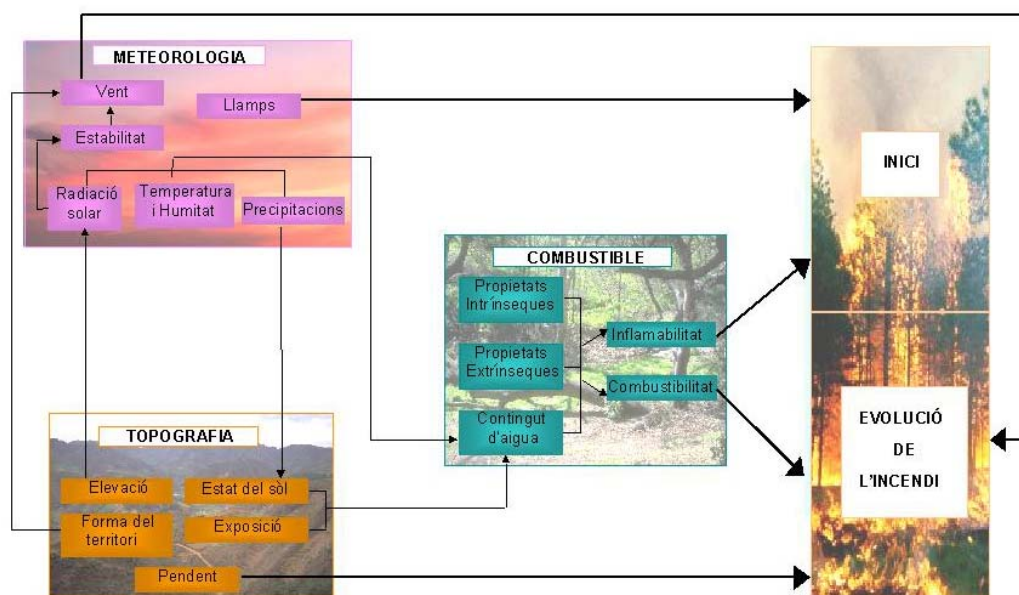


Figura 1.5 Representació esquemàtica de la influència de la meteorologia, la topografia i el combustible en l'inici i l'evolució d'un incendi forestal.

Factors meteorològics

El clima i les condicions meteorològiques són factors que condicionen la ignició i el desenvolupament d'un incendi forestal. Afecten bàsicament de dues formes, d'una banda determinen la duresa i durada de les estacions més seques i caloroses en una àrea geogràfica determinada, i per altra banda, al llarg del temps, condicionen el tipus i quantitat de combustible present en una zona.

Els principals factors a tenir en compte en l'estudi dels incendis forestals són la temperatura de l'aire, la humitat de l'aire, la radiació solar –tots ells relacionats directament amb la humitat del combustible i la possibilitat d'ignició, per tant amb el nivell de risc (Viegas, 1998)– i el vent i l'estabilitat atmosfèrica que influeixen de manera determinant en la propagació.

Temperatura de l'aire i radiació solar

La temperatura de l'aire ve determinada per diversos factors atmosfèrics, però la principal font de calor es deu a la reflexió de la radiació solar en la superfície del sòl. La seva influència en els incendis forestals es relaciona directament amb la inflamabilitat dels combustibles; el temps requerit per a que

aquests entren en ignició depèn directament de la seva temperatura inicial i de la de l'aire que els envolta. Alhora, la temperatura de l'aire interacciona amb altres factors meteorològics que influeixen en el comportament del foc.

Humitat relativa

La humitat de l'aire influeix de forma significativa en la ignició i propagació dels incendis, degut a la seva estreta relació amb el contingut d'aigua dels combustibles forestals. D'altra banda, la quantitat de vapor d'aigua en l'aire repercuteix en la quantitat d'oxigen de la barreja de gasos. Així, com major sigui la humitat, hi haurà menys comburent disponible per tal de dur a terme la combustió.

Els valors d'aquest paràmetre depenen essencialment del moment del dia i de l'estació, a banda de la vegetació i de l'orientació del territori.

El vent

El moviment de les masses d'aire és un factor meteorològic de característiques molt variables, que influeix de forma destacada i principal en la propagació dels incendis forestals. El vent, resultat d'aquest moviment, es descriu mitjançant la seva velocitat i direcció, atenent la intensitat amb la que bufa i la procedència.

El coneixement de la tipologia i l'origen del vent és crucial per a l'anàlisi del risc d'ocurrència d'incendis forestals, no obstant això, no és suficient per a l'estudi del comportament del front de foc. És necessari comprendre de quina manera el vent afecta la dinàmica de l'incendi pel que fa a la reacció de combustió, als mecanismes de transferència de calor i al transport de gasos i partícules incandescentes.

Un dels efectes més directes i intuïtius del vent en els incendis forestals és la inclinació i l'allargament de les flames. Amb aquesta nova geometria, la transferència de calor per radiació en el front s'incrementa. D'altra banda, en aquesta situació, el combustible no cremat també s'escalfa per convecció i òbviament per conducció, degut al contacte directe amb la flama. A més, la presència de vent en un incendi forestal garanteix l'aportació suficient d'oxigen per a una reacció de combustió eficient i afavoreix la dessecació del combustible que encara no ha cremat, anticipant el moment de la ignició. Tot això deriva directament en un augment de la velocitat de propagació del front de l'incendi (Viegas, 1998).

A part de l'efecte en la velocitat de propagació, altres aspectes dels incendis forestals són clarament resultat de la influència del vent, com la morfologia del perímetre de l'incendi, o la formació de focus secundaris degut al transport de material incandescent en l'interior de la columna de convecció.

Estabilitat atmosfèrica

L'estabilitat atmosfèrica és una mesura del grau de la turbulència (mecànica i tèrmica) present a les capes baixes de l'atmosfera. Es defineixen tres classes d'estabilitat atmosfèrica –estable, inestable i neutra– en funció de la variació tèrmica.

L'estabilitat atmosfèrica és de gran importància en el comportament dels incendis forestals. En situacions d'inestabilitat atmosfèrica el fum s'eleva a gran altura i es produeixen vents que poden arribar a ser molt turbulents, la qual cosa provoca un increment en la intensitat del front a banda d'un comportament erràtic de l'incendi.

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 com per la seva connexió amb d'altres factors, com són la meteorologia i la vegetació. Afecta directament a l'actuació dels diferents mecanismes de transferència de calor i també a la reacció de combustió. En comparació amb els factors meteorològics i climatològics, els topogràfics són els més constants i en conseqüència, la seva influència en l'incendi és més fàcil de preveure. Els diferents elements topogràfics que afecten al comportament de l'incendi són el pendent, l'exposició o orientació de les vessants, la configuració o relleu i l'elevació del territori pel qual transcorre l'incendi.

El pendent

El factor topogràfic amb un efecte més destacat és el pendent. Igual que el vent, el pendent provoca una inclinació i un allargament de les flames que es tradueix en un increment de la velocitat de propagació. La diferència principal rau en la magnitud del efecte, menor en el cas del pendent.

L'exposició

L'exposició es refereix a l'orientació o posició de les vessants. Aquest factor incideix en el comportament de l'incendi degut a la seva combinació amb els factors meteorològics i conseqüentment sobre l'estat del combustible.

La configuració o relleu

La configuració o relleu que presenta un territori té gran importància per la gran influència en els règims de vent, que a la seva vegada influeixen de manera determinant en la direcció i velocitat de propagació de l'incendi.

Elevació

L'elevació sobre el nivell del mar no és un factor determinant, tot i que s'ha de tenir en compte pels seus efectes sobre el clima local. L'elevació influeix en la temperatura de l'aire, la humitat relativa, i el perfil de velocitats del vent. És per tot això que condiciona l'estat del combustible i la seva quantitat, i per tant, de manera indirecta, el comportament de l'incendi.

Combustibles forestals

Les característiques dels combustibles forestals així com els efectes en l'inici i desenvolupament dels incendis forestals ja han estat comentats en apartats anteriors, tot i així, és obligada la referència en aquest punt degut a la seva estreta relació amb les altres dues categories.

La següent taula (Taula 1.8) resumeix els principals efectes de cadascun dels paràmetres estudiats en aquest apartat.

Taula 1.8 Influència dels principals factors meteorològics, topogràfics i propietats del combustible en els incendis forestals

Factors meteorològics	Influència en els incendis forestals
Radiació solar i temperatura de l'aire	Inflamabilitat dels combustibles
Humitat de l'aire	Ignició i propagació
Estabilitat atmosfèrica	Intensitat del front i comportament del foc
Vent	Propagació dels incendis: <ul style="list-style-type: none"> • Reacció de combustió • Mecanismes de transferència de calor • Transport de gasos i partícules incandescentes Morfologia de l'incendi <ul style="list-style-type: none"> • Forma del perímetre • Inclinatori i allargament de les flames • Direcció i velocitat de propagació Formació de focus secundaris
Factors topogràfics	Influència en els incendis forestals
Pendent	Actua de la mateixa manera que el vent però la magnitud de l'efecte és menor
Orientació de les vessants	Comportament de l'incendi
Configuració o relleu	Direcció i velocitat de propagació
Elevació	Estat i quantitat de combustible, per tant de manera indirecta en el comportament de l'incendi
Propietats dels combustibles forestals	Influència en els incendis forestals
Intrínseques	Reacció de combustió
Extrínseques	Comportament del foc sobretot pel què fa a la seva evolució sobre el territori
Contingut d'aigua del combustible	Procés d'ignició i propagació de l'incendi
Inflamabilitat	Procés d'ignició
Combustibilitat	Propagació de l'incendi

1.2. Principis de l'anàlisi dimensional

L'anàlisi dimensional és una tècnica lògica que permet reduir el nombre de variables que intervenen en la resolució d'un problema, a partir de l'obtenció d'un conjunt de grups no dimensionals. Tot i això, l'anàlisi dimensional per sí mateix no és capaç de proporcionar informació sobre els mecanismes fonamentals que regeixen el fenomen d'estudi. No obstant, sí que permet trobar una solució parcial de forma relativament senzilla, i és que la generalitat d'aquesta tècnica és alhora el seu punt fort i feble.

En aquest apartat es presenten de forma resumida els principals conceptes relacionats amb l'anàlisi dimensional necessaris per a comprendre la base d'aquesta tècnica. Tanmateix, per a un coneixement més específic sobre aquesta teoria es recomana al lector consultar alguna de les següents referències bibliogràfiques: Langhaar (1951), Taylor (1974) o Bridgman (1978).

1.2.1. Magnituds, unitats, dimensions i homogeneïtat dimensional

S'entén per *magnitud* tota propietat o qualitat física que és susceptible de ser mesurada. El patró amb què es pot comparar una magnitud objectivament i quantitativament, tot associant-li un valor, és la *unitat* a emprar per aquella magnitud.

A banda, a cada magnitud física se li assigna una *dimensió*. D'aquesta manera la dimensió d'una magnitud ve expressada per un nombre i una unitat segons un determinat sistema d'unitats (conjunt consistent d'unitats de mesura en el qual cap magnitud té més d'una unitat associada). Tot i que existeixen diversos sistemes d'unitats, el més utilitzat arreu és l'anomenat Sistema Internacional d'Unitats (*SI*). La Taula 1.9 presenta algunes de les magnituds fonamentals, dimensions i unitats corresponents d'aquest sistema de mesura. Es considera que una magnitud és *fonamental* quan es pot definir sense l'ajut d'altres magnituds o altrament, no es pot descompondre en altres magnituds. En contraposició a les magnituds fonamentals es troben les *magnituds derivades*.

Taula 1.9 Magnituds fonamentals del *SI*, amb les corresponents dimensions i unitats

Magnituds fonamentals	Dimensió	Unitat
Longitud	L	[m]
Massa	M	[kg]
Temps	T	[s]
Temperatura	θ	[K]

Les tres primeres magnituds de la taula anterior –longitud, massa i temps– permeten definir totes les magnituds mecàniques, mentre que la temperatura permet definir magnituds en els camps de la calorimetria i la termodinàmica.

Les dimensions associades al conjunt mínim de variables fonamentals que poden reproduir totes les existents rep el nom de *base dimensional*. Per exemple, en l'àrea de la mecànica una base dimensional podria ser l'anomenada *LMT*, mentre que en altres àrees seria necessari afegir la temperatura i per tant la base estaria formada per quatre dimensions, *LMT θ* .

D'aquests conceptes en deriven els següents postulats, en què es basa la teoria de l'anàlisi dimensional:

- a) Les lleis físiques s'expressen mitjançant relacions matemàtiques –equacions– entre magnituds. Aquestes lleis es poden formular com a relacions de proporcionalitat entre potències de les magnituds que hi intervenen.
- b) El principi d'homogeneïtat dimensional determina que qualsevol equació que descriu per complet un fenomen físic ha de ser dimensionalment homogènia, és a dir, tots els termes additius dels seus membres han de tenir les mateixes dimensions. D'aquesta manera, una equació dimensionalment homogènia no depèn de les unitats fonamentals de mesura.

Així, l'anàlisi dimensional permet deduir informació d'un fenomen sota la premissa de que tot fenomen pot ésser descrit per una equació dimensionalment homogènia entre el conjunt mínim de variables que el caracteritzen.

1.2.2. Mètodes d'aplicació de l'anàlisi dimensional

Existeixen tres mètodes pels quals es pot aplicar l'anàlisi dimensional i per tant obtenir el conjunt de grups no dimensionals, el mètode de Rayleigh, l'aplicació del teorema de *Vaschy-Buckingham* o teorema de π , i la normalització de les equacions que regeixen el fenomen. D'aquests tres mètodes, el de Rayleigh i el de *Vaschy-Buckingham* són algebraics.

Atès que en el desenvolupament d'aquest treball s'ha emprat el mètode derivat de l'aplicació del teorema de *Vaschy-Buckingham* o teorema de π , en el següent apartat s'explica de forma més detallada aquest teorema i la seva aplicació davant d'un problema. No obstant, a continuació es fa una breu descripció de cadascun dels altres dos mètodes. Més endavant, en capítols posteriors, s'explicarà el perquè es va utilitzar aquest mètode i no els altres.

Mètode de Rayleigh

D'acord al mètode de Rayleigh, una llei física $f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$, on q_1, q_2, \dots, q_n són magnituds dimensionals, es pot expressar de la següent forma, $q_1 = \mathbb{C} \cdot q_2^a q_3^b \dots q_n^i$, on q_1 coincideix generalment amb la magnitud de major interès i \mathbb{C} és un factor adimensional, habitualment relacionat amb la geometria del sistema. Plantejant les equacions d'homogeneïtat per cadascuna de les dimensions i resolent el sistema indeterminat que s'obté, s'arriba a una relació tipus $\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \dots)$.

Mètode de normalització d'equacions

Aquest mètode consisteix bàsicament en la transformació de les equacions que estableixen les relacions entre variacions temporals i variacions espacials de les magnituds que intervenen en un fenomen fins a obtenir-ne una forma no dimensional, i en la determinació a partir d'aquesta forma no dimensional dels coeficients que afecten els diferents termes. Aquests coeficients esdevenen directament els grups no dimensionals corresponents als fenòmens físics regits per les equacions inicials.

1.2.3. El teorema de Vaschy-Buckingham o teorema de π

El teorema de *Vaschy-Buckingham* o teorema de π estableix el següent:

1. Sigui la llei física $f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$, on q_1, q_2, \dots, q_n són magnituds dimensionals.
2. Sigui $D_1, D_2, \dots, D_m, m < n$, dimensions bàsiques i

$$[q_i] = D_1^{a_{1i}} D_2^{a_{2i}} \dots D_m^{a_{mi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

3. Si

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

és una matriu $m \times n$ de rang r ,

Llavors,

- a) Existeixen $n-r$ quantitats adimensionals $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}$ independents que poden formar-se amb les magnituds q_1, q_2, \dots, q_n mitjançant expressions de la forma $\Pi_p = q_1^{kp_1} q_2^{kp_2} \dots q_n^{kp_n}$ on k_{pj} són nombres racionals i $p=1, \dots, n-r$.
- b) La llei física $f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$ és equivalent a $F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}) = 0$.

Essencialment doncs, aquest teorema expressa que és possible descriure un fenomen amb una quantitat de paràmetres no dimensionals ($\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}$) que és menor que la quantitat de paràmetres dimensionals involucrats (q_1, q_2, \dots, q_n). Atès que no és objecte d'aquesta tesi entrar més en detall en els fonaments matemàtics del teorema de π , es recomana al lector interessat en la demostració d'aquest teorema consultar el capítol 4 d'Arenas i Herranz (1989).

La metodologia d'aplicació pràctica d'aquest teorema per a la resolució d'un problema i la consegüent obtenció dels grups Π_i , consta dels següents passos, detallats a la Taula 1.10.

Taula 1.10 Passos per a l'aplicació del teorema de *Vaschy-Buckingham* o teorema de π .

Pas 1.	Llistar totes les variables implicades en el fenomen d'estudi.
Pas 2.	Seleccionar un conjunt de dimensions fonamentals per obtenir la base dimensional.
Pas 3.	Fer una relació de les dimensions de totes les variables en termes de les dimensions fonamentals seleccionades, i obtenir així l'anomenada matriu dimensional.
Pas 4.	Escollir d'entre totes les variables de la llista inicial un conjunt de variables format per un nombre igual al número de dimensions primàries, r .
Pas 5.	Establir les equacions dimensionals combinant les variables seleccionades en el pas anterior amb cadascuna de les altres variables. Lògicament s'obtidran $n-m$ equacions.
Pas 6.	Resoldre les equacions per a formar els grups no dimensionals.

El primer i segon pas de tots els anteriors, la determinació dels paràmetres essencials implicats en el fenomen d'estudi i l'elecció de la base dimensional, són certament els més difícils alhora que importants al fer front a un problema mitjançant l'anàlisi dimensional. A continuació s'entra més en detall en aspectes concrets de la metodologia pas a pas.

Pas 1. Llistar totes les variables implicades en el fenomen d'estudi

Tal i com ja s'ha esmentat, la selecció de les variables més rellevants per descriure un fenomen és una tasca complexa. Aquesta dificultat sorgeix com a conseqüència que la rellevància d'una variable és sovint una valoració subjectiva que depèn del coneixement que es té de la interacció dels diferents processos físics implicats en el fenomen d'estudi. Només si s'utilitzen totes les variables rellevants, la homogeneïtat dimensional té una significació completa en el context de l'anàlisi dimensional. L'omissió d'una o més d'aquestes variables condueix a resultats que es desvien de la solució analítica del problema. Per contra, la inclusió de variables de rellevància marginal no afecta a la validesa dels resultats analítics, però introdueix complexitats innecessàries.

Pas 2. Determinar la base dimensional

La base dimensional es selecciona d'acord a les magnituds fonamentals que intervenen en el fenomen d'estudi (base estricta). No obstant, poden haver-hi casos en què no sigui necessari considerar tota la base sinó que una *base reduïda* sigui suficient. Per contra, en alguns casos la consideració d'una *base ampliada* permet reduir el nombre de grups no dimensionals independents, de manera que en alguns casos la discriminació de les dimensions espacials $-L_x, L_y$ i L_z- pot proporcionar resultats interessants.

La utilització d'una base ampliada condueix al mateix resultat que s'obtidria amb una base dimensional estricta, pel què no hi ha cap inconvenient en utilitzar-la. En canvi, l'ús d'una base reduïda proporcionarà en general menys informació que si s'empra una base estricta. A Arenas i Herranz (1989) es pot trobar una discussió molt més extensa sobre les bases dimensionals més adequades segons el tipus de problema a estudiar.

Pas 3. Obtenir la matriu dimensional

Aquest pas consisteix en fer una relació de les dimensions de totes les variables en funció de les dimensions fonamentals seleccionades, i expressar-ho en forma matricial. D'acord a la notació utilitzada al enunciar el teorema de π la matriu dimensional es correspon amb la matriu A , on cada columna correspon als coeficients exponencials de les dimensions d'una variable, tal i com s'observa en les expressions que segueixen:

$$[q_i] = D_1^{a_{1i}} D_2^{a_{2i}} \dots D_m^{a_{mi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\begin{array}{rcc} & q_1 & \dots & q_n \\ & \downarrow & & \downarrow \\ D_1 & \rightarrow & \left[\begin{array}{ccc} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \cdot \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{array} \right] \\ D_2 & \rightarrow & \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ D_m & \rightarrow & \end{array}$$

Pas 4. Seleccionar les variables fonamentals

Les variables fonamentals seran aquelles a partir de les quals s'expressaran els grups no dimensionals. S'han de seleccionar tantes variables fonamentals com nombre de dimensions independents. A més, les variables fonamentals han d'incloure totes les dimensions i ser linealment independents entre ells.

No existeixen uns criteris estandarditzats a l'hora de seleccionar aquestes variables, no obstant, sovint s'escullen les variables que tenen expressions dimensionals més senzilles i es solen excloure aquelles variables que es vol aïllar i/o analitzar.

Pas 5. Formular les equacions dimensionals

Per a cada grup no dimensional, format per la combinació d'una variable amb les variables fonamentals, es formularan tantes equacions com dimensions tingui la base dimensional tal i com es pot observar en la següent expressió, on f fa referència a les variables fonamentals seleccionades.

$$\begin{array}{r} D_1 : b_{1i} + \sum_{f=1}^m b_{1f} \\ \Pi_p \rightarrow \cdot \quad \quad \quad \cdot \\ \cdot \quad \quad \quad \cdot \\ \cdot \quad \quad \quad \cdot \\ D_m : b_{mi} + \sum_{f=1}^m b_{mf} \end{array}$$

En total s'obtindran $n-m$ equacions.

Pas 6. Formar grups no dimensionals

A l'hora de formar els grups no dimensionals, cal tenir en compte que sempre que apareguin dues variables amb les mateixes dimensions, el seu quocient esdevindrà directament un grup no dimensional. Aquest tipus de grups s'anomenen *factors de forma*.

D'altra banda, en funció de les variables seleccionades en el pas 4 s'obtinran nombres no dimensionals que presentaran diferents formes pel què fa a la combinació de variables. Tanmateix, els productes obtinguts es poden agrupar i/o combinar per a substituir un determinat grup per un altre que tingui una formulació amb un significat físic més evident. Tot això, sempre i quan el nou grup, derivat de les diferents transformacions, sigui linealment independent de la resta. El fet de trobar un significat físic als diferents grups no dimensional és un altre dels aspectes més complexos d'aquest tipus d'anàlisi.

En relació a l'aplicació d'aquesta tècnica, Arenas i Herranz (1989) afirmen que els analistes concorden en el fet que no existeix cap norma per a plantejar correctament un problema qualsevol mitjançant l'anàlisi dimensional. No obstant, aquests autors suggereixen certes regles generals:

- Necessàriament el fenomen d'estudi ha de pertànyer a alguna de les teories físiques establertes, ja que és l'anàlisi dimensional que es troba subordinat a les teories físiques i no al revés.
- Cal considerar totes les constants específiques i universals que puguin arribar a formar part de les lleis fonamentals que regeixen el fenomen d'estudi.
- Les variables geomètriques característiques queden determinades per les peculiaritats de cada sistema.

1.2.4. Nombres no dimensionals freqüents

La tècnica de l'anàlisi dimensional ha estat extensament utilitzada en diferents àmbits científics i tecnològics per a estudiar fenòmens de naturalesa molt diversa. Dels diversos treballs realitzats han sorgit diversos nombres no dimensionals, alguns dels quals han resultat tenir un marcat significat físic de manera que són fonamentals per a caracteritzar determinades propietats d'alguns sistemes. La Taula 1.11 recull una relació de nombres no dimensionals que s'utilitzen sovint en la resolució de problemes en les àrees de la transferència de calor i de la dinàmica de fluids, que són àrees estretament lligades a l'estudi del comportament dels incendis.

Taula 1.11 Relació de nombres no dimensionals.

Símbol	Nom	Equació (*)	Significat físic
Re	Reynolds	$\frac{u \cdot L \cdot \rho}{\mu}$	Relació entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses o de fregament.
Fr	Froude	$\frac{u}{\sqrt{g \cdot L}}$	Relació entre les forces d'inèrcia i les forces de gravetat que actuen en un fluid.
Gr	Grashof	$\frac{L^2 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2}$	Relació entre les forces d'empenta per convecció natural i les forces viscoses o de fregament.
Pr	Prandtl	$\frac{C_p \cdot \mu}{k}$	Relació entre la difusió viscosa i la difusió tèrmica.
Nu	Nusselt	$\frac{h \cdot L}{k}$	Relació entre la transferència de calor per convecció i per conducció.
St	Stanton	$\frac{h}{\rho \cdot C_p \cdot u}$	Relació entre la transferència de calor per convecció i la capacitat calorífica total. $St = Nu / (Re \cdot Pr)$
Ar	Arquimedes	$\frac{(\rho - \rho_p) \cdot \rho \cdot g \cdot d_p^3}{\mu^2}$	Relació entre les forces de flotació i les forces de fregament.
Da_{III}	Damköhler III	$\frac{(-\Delta H) \cdot r_A \cdot L^2}{\rho \cdot C_p \cdot u \cdot \Delta T}$	Relació entre la calor de reacció i la transferència de calor per convecció.
Th, Bo	Thring, Boltzmann	$\frac{\rho \cdot C_p \cdot u}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot T^2}$	Relació entre la transferència de calor per convecció i per radiació.

(*) L : Longitud característica del sistema, u : Velocitat, ρ : Densitat, μ : Viscositat, g : Acceleració de la gravetat, β : Coeficient de dilatació tèrmica, ΔT : Increment de temperatura, C_p : Capacitat calorífica, k : Conductivitat tèrmica, h : Coeficient de transferència de calor per convecció, ρ_p : Densitat de partícula, d_p : Diàmetre de partícula, ΔH : entalpia, r_A : Velocitat de reacció, σ : Constant de Stefan-Boltzmann, ε : Emissivitat.

La formulació dels nombres no dimensionals presentats a la taula anterior és genèrica. En alguns casos, existeixen nombres derivats d'aquests o que han estat modificats per a la seva aplicació en l'àrea dels incendis. De tota manera, no serà fins al proper capítol que s'entrarà en detall en aquest aspecte.

1.3. Anàlisi de semblança i escalatge

Una de les aplicacions més habituals de l'anàlisi dimensional és la construcció de models experimentals o el plantejament d'experiències a escala reduïda o ampliada per a l'estudi i modelització de fenòmens que per la seva naturalesa o per l'escala original en la que tenen lloc els fan poc aptes per a l'experimentació directa. Per tal que el model tingui el mateix comportament que el fenomen real cal garantir la semblança entre ambdós. En aquest sentit, l'aplicació de l'anàlisi dimensional conjuntament amb l'anàlisi de semblança permet establir les pautes teòriques de construcció del model per tal que aquest tingui un comportament idèntic al fenomen real. No obstant, cal fer incís en què la validesa d'aquestes pautes restarà subjecte a la validesa i completesa de l'anàlisi dimensional desenvolupat.

1.3.1. Criteris de semblança

La semblança entre el fenomen d'estudi i el model experimental ha de tenir lloc a diversos nivells; geomètric, cinemàtic i dinàmic, és a dir, pel què fa a la forma el model ha de ser similar al fenomen real, el mateix s'ha de complir per les trajectòries que es descriu al model i al fenomen real, si realitzen moviments, i per a les forces involucrades, que han de ser proporcionals. Seguidament s'expliquen més en detall cadascun d'aquests criteris.

Semblança geomètrica

La semblança geomètrica implica necessàriament que el model i el fenomen d'estudi tinguin la mateixa forma, és a dir, distàncies proporcionals i angles iguals. Així, si un sistema físic es pot descriure adequadament per un conjunt de mesures de longitud L_1, L_2, \dots, L_t . Per a què el sistema físic d'estudi i el model tinguin semblança geomètrica cal que les relacions entre totes les longituds siguin iguals:

$$\frac{L_j \text{ model}}{L_j \text{ realitat}} = \lambda_L \quad j = 1, \dots, t.$$

Així, qualsevol distància o longitud del model es pot obtenir multiplicant la distància homòloga a la realitat per λ_L . Aquest paràmetre s'anomena *factor d'escala*.

Semblança cinemàtica

La semblança cinemàtica implica la semblança geomètrica, és a dir, la semblança geomètrica és condició necessària perquè es doni la semblança cinemàtica. Malgrat això, la semblança geomètrica no és una condició suficient per a garantir la semblança cinemàtica. Per a què existeixi semblança cinemàtica entre dos sistemes geomètricament similars, les velocitats en els mateixos punts relatius en cada sistema han de ser proporcionals, sempre amb la mateixa raó de proporcionalitat. Igualment, els gradients de velocitat en cada sistema han de mantenir una relació similar en cadascun d'ells.

Per tant, sigui T el temps que triga un element del sistema en recórrer una trajectòria de longitud L , llavors, si la relació entre T al model i a la realitat és sempre constant llavors els dos sistemes són cinemàticament semblants:

$$\frac{T_{\text{model}}}{T_{\text{realitat}}} = \lambda_T$$

Alguns dels factors d'escala més freqüents derivats de la semblança cinemàtica es troben a la Taula 1.12.

Taula 1.12 Factors d'escala semblança cinemàtica.

Velocitat (u)	$(u_{\text{model}}/u_{\text{realitat}}) = \lambda_L \cdot \lambda_T^{-1}$
Acceleració (a)	$(a_{\text{model}}/a_{\text{realitat}}) = \lambda_L \cdot \lambda_T^{-2}$

Semblança dinàmica

Existeix semblança dinàmica quan el polígon de forces que actuen sobre el model és geomètricament semblant al polígon de forces a la realitat. Altrament, això és equivalent a que el quocient de qualsevol parell de forces actuant en el model ha de ser igual al corresponent quocient de forces en la realitat.

L'existència de semblança dinàmica requereix de semblança cinemàtica, per tant, les condicions que s'han de complir per a garantir la semblança dinàmica són les descrites als apartats anteriors conjuntament amb la condició que la relació entre les masses (M) de partícules o elements homòlegs han de mantenir-se constants:

$$\frac{M_{model}}{M_{realitat}} = \lambda_M$$

Alguns dels factors d'escala més freqüents derivats de la semblança dinàmica es troben a la Taula 1.13.

Taula 1.13 Factors d'escala semblança dinàmica.

Densitat (ρ)	$(\rho_{model}/\rho_{realitat}) = \lambda_M \cdot \lambda_L^{-3}$
Forces (F)	$(F_{model}/F_{realitat}) = \lambda_M \cdot \lambda_L \cdot \lambda_T^{-2}$

Per tant, es pot afirmar que existeix una *semblança completa* entre el fenomen d'estudi i el model desenvolupat quan té lloc la semblança dinàmica i per tant la semblança cinemàtica i geomètrica també.

1.3.2. Principi de semblança. Lleis d'escala.

El principi de semblança té la seva base també en el principi d'homogeneïtat dimensional, i estableix que:

1. Sigui $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}$ el conjunt de grups no dimensionals que caracteritzen un fenomen
2. Es pot garantir la semblança completa entre el model i el fenomen si:

$$\Pi_{p\ model} = \Pi_{p\ realitat} \quad \forall p = 1, \dots, n - r$$

Així, coneguts els grups no dimensionals, es poden obtenir fàcilment les *lleis d'escala* –relacions que expressen la variació de les variables que descriuen el fenomen d'estudi en funció de l'escala en què es determinen–, que permeten plantejar programes experimentals a una escala diferent a la que té lloc el fenomen d'estudi.

1.3.3. Semblança parcial, efectes d'escala i models distorsionats

Tot i que idealment s'hauria de treballar en condicions de semblança completa, no sempre és possible. En alguns casos, segons els fenòmens físics analitzats, el nombre de lleis d'escala derivat de l'aplicació de l'anàlisi dimensional i de l'anàlisi de semblança supera el nombre de graus de llibertat de què disposa l'experimentador per a construir el model experimental. D'aquesta manera no es pot assolir una solució completa al problema. Nogensmenys, sí que és possible donar una resposta parcial. Per a això és necessari centrar l'atenció en un aspecte determinat del fenomen d'estudi per tal de considerar negligibles altres aspectes, en base a determinades hipòtesis, i assolir una *semblança parcial* que derivarà alhora en un escalatge parcial. Lògicament, serà necessari validar aquestes hipòtesis per a comprovar la validesa dels resultats obtinguts. A banda, per a formular les hipòtesis amb certes garanties d'èxit cal tenir un coneixement suficient sobre el fenomen d'estudi per tal de poder seleccionar els mecanismes preponderants i menystenir els secundaris.

D'altra banda, aquest nivell de coneixement és també essencial per a evitar l'aparició dels anomenats *efectes d'escala*, és a dir, el canvi en la significança d'alguns grups no dimensionals, que a gran escala no tenen importància, però al reduir l'escala esdevenen suficientment significatius com perquè no es puguin negligir. En alguns casos és doncs necessari construir *models distorsionats* per a evitar aquests efectes d'escala, incomplint amb la semblança geomètrica.

ABSTRACT

Year after year millions of hectares are destroyed by wildland fires, not only in Europe but all over the world; just remember the dramatic episodes recently occurred in California or Australia. Besides the evident environmental impact caused by these fires –emission of greenhouse gases, biodiversity loss, soil erosion, etc– wildland fires represent also a social problem of primary order that threatens human life and their assets.

Because of this situation, during the last decades research on wildland fires has been greatly boosted. Nevertheless, the study of forest fires is really complex due to the conditions and the environment in which they develop and to the number of phenomena –physical, chemical and social– that interact all along the different spatial and temporal scales that give rise to the start and development of a fire. That is partly the reason because the study of wildland fire behaviour has mainly been developed in laboratories, but questions like how these experimental results can be translated to real fires?, or is really this kind of experimentation useful?, or what can be extrapolated? These questions have not yet received a clear answer.

The goal of this work was to improve the knowledge on the effect of changing the scale in the experimental study of forest fire behaviour, by means of dimensional and similarity analysis. First an extended bibliographic review has been done, centred on those works that had applied in one or another way the dimensional and similarity analysis to the study of fires and more specifically to forest fires. It was observed that it is not possible to undergo a complete scaling of a forest fire and that the most used partial scaling technique was the Froude scaling. Moreover it was detected that this kind of analysis was never before applied to the laboratory models used currently to obtain experimental data on wildland fires. Thus, an exhaustive analysis of all the variables affecting forest fire behaviour has

been carried out for the diverse experimental scenario (in the lab and field). From these variables, a complete dimensional analysis has been developed in order to study the spread of a flame front –both in basic conditions and with slope or wind– and a subsequent similarity analysis has provided the scaling laws governing all the variables under study. A complete experimental program has been designed and developed in the laboratory with the aim of validating the scaling laws previously found and to establish the possible causes of any failure of the laws.

The results obtained show that in the case of a basic flame front, i.e. spreading under no-wind and no-slope conditions, all the variables analysed followed the scaling laws obtained during the theoretical study for flame front lengths ranging from 25 cm to 1.6 m. In addition, the scaling laws corresponding to the rate of spread and flame geometry have been validated in a wider range of flame front lengths, from 25 cm to 4.5 m. Nevertheless, it has also been observed that parameters such as moisture content, the type of fuel or the specific design of the experimental device used can have an important influence on the results obtained if they are not adequately controlled. For the tests under slope conditions, the results indicate that the scaling laws corresponding to the flame geometry are verified for all the slopes tested which range from 0 to 30°, while in the case of the rate of spread scaling law is no longer verified for the 30° slope. Finally, in the case of flame fronts spreading under wind conditions, the results show that for wind speed values greater than 2.5 m/s neither of the scaling laws corresponding to the flame geometry and the rate of spread, are verified. However, irregularities start being observed for wind speeds higher than 1.5 m/s.

At the end of this work, the main causes leading to the failure of the scaling laws are pointed out together with the factors that can make the laboratory experiments less reliable when trying to extrapolate the results to larger scales or even to real fires.

2. ANTECEDENTS

Les tècniques de l'anàlisi dimensional i de semblança han estat extensament utilitzades en diferents àmbits científics i tecnològics per a estudiar fenòmens de naturalesa molt diversa. Tot i que aquestes tècniques han estat aplicades amb èxit en diversos tipus d'incendis (Quintiere, 1989), la seva aplicació en l'estudi dels incendis forestals ha estat poc estesa, essent la bibliografia trobada relativament escassa. La gran diversitat de fenòmens que intervenen en un incendi forestal, així com la variabilitat espacial i temporal de factors com la distribució i tipologia de combustible, la topografia del terreny i les condicions atmosfèriques en què aquests es desenvolupen en són les causes essencials.

En aquest capítol es fa, d'una banda, un repàs als treballs trobats en la bibliografia que aborden el problema dels incendis forestals des de l'anàlisi dimensional i de semblança. Els estudis recopilats són molt diversos respecte a l'àrea d'aplicació, l'objectiu i el mètode d'anàlisi. Tot i que no tots aquests estudis fan referència al canvi d'escala específicament, s'ha considerat oportú presentar les conclusions que en deriven perquè han servit per a conèixer les metodologies emprades, així com les hipòtesis i simplificacions utilitzades pels diferents autors. A més, han permès tenir una visió global de les possibilitats que presenten aquestes tècniques en les seves diverses vessants.

D'altra banda, s'ha considerat molt important per al desenvolupament d'aquesta tesi conèixer també quina ha estat la manera en què s'ha dut a terme l'experimentació, tant a laboratori com a camp, pel què fa a l'estudi del comportament dels incendis forestals. I també se n'ha inclòs per tant una revisió bibliogràfica.

Per últim, de les conclusions d'aquest capítol n'han derivat els objectius específics d'aquesta tesi, que es detallen al final d'aquest capítol.

2.1. L'anàlisi dimensional i de semblança en l'estudi dels incendis forestals

L'aplicació de l'anàlisi dimensional i de semblança en l'estudi dels incendis forestals condueix a l'obtenció d'un elevat nombre de lleis d'escala que excedeixen els graus de llibertat disponibles durant l'experimentació. És doncs, pràcticament impossible assolir un escalatge complet i cal fer hipòtesis per a poder considerar negligibles certs grups no dimensionals i realitzar un escalatge parcial (Spalding, 1963). En funció del fenomen d'interès en què se centri l'estudi, les hipòtesis i simplificacions variaran donant lloc a diferents grups no dimensionals i per tant a diferents lleis d'escala, que alhora conduiran a diferents models i/o proves experimentals.

A continuació es presenten els treballs trobats a la bibliografia que d'una forma o altra utilitzen l'anàlisi dimensional i/o de semblança en l'estudi dels incendis forestals, de manera que han estat agrupats en funció del seu objectiu en dos blocs: els treballs que sense estar directament relacionats amb l'escalatge utilitzen aquestes tècniques per a l'estudi dels incendis forestals, i els treballs relacionats amb l'escalatge.

2.1.1. Treballs que utilitzen l'anàlisi dimensional en l'estudi dels incendis forestals

En aquest apartat es recullen alguns dels treballs trobats a la bibliografia que utilitzen l'anàlisi dimensional i de semblança amb diferents objectius però que no estan directament relacionats amb l'escalatge. Precisament per això, l'anàlisi que se'n farà no serà molt detallat, sinó que simplement se'n donarà una pinzellada per a tenir un punt de vista global de les possibilitats que presenten aquestes tècniques i quines aplicacions han tingut en l'àmbit dels incendis forestals. Abans però, s'ha inclòs un apartat on es detallen aquells treballs que han utilitzat nombres no dimensionals coneguts i aplicables als incendis forestals, però sense utilitzar per a això les tècniques de l'anàlisi dimensional o de semblança.

Treballs que utilitzen nombres no dimensionals

En l'estudi dels incendis forestals, bàsicament han estat utilitzats dos nombres no dimensionals, el criteri d'energia de Byram i el nombre de Fr expressat de diferents formes. D'aquesta manera els treballs que aquí es presenten han estat agrupats en funció d'aquests nombres de manera que primer es detallen els que utilitzen el criteri d'energia de Byram i posteriorment la resta.

Byram (1959) va dur a terme una anàlisi teòrica per a estudiar la interacció que té lloc entre un incendi forestal i l'atmosfera en què aquest es desenvolupa. En particular, Byram es va centrar en la relació entre el perfil de vent i les forces d'empenyiment aerostàtic associades als incendis de grans dimensions. Byram va determinar que la relació entre el flux d'energia vertical causat pel corrent

convectiu generat pel foc (P_f) i el flux d'energia horitzontal a causa del vent (P_w), que va anomenar *criteri d'energia* (N_c), podia resultar útil com a indicador per a predir comportaments extrems del foc. L'equació [2.1] presenta la formulació d'aquesta relació, que a la literatura ha estat anomenada també *nombre convectiu*, on, g és l'acceleració de la gravetat, I la intensitat del foc, ρ_a la densitat de l'aire, c_{pa} la calor específica de l'aire, T_a la temperatura ambient, u_w la velocitat del vent i R la velocitat de propagació del foc.

$$N_c = \frac{P_f}{P_w} = \frac{2gI}{\rho_a c_{pa} T_a (u_w - R)^3} \quad [2.1]$$

Byram va concloure que quan el criteri d'energia excedia la unitat com a mínim a una altura de 0,3 km per sobre del foc, llavors tenien lloc fenòmens de comportament extrem del foc, com els focus secundaris, els remolins de foc, o la sobtada acceleració del foc. No obstant, Byram va considerar en els seus càlculs el cas ideal en què el foc cremava en una atmosfera neutra estable i que en la columna de convecció no es produïa l'efecte de succió de l'aire ambient i que per tant no entrava aire ambient a la columna.

Aquest nombre adimensional ha suscitat un elevat interès entre la comunitat científica, de forma que anys més tard, Nelson (1993) va publicar un treball en què s'analitza més en profunditat d'on deriven les equacions del flux d'energia generat pel foc (P_f) i del flux d'energia a causa del vent (P_w). A més en aquest treball es revisen també les hipòtesis i possibles limitacions del treball de Byram (1959). Nelson va seguir treballant en aquesta línia, motivat pel fet que tot i l'interès generat per aquest nombre, no s'havien dedicat suficients esforços per a validar els resultats de Byram (1959). Així, a Nelson (2003) es va presentar un treball enfocat únicament a l'estudi del terme associat al flux d'energia generat pel foc (P_f), però aquesta vegada mitjançant una anàlisi termodinàmica.

D'altra banda, altres autors han utilitzat el criteri d'energia o nombre convectiu en els seus estudis. Un exemple d'això es pot trobar a Martini *et al.* (1991). En aquest treball es va utilitzar el nombre N_c per a relacionar l'efecte del vent amb l'angle d'inclinació de la flama en incendis forestals. Per a això es van dur a terme proves estàtiques a laboratori. Per a simular la font de producció de calor es varen utilitzar petites safates d'alumini -4, 10 i 15 cm- que contenien alcohols de metil, propil i isopropil. Les proves es dugueren a terme per a diferents velocitats del vent, que anaren des de 0,10 m/s fins a 0,35 m/s en increments de 0,05 m/s. Durant les proves es varen enregistrar valors de la pèrdua de pes cada 5 segons. Amb aquestes dades es va calcular la intensitat del foc. Pel què fa a la determinació de l'angle d'inclinació de la flama es feu a ull nu per 2 observadors independents. És important notar que tot i que al principi d'aquest treball els autors parlen tant de l'escalatge com de les lleis d'escala, no fan servir aquests conceptes en el disseny experimental. Dels resultat obtinguts concloueren que existia un valor crític de N_c , aproximadament igual a 100, que indicava el punt on la inclinació de la flama canviava ràpidament amb l'increment del vent.

Un altre nombre no dimensional que apareix sovint a la bibliografia en incendis forestals és el nombre de Fr . Tot i això, no sempre s'expressa amb la mateixa formulació. Per exemple Albiní (1981) va utilitzar el nombre de Fr en base a l'altura de la flama per a determinar l'angle d'inclinació de la flama (θ), segons l'equació [2.2], on u_w és la velocitat del vent, g l'acceleració de la gravetat i H l'altura de la flama. Per a obtenir aquesta expressió teòrica Albiní (1981) va assumir que la transferència de calor entre el front de flames i el combustible no cremat es produïa únicament per radiació.

$$\tan(\theta) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{u_w}{\sqrt{gH}} \right) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot Fr \quad [2.2]$$

Diversos autors han relacionat també el nombre de Fr amb l'angle d'inclinació de la flama, arribant a diferents expressions com la de l'equació [2.3] on a i b són dos coeficients que prenen valors diferents segons els diferents autors.

$$\tan(\theta) = a \cdot Fr^b \quad [2.3]$$

A Anderson *et al.* (2006) s'analitzen alguns d'aquests models mitjançant dades recopilades de diferents fonts corresponents tan a proves de laboratori com de camp. Igualment, a Morvan (2007), tot i ser un treball enfocat a l'estudi del comportament dels incendis de superfície propagant en matollars mitjançant simulacions i a l'avaluació a partir de les dimensions característiques de la flama la transició d'un incendi de superfície a un incendi de capçades, s'utilitzà també el nombre de Fr per a correlacionar-lo amb la inclinació de les flames. Els resultats obtinguts es compararen amb els d'altres treballs com Albiní (1981), Nelson i Adkins (1986) i Weise i Biging (1996).

Clark *et al.* (1996a, 1996b) utilitzaren el quadrat del nombre convectiu de Fr (F_c^2) d'acord amb la següent expressió (eq. [2.4]), on u_w és la velocitat del vent, R la velocitat de propagació del foc, g l'acceleració de la gravetat, $\Delta T/T$ la força d'empenyiment aerostàtic convectiu i W_f l'amplada del foc.

$$F_c^2 = \frac{(u_w - R)^2}{g \frac{\Delta T}{T} W_f} \quad [2.4]$$

No obstant, posteriorment Sullivan (2007) va fer un aclariment sobre la formulació del nombre F_c . Sullivan utilitzà la mateixa expressió de l'equació [2.4], extreta de Clark *et al.* (1996a, 1996b) però en comptes d'emprar l'amplada del foc (W_f) utilitzà el gruix del front de flames, citant una comunicació personal amb Clark en què aquest confirmà que realment el paràmetre que s'hauria d'utilitzar és el gruix del front de flames per a calcular el nombre F_c i que el terme amplada del foc podia resultar confús en aquest sentit.

El nombre convectiu de Fr (F_c^2) proporciona una mesura de la relació entre l'energia cinètica de l'aire relativa al foc i el flux de calor sensible generat pel foc, és a dir, l'energia mesurada a partir de la temperatura.

L'objectiu del treball de Clark *et al.* (1996a) fou descriure i demostrar la necessitat i utilitat d'un model combinant el comportament del foc amb el de l'atmosfera o entorn ambiental d'aquest, ja que segons els autors aquest tipus de models permeten caracteritzar amb força precisió la dinàmica dels processos convectius alhora que capturar les condicions meteorològiques ambientals. Per a això varen utilitzar el quadrat del nombre convectiu de Fr (F_c^2). D'aquest treball varen concloure que el nombre convectiu de Fr permetia una interpretació física de l'estat del foc però sense necessitat d'una descripció detallada de la dinàmica entre foc i atmosfera. Segons Clark *et al.* (1996a), quan $F_c^2 < 1$ existeix una forta interacció entre l'ambient i el foc, de manera que el foc pot forçar les seves pròpies escales de circulació, donant lloc a les condicions adequades per a què puguin tenir lloc fenòmens eruptius. A més, Clark *et al.* (1996a) varen determinar que el nombre F_c^2 podia ser un paràmetre important per a comparar experiments realitzats en túnels de vent amb incendis reals.

Pel què fa a l'altre treball dut a terme pels mateixos autors, Clark *et al.* (1996b), un dels seus objectius fou determinar la utilitat del nombre F_c^2 per a predir el comportament d'un front de flames, mitjançant diverses simulacions, de manera que arribaren a conclusions semblants a les del treball anterior.

Morvan i Dupuy (2004) varen també simular numèricament la propagació del foc en complexos de vegetació típicament mediterrània però utilitzant una formulació multifase. Els resultats que obtingueren a partir de diverses simulacions en què analitzaren l'efecte del vent en la transferència de calor que es produeix entre el front de flames i la vegetació no cremada, els van permetre identificar dos modes de propagació del foc, la controlada pel plomall i la conduïda pel vent. Per a identificar aquests dos modes de propagació varen utilitzar el nombre de Fr , d'acord a l'expressió [2.5], on u_w és la velocitat del vent, g l'acceleració de la gravetat i L_f la longitud de la flama. Cal fer notar al lector que tot i que els autors parlen de nombre de Fr en realitat utilitzaren el quadrat del nombre de Fr .

$$Fr = \frac{u_w^2}{gL_f} \quad [2.5]$$

Així, Morvan i Dupuy varen concloure que en focs controlats pel plomall, és a dir amb valors de $Fr < 0,5$, la transferència de calor estava dominada per la radiació, mentre que els focs conduïts pel vent, $Fr > 0,5$, inicialment radiació i convecció són del mateix ordre de magnitud però progressivament el foc acaba essent controlat per la convecció.

Sullivan (2007) va analitzar el paper del nombre convectiu de Fr , F_c (Clark *et al.*, 1996a, 1996b) i del criteri d'energia de Byram, N_c (Byram, 1959), en el comportament d'incendis en herbassars a partir de dades obtingudes en proves experimentals realitzades a camp en aquest tipus d'estructures vegetals

(Cheney *et al.*, 1993). Sullivan va determinar que N_c era equivalent a la inversa del cub de F_c , de manera que es va centrar en l'anàlisi de les possibles relacions entre F_c amb diversos paràmetres. Tanmateix, no va obtenir cap relació significativa entre F_c i diferents quantitats mesurables a priori de l'incendi, com per exemple la velocitat mitjana del vent, la densitat aparent de la vegetació o el contingut d'humitat del combustible, tot i que les dades seguien una determinada tendència per a cada paràmetre. Pel què fa a paràmetres descriptors del comportament del foc com la velocitat de propagació, l'altura o gruix de flama, tot i tenir una major correlació amb F_c , aquesta tampoc era significativa, de forma que les dades presentaven coeficients de correlació molt baixos. A partir d'aquests resultats Sullivan va concloure que amb les dades disponibles no podia afirmar que F_c i N_c fossin indicadors útils del comportament del foc. Sullivan apuntà que això podia ser perquè cap d'aquests nombres considera l'amplada del front de flames i aquest paràmetre està clarament relacionat amb la propagació del foc. No obstant, l'autor reconegué que les tendències observades podien estar causades perquè els focs analitzats no presentaren comportaments tan extrems com els descrits per Byram (1959) i Clark *et al.* (1996a, 1996b).

Treballs enfocats a la modelització o correlació de dades experimentals

Els primers treballs d'aquest bloc que apareixen a la bibliografia no estan directament relacionats amb els incendis forestals, sinó que són genèrics per a flames difusives controlades per la força d'empenyiment aerostàtic. És essencial fer menció en aquest apartat a la contribució de Thomas en l'estudi del comportament dels incendis mitjançant l'anàlisi dimensional. Thomas va dedicar gran part de la seva recerca, entre d'altres temes, a l'estudi de les dimensions de la flama per a diferents tipus d'incendis i en diferents contextos, emprant diferents models experimentals de manera que va conduir programes experimentals no només a laboratori sinó també a camp. Tot i l'extensa bibliografia d'aquest autor només es presentaran aquí alguns dels seus treballs.

Per exemple, a Thomas *et al.* (1961) utilitzaren l'anàlisi dimensional per a estudiar les dimensions de flames difusives controlades per la força d'empenyiment aerostàtic, de forma que deduiren la coneguda expressió [2.6].

$$\frac{L_f}{D} = f\left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) \quad [2.6]$$

On L_f és la longitud de la flama, D la dimensió lineal característica del foc, Q el cabal volumètric de combustible en fase gas a temperatura ambient i g l'acceleració de la gravetat.

Els resultats experimentals que obtingueren en diverses proves de laboratori els permeteren validar l'expressió [2.6] per a flames generades per la combustió d'estructures formades per llistons de fusta, en focs estàtics. Cal especificar que els models de llistons de fusta han estat freqüentment utilitzats en l'estudi dels incendis forestals ja que permeten a l'experimentador controlar rigorosament les

característiques del combustible. A més, en aquest estudi van fer també proves per a simular focs en recintes tancats.

Més tard, Thomas va continuar treballant en l'estudi de les dimensions de flames controlades per la força de l'empenyiment aerostàtic. Així, va aplicar l'anàlisi dimensional a incendis estàtics –circulars, quadrats, o formant una franja infinita. Thomas va determinar que per a una franja lineal, l'equació [2.6] es transformava en l'expressió [2.7] on Q' és equivalent a Q però per unitat lineal.

$$\frac{L_f}{D} = f\left(\frac{Q'^2}{gD^3}\right) \quad [2.7]$$

D'altra banda, davant la dificultat de determinar Q de forma experimental, Thomas va proposar substituir aquest terme per $V \cdot D^2 / \rho_{cv}$, on V és la velocitat de combustió –més fàcil de determinar experimentalment– i ρ_{cv} la densitat del combustible vaporitzat. Així, l'equació general [2.6] es va transformar en l'equació [2.8], que sens dubte és una de les més conegudes d'aquest autor.

$$\frac{L_f}{D} = f\left(\frac{V}{\rho_{cv}\sqrt{gD}}\right) \quad [2.8]$$

En aquest mateix treball, Thomas va estudiar també l'efecte del vent en les dimensions de la flama en incendis lineals estàtics, de manera que va utilitzar els mateixos grups no dimensionals que en el cas sense vent però afegint el nombre de Fr , més concretament la seva formulació al quadrat, tal i com s'observa a l'equació [2.9] on u_w és la velocitat del vent.

$$\frac{L_f}{D} = f\left[\left(\frac{V}{\rho_{cv}\sqrt{gD}}\right), \left(\frac{u_w^2}{gD}\right)\right] \quad [2.9]$$

Mitjançant la correlació de dades obtingudes experimentalment a laboratori, Thomas va determinar les funcions que relacionen els termes de les expressions [2.8] i [2.9], de manera que va establir relacions potencials entre els diferents termes d'aquestes equacions.

A banda de Thomas, altres autors han contribuït a l'estudi dels incendis forestals mitjançant l'anàlisi dimensional. Fons *et al.* (1963), tingué per objectius, d'una banda, avaluar quantitativament els efectes de les propietats del llit de combustible i de les partícules que el configuren en alguns dels paràmetres que caracteritzen el comportament del foc –el temps de residència, la velocitat de propagació i la velocitat de combustió. D'altra banda, pretenia establir les relacions d'aquestes variables en termes de grups no dimensionals per a focs a escala de laboratori.

Per a assolir el primer objectiu, Fons *et al.* (1963) varen realitzar diverses proves de focs dinàmics en models de llistons de fusta, variant la densitat relativa –0,3 a 0,8– i la humitat del combustible –4, 6, 8, 10, 13 i 16 % en base seca. A partir dels resultats obtinguts observaren que la velocitat de propagació

augmentava ràpidament quan decreixia la humitat del combustible per a densitats relatives inferiors a 0,45 i humitats inferiors al 10 %. D'aquesta manera conclogueren que atès que els combustibles que contribueixen majoritàriament a la propagació del foc, com per exemple la fullaraca, l'herba o la molsa, tenen densitats relativament inferiors a 0,45, l'efecte del contingut d'humitat i de la densitat relativa del combustible en la propagació del foc són factors clau.

Pel què fa al segon objectiu de Fons *et al.* (1963), empraren les dades de les proves anteriors per a obtenir correlacions experimentals derivades de l'anàlisi dimensional desenvolupat a Thomas *et al.* (1961), per a les dimensions de les flames, on el quocient entre la longitud de la flama i el seu gruix es relacionen amb el nombre de *Fr*. A més, varen establir, també a partir de l'anàlisi dimensional, correlacions per a determinar el temps de residència.

Anys més tard, Nelson i Adkins (1988) van presentar un treball en què analitzaren l'efecte del vent en la propagació d'un incendi aplicant el teorema de π a un conjunt de sis variables. Els grups adimensionals obtinguts foren utilitzats per obtenir relacions que correlacionessin els resultats experimentals. Així, arribaren a la conclusió que la velocitat de propagació d'assajos a laboratori i a camp conduïts pel vent es podien correlacionar amb informació del combustible consumit, el temps de residència de la flama i la velocitat del vent. Tot i la senzillesa d'aquest treball, quant a desenvolupament teòric, els resultats que en deriven són certament significatius, de forma que es poden aplicar a diversos tipus de combustible i condicions ambientals, ja que els autors consideren que l'efecte d'aquests paràmetres en la propagació d'un incendi, queda inclòs dins de les variables velocitat de combustió i temps de residència.

Posteriorment, Raupach (1990) va emprar l'anàlisi dimensional per a estudiar les implicacions de la geometria de la font de generació del plomall –puntual, lineal o un pla infinit– en el comportament d'un incendi forestal, partint de les equacions de conservació. Així, l'autor va determinar que el plomall d'un incendi forestal podia ser modelitzat com el plomall procedent d'una font lineal, i que a més la velocitat dels gasos al centre d'aquest era independent de l'altura. D'altra banda va determinar també que el canvi en la velocitat del vent en l'entorn del front de flames era poc important excepte per focs molt intensos. A més, va afirmar que els túnels de vent únicament permetien simular de manera realista incendis de baixa intensitat sota la influència de vents forts.

Després de més d'una dècada, Nelson (2002), en base a l'anàlisi realitzat anteriorment a Nelson i Adkins (1988), va emprar l'anàlisi dimensional per correlacionar dades experimentals. L'objectiu principal d'aquest estudi fou desenvolupar un model que permetés calcular la interacció entre l'efecte del vent, el pendent i la força ascensional, a més de l'efecte conjunt d'aquests paràmetres en la velocitat de propagació, a partir del càlcul d'un únic paràmetre anomenat velocitat efectiva del vent.

Nelson va introduir tres noves suposicions en aquest treball però que foren coherents amb l'anàlisi desenvolupat a Nelson i Adkins (1988). En primer lloc va considerar que la influència dels paràmetres

velocitat i direcció del vent, pendent del terreny i força ascensional (*buoyancy*) en la velocitat de propagació de l'incendi es podia explicar únicament amb el paràmetre velocitat efectiva del vent. En segon lloc va estimar que les variables intensitat de reacció i desplaçament de la flama incorporaven els efectes de tots els descriptors geomètrics del llit de combustible, el cisallament del vent prop del terra i el contingut d'humitat del combustible en la propagació del foc. En darrer lloc, va considerar que el mecanisme responsable de la propagació de l'incendi era essencialment un procés convectiu. A banda d'aquestes suposicions, Nelson (2002) no va incloure el temps de residència al aplicar el Teorema de Pi de Buckingham perquè assumí que la seva influència en la propagació del foc quedava inclosa ja en un altre paràmetre, la intensitat de reacció.

Nelson (2002) va arribar a la conclusió que tot i que l'equació que relacionava linealment els dos grups pi calculats resultava útil per trobar correlacions entre el desplaçament de la flama i la velocitat de propagació, pel fet de provenir de dades obtingudes en un petit interval respecte tot el rang possible de variacions de vent i pendent, era necessari determinar-ne la seva validesa més enllà d'aquest interval.

Abans d'acabar aquest apartat és necessari fer un apunt, ja que hom podria pensar que en aquesta revisió bibliogràfica s'han obviat treballs realment significatius en l'àmbit de la recerca en incendis forestals en què s'utilitzen models amb formes no dimensionals per a expressar paràmetres descriptius del comportament del foc. No obstant això, la forma en què s'ha arribat a la forma no dimensional en aquest tipus de treballs no és fruit de la utilització de les tècniques de l'anàlisi dimensional o de semblança, sinó que simplement les variables d'interès s'expressen en forma no dimensional per a, d'alguna forma, evitar els efectes de l'escala o de les diferents condicions en què poden tenir lloc diferents proves i/o incendis. Precisament perquè els resultats d'aquests treballs no deriven de la utilització d'aquestes tècniques, no han estat inclosos en aquesta anàlisi bibliogràfica. No obstant, els lectors interessats en aquest tipus de treballs poden consultar les següents referències: Rothermel (1972), Viegas (2004), Viegas (2005), Balbi *et al.* (2007).

2.1.2. Treballs relacionats amb l'escalatge

Els primers treballs que apareixen a la bibliografia són bàsicament de caràcter teòric, i defineixen els incendis forestals, atesa l'elevada intensitat que poden assolir en determinades circumstàncies, com a *incendis massius*. Aquest tipus d'incendis es caracteritzen per ocupar una elevada superfície –que generalment s'assumeix de forma circular–, per consumir tot el combustible disponible durant el seu decurs i per estar principalment governats per processos convectius.

A més, en aquests primers estudis es realitza únicament el desenvolupament conceptual per al cas estàtic, enfocant l'anàlisi en aspectes relacionats amb el flux, com la columna de convecció i la força ascensional (*buoyancy*).

A partir de la dècada dels setanta i fins a l'actualitat, els treballs es diversifiquen pel què fa a objectius i a l'aspecte fonamental en què se centra l'estudi, deixant d'ésser bàsicament teòrics, i guanyant importància la finalitat pràctica. Aquesta tendència queda clarament reflectida en el tipus de variables incloses en aquests estudis, molt més en concordança amb el tipus de mesures que es poden realitzar a laboratori i/o a camp.

Byram (1966) va utilitzar el teorema de π amb l'objectiu de trobar les lleis d'escala per a les característiques bàsiques de flux dels incendis massius. Segons l'autor, des del punt de vista de les relacions entre les forces d'empenyiment aerostàtic o de flotabilitat el procés de combustió pot ser tractat com un procés d'alliberació d'energia que genera aire calent en comptes de gasos de combustió. Així, en aquest treball el foc s'assimila a una font pura de producció de calor, d'àrea circular, que allibera un flux convectiu per unitat d'àrea constant. A banda, es van introduir també altres hipòtesis com considerar l'atmosfera isotèrmica i incompressible però amb la mateixa calor específica i coeficient d'expansió tèrmic que l'atmosfera real compressible.

Després d'un petit estudi inicial, Byram obtingué 16 grups no dimensionals que corresponien fonamentalment a factors de forma geomètrics, relacions de temperatura i de velocitats, diferents expressions del nombre de Fr i el nombre de Re . Byram va concloure que en cas de realitzar l'experimentació en les mateixes condicions atmosfèriques en què tenia lloc el fenomen real calia obligadament menystenir el nombre de Re . El fet d'ometre el nombre de Re és equivalent a negligir les forces viscoses o a assumir un flux totalment turbulent en el foc i la columna de convecció. Aquesta simplificació és vàlida si el nombre de Re té un valor suficientment elevat, o de forma equivalent, si el model experimental té unes dimensions mínimes. Byram va establir a partir d'un senzill exemple teòric, que la dimensió característica del model –el diàmetre– havia de tenir un valor mínim comprès entre 6 m i 15 m. Aquest tipus d'escalatge és conegut a la literatura com a *escalatge de Froude*.

La Taula 2.1 presenta, seguint la notació emprada a Byram (1966), la relació de variables seleccionades per a dur a terme l'anàlisi dimensional i les lleis d'escala derivades d'aplicar un escalatge de Froude.

Taula 2.1 Variables seleccionades i lleis d'escala obtingudes a Byram (1966).

Símbol	Variable	Símbol	Variable
d_z	Diàmetre de la columna a una altura z	u_i	Velocitat d'entrada d'aire a la columna de convecció
D	Diàmetre de la base de l'incendi	u_g	Velocitat dels gasos de combustió a l'eix central
g	Acceleració de la gravetat	\dot{w}	Acceleració dels gasos al centre de la columna
I_a	Flux de calor per unitat d'àrea	z	Coordenada relacionada amb l'altura de la columna
l_d	Longitud de dissipació (turbulència)	β_l	Angle entre la superfície de la flama i la horitzontal
r_z	Distància radial a una altura z	θ	Angle en coordenades polars
T_a	Temperatura de l'aire a la superfície de terra	ϑ	Viscositat cinemàtica
T_z	Temperatura de la columna a una altura z	$\rho_a \cdot c_{pa}$	Densitat de l'aire per la seva calor específica
u_f	Fluctuació mitjana de la velocitat (turbulència)	ψ	Angle de desviació del vent a causa del foc
u_w	Velocitat del vent	Δt	Interval de temps arbitrari

Lleis d'escala (Escalatge de Froude)*

$$\frac{(r_z)_m}{(r_z)_f} = \frac{z_m}{z_f} = \frac{(l_d)_m}{(l_d)_f} = \frac{(d_z)_m}{(d_z)_f} = \frac{D_m}{D_f} \quad [2.10]$$

$$\frac{(u_w)_m}{(u_w)_f} = \frac{(u_i)_m}{(u_i)_f} = \frac{(u_g)_m}{(u_g)_f} = \frac{(u_f)_m}{(u_f)_f} = \frac{(I_a)_m}{(I_a)_f} = \frac{(\Delta t)_m}{(\Delta t)_f} = \left(\frac{D_m}{D_f}\right)^{1/2} \quad [2.11]$$

$$\frac{\dot{w}_m}{\dot{w}_f} = \frac{(T_z)_m}{(T_z)_f} = \frac{(\beta_l)_m}{(\beta_l)_f} = \frac{\psi_m}{\psi_f} = \frac{\theta_m}{\theta_f} = 1 \quad [2.12]$$

(*) El subíndex 'm' fa referència al model, mentre que el subíndex 'f' fa referència al fenomen real.

Les lleis d'escala (Taula 2.1) imposen que les variables lineals han d'escalar linealment amb la longitud característica del sistema, en aquest cas D , mentre que les velocitats i temps característics ho han de fer amb l'arrel quadrada de D . El factor d'escala correspon a la relació entre D al model i a la realitat.

Per últim, notar que Byram (1966) va resoldre que l'anàlisi del cas dinàmic era molt més complicat pel gran nombre de variables i per la complexitat dels processos físics que hi intervenen. Tanmateix, però, afirmà que apareixerien els mateixos grups no dimensionals que pel cas estàtic.

Seguint en la mateixa línia de Byram (1966), Williams (1969) va realitzar també un treball teòric encaminat a analitzar els aspectes relatius al flux de l'incendi, però més extens i complet que l'anterior. L'objectiu d'aquest estudi fou explorar noves tècniques d'escalatge per als incendis massius, a partir de les diferents possibilitats que presenta l'experimentació a laboratori.

Per a determinar els grups no dimensionals, es postularen les equacions i condicions de contorn del sistema, que s'expressaren posteriorment en forma no dimensional fins a obtenir els corresponents grups no dimensionals. Per a això, Williams considerà que tot i que alguns dels processos que intervenen en els incendis massius tenen lloc en la fase condensada, els processos fonamentals succeeixen en la fase gasosa. Així es formularen les equacions de la dinàmica dels gasos i els processos de la fase condensada es van incloure a partir de les condicions de contorn. S'assumí l'equilibri

termodinàmic local i el règim permanent en els processos de transferència de calor per radiació. A més, es menystingueren diverses variables –la viscositat aparent, la difusió tèrmica, la difusió pel gradient de pressió, la densitat de l’energia de radiació, l’emissió induïda i la difusió per efecte Compton.

En total s’obtingueren 28 grups no dimensionals, dels quals els més importants respongueren a les següents categories: semblança geomètrica, força d’empenyiment aerostàtic, radiació, l’alliberació de calor que es produeix en la fase gas, energia de gasificació del combustible, velocitat de combustió o càrrega de combustible, i paràmetres atmosfèrics, a més del nombre de Re . De tots aquests fou seleccionat un conjunt de 7 grups no dimensionals com a nucli bàsic per a l’anàlisi. Amb tot, les lleis d’escala derivades d’aquest conjunt de nombres proporcionen a l’experimentador 5 instruccions que són extremadament difícils de seguir simultàniament. En base a aquesta limitació foren proposades diferents tècniques d’escalatge parcial. Pel què fa a l’escalatge estàndard, altrament anomenat escalatge de Froude, implica mantenir constant el nombre de Fr , de manera que cal ometre el nombre de Re . En aquest tipus d’escalatge doncs, els experiments es duen a terme en les mateixes condicions atmosfèriques i gravitatòries en què succeeix el fenomen real.

Aquesta aproximació provoca, segons l’autor, un escalatge incorrecte de la radiació, la convecció, les característiques de la turbulència, la geometria del llit de combustible, i de les velocitats de transferència de calor. Per tant, Williams afirmà que mitjançant aquesta aproximació únicament es podia escalar adequadament el plomall, i que no estava clar que assimilar el foc a una font de calor permetés estudiar-ne el seu comportament.

Precisament per això, l’autor proposà explorar altres tècniques d’escalatge que proporcionessin a l’experimentador un major control sobre el model. D’aquesta manera, en aquest treball s’analitzen les tècniques de l’escalatge de la pressió, l’escalatge de la pressió i de la força de la gravetat, i per últim l’escalatge de la composició i temperatura de l’entorn. La Taula 2.2 recull les lleis d’escala per a cadascuna d’aquestes tècniques d’escalatge, seguint també en aquest cas la notació proposada per l’autor.

Escalatge de la pressió

Aquest tipus d’escalatge requereix essencialment l’elevació de la pressió en el model respecte a la pressió ambiental, d’acord a les instruccions d’escala (Taula 2.2, eq. [2.13]). Segons Williams (1969) amb aquesta tècnica es poden escalar apropiadament la velocitat de combustió, els fenòmens de flotabilitat, els efectes convectius i probablement la turbulència ja que la velocitat de combustió es troba controlada per la transferència de calor per convecció. No obstant, amb aquesta tècnica no es poden escalar els fenòmens radiatius, de la cinètica química o de flux de transició. A banda, l’escalatge de la pressió presenta limitacions de tipus pràctic en relació als nivells de pressió en el model de forma que l’autor considera que es poden emprar factors d’escala de l’ordre de 10 com a màxim.

Taula 2.2 Lleis d'escala derivades de les diferents tècniques d'escalatge utilitzades a Williams (1969).

Símbol	Variabile	Símbol	Variabile
\mathbb{C}	Constant	Q_c	Calor de combustió
g	Acceleració de la gravetat	T_a	Temperatura ambient
L	Longitud característica	T'_a	Gradient vertical de la temperatura ambient
ℓ_i	Longituds geomètriques del sistema $i = 1, 2, \dots$	T_l	Temperatura de gasificació del combustible
m	Coefficient relacionat amb el coeficient d'absorció de radiació	u_w	Velocitat del vent
n	Coefficient relacionat amb la viscositat de l'aire	Γ	Vorticitat
p_a	Pressió atmosfèrica	Δh_l	Calor de gasificació per unitat de massa del combustible l

LLEIS D'ESCALA	
Escalatge de la pressió	
$\ell_i \sim L, p_a \sim L^{-3/2}, u_w \sim L^{1/2}, \Gamma \sim L^{-1/2}$	
[2.13]	
Escalatge de la pressió i de la força de gravetat	
$\ell_i \sim L, p_a \sim L^{-1}, g \sim L^{-1}, u_w \sim \mathbb{C}, \Gamma \sim L^{-1}, T'_a \sim L^{-1}$	
[2.14]	
Escalatge de la composició i la temperatura de l'entorn	
$\ell_i \sim L, p_a \sim L^{(m+n-4)/(3-n)}, g \sim L^{-(2m+n+3)/(3-n)}, u_w \sim L^{-(m+n)/(3-n),$ $\Gamma \sim L^{-(m+3)/(3-n)}, T_a \sim L^{-1/(3-n)}, T_l \sim L^{-1/(3-n)}, T'_a \sim L^{(2m+n+3)/(3-n)},$ $Q_c \sim L^{-1/(3-n)}, \Delta h_l \sim L^{-1/(3-n)}$	
[2.15]	

Escalatge de la pressió i de la força de la gravetat

Aquesta tècnica consisteix en modificar d'una banda la pressió al model i d'altra la força de la gravetat, ambdós de forma inversament proporcional a la longitud característica del sistema (Taula 2.2, eq. [2.14]). Per a això, Williams proposà col·locar el model en el braç d'un equip centrifugador. Tanmateix, la complexitat d'aquest sistema requereix anar en compte amb certs aspectes logístics durant l'experimentació per tal d'evitar l'aparició d'efectes no desitjats. Williams contempla diverses opcions per a evitar en la mesura del possible aquests efectes.

Amb aquest tipus d'escalatge a banda d'escalar els mateixos fenòmens que en l'escalatge de pressió, s'aconsegueixen també escalar adequadament les longituds d'absorció i dispersió de la radiació, mentre que no es poden escalar els fenòmens relacionats amb la cinètica química i fluxos de transició. Aquest tipus d'escalatge és més complex que l'anterior de manera que com a màxim es poden plantejar relacions d'escala de 2 ordres de magnitud.

Escalatge de la composició i temperatura de l'entorn

Per últim, Williams (1969) presenta una tècnica d'escalatge, la més complexa de totes, que requereix l'aplicació d'una acceleració centrífuga al model, l'increment de la pressió i temperatura ambient, l'enriquiment amb oxigen de l'aire ambient i l'ajust de les propietats del combustible (Taula 2.2, eq. [2.15]). Aquesta tècnica permet escalar correctament els mateixos fenòmens que en l'escalatge de la pressió i la força de la gravetat, més el flux d'energia radiant. Però com en el cas anterior, no es poden escalar els fenòmens relacionats amb la cinètica química i fluxos de transició.

Restriccions en l'enriquiment amb oxigen, l'acceleració centrífuga i la pressió limiten el valor del factor d'escala a un valor lleugerament inferior a un ordre de magnitud.

Les tècniques estudiades a Williams (1969) són poc convencionals, i la majoria complexes i costoses. De les tres tècniques presentades, Williams conclogué que la més prometedora era la d'escalatge de la pressió i de la força de la gravetat i que s'hauria de començar a experimentar d'acord a les lleis d'escala derivades d'aquest tipus d'escalatge. Tot i això, és important precisar que amb cap d'aquestes tècniques s'aconsegueix escalar la cinètica de la reacció. L'autor va ressaltar que aquest aspecte únicament prenia importància en els casos en què es cremessin petits elements de combustible.

El següent treball trobat a la bibliografia és el presentat a Lee (1972). Aquest autor va aprofitar el desenvolupament teòric de Byram (1966) amb l'objectiu d'avaluar l'aplicabilitat i les limitacions de les lleis d'escala, a partir de models experimentals de dimensions menors a les proposades per aquest darrer autor –6 m a 15 m. Aquestes limitacions fan referència a les hipòtesis necessàries per a dur a terme l'escalatge parcial, és a dir, al fet d'assumir un flux turbulent tant a la columna com al foc i per tant a les dimensions mínimes del model.

D'aquesta manera Lee (1972) va utilitzar les lleis d'escala de Byram (1966) per a reproduir a una escala menor, proves realitzades a camp en el context del projecte *Flambeau* dedicat a l'estudi d'incendis massius (Countryman, 1967). Tot això amb l'objectiu de validar l'escalatge de la temperatura i la velocitat dels gasos.

De totes les proves realitzades pel projecte *Flambeau*, Lee va seleccionar específicament dues proves dutes a terme respectivament en parcel·les aproximadament quadrades de 12 i 17,6 hectàrees, o el que és el mateix de 325 m i 397 m de longitud, respectivament. Aquestes proves consistiren en la crema simultània de piles de combustible disposades formant una malla d'elements fins a cobrir l'àrea de la parcel·la experimental. El combustible utilitzat foren les restes d'aclarida de les formacions vegetals existents en la mateixa àrea d'experimentació. El combustible es disposava de forma ordenada a la parcel·la amb certa anterioritat a les proves per tal que assolís valors d'humitat més o menys constants, de l'ordre del 15 %. Al llarg d'aquestes proves es dugueren a terme mesures de la temperatura i velocitat del gasos a diferents posicions de la parcel·la mitjançant torres amb diversos sensors col·locats a diferents altures.

Per a reproduir a una escala inferior aquestes proves, Lee va utilitzar dos tipus de models, que diferiren en l'element encarregat de simular la calor generada per l'incendi, resistències elèctriques i dolls de gas metà.

Així, Lee va dissenyar dos models elèctrics formats per matrius de resistències elèctriques agrupades formant en cada cas superfícies de 0,6 m² i 1,2 m², respectivament. A partir de les lleis d'escala, conegudes les dimensions dels models i de les proves a camp, juntament amb el flux de calor alliberat durant aquestes, es va calcular el flux de calor que havia d'alliberar cada model. Amb aquest valor es determinà el nombre i característiques de les resistències necessàries en cada cas, considerant que la calor alliberada pels models era igual a la calor dissipada elèctricament per les resistències, menys les pèrdues per radiació, assumint negligible la conducció cap al sòl. A més a més, en aquests models es va utilitzar dioctil ftalat, per a simular el fum de l'incendi.

Pel què fa al model de gas, es va construir una estructura de 1,2 m x 1,2 m, formada per una superfície de material aïllant, on es van fer diversos forats uniformement distribuïts, de manera que es va escalar la seva distància relativa d'acord a la disposició de les piles de combustible a les proves reals. En aquests orificis es van col·locar els dolls de gas metà.

Segons l'anàlisi desenvolupat per Byram (1966), tant la temperatura com la velocitat dels gasos haurien d'escalar amb l'arrel quadrada de la dimensió característica del sistema. Al comparar els resultats obtinguts als diferents models i els resultats de les proves de camp, Lee va observar la poca adequació del model de gas per a l'estudi de l'escalatge de la temperatura dels gasos. L'autor va atribuir aquest fet al probable escalatge incorrecte pel què fa als efectes radiatius del sistema experimental respecte del sistema a camp, ja que el model de gas presentà menys inèrcia tèrmica que els models elèctrics. Per tant, Lee va concloure que els models elèctrics eren més adients per a simular l'ambient convectiu que es genera en incendis de grans dimensions. A més, això li va permetre validar les lleis d'escala obtingudes per Byram (1966) en models de menors dimensions, demostrant en aquest cas la validesa de les hipòtesis realitzades.

L'estudi desenvolupat a Lee (1972) va servir com a base per a altres estudis en què també s'empraren models construïts a base de resistències elèctriques, com per exemple el treball d'Emori i Saito (1982). Aquests autors van emprar l'anàlisi dimensional i de semblança per a determinar les lleis d'escala per a construir un model d'escala reduïda d'un incendi forestal que causà importants danys personals, amb la finalitat d'analitzar les causes que van provocar un comportament extrem del foc i per tant de l'incident. Igual que en els treballs anteriors, l'atenció es centrà en l'escalatge del flux de l'incendi, de manera que es dugué a terme un escalatge de Froude, és a dir, que es consideraren negligibles les forces viscoses en comparació amb les forces d'inèrcia.

Un tret diferenciador d'aquest treball pel què fa a l'anàlisi dimensional, és que al aplicar el teorema de π , els autors van seleccionar com a dimensions fonamentals la longitud, el temps, la temperatura, la

força i el flux de calor, en comptes de la base dimensional típica $LMT\theta$. A més, van discriminar les variables lineals i vectorials segons les seves components axials x , y i z .

Les variables seleccionades per a aplicar l'anàlisi dimensional correspongueren a descriptors geomètrics, les components axials de la velocitat mitjana del flux, les components axials de la component de fluctuació de la velocitat del flux, la calor generada pel foc, la variació de densitat i temperatura del flux i l'acceleració de la gravetat.

La Taula 2.3 presenta les lleis d'escala obtingudes seguint la notació pròpia d'aquest treball. A partir d'aquestes lleis Emori i Saito van construir una maqueta simulant l'orografia del terreny en què transcorregué l'incendi amb un factor d'escala 1/2500. Per a mantenir la relació d'escala entre el flux de calor generat per unitat de superfície en l'incendi i en el model, van disposar diverses resistències elèctriques formant línies equivalents a la posició del front en diferents instants de temps segons dades d'observadors de l'incendi. Per tal de visualitzar el patró del flux generat pel foc durant els assaigs amb el model, van utilitzar gasos traçadors de fum.

Taula 2.3 Lleis d'escala derivades de les diferents tècniques d'escalatge utilitzades a Emori i Saito (1982).

Símbol	Variable	Símbol	Variable
L	Longitud característica	U_y	Component y de la velocitat mitjana del flux
L_x	Component x de la longitud característica	U_z	Component z de la velocitat mitjana del flux
L_y	Component y de la longitud característica	\tilde{v}_x	Component x de la component de fluctuació de U_x
L_z	Component z de la longitud característica	\tilde{v}_y	Component y de la component de fluctuació de U_y
q	Calor generada per unitat de superfície i temps	\tilde{v}_z	Component z de la component de fluctuació de U_z
U_x	Component x de la velocitat mitjana del flux	S_f	Gruix del front de flames

Lleis d'escala (Escalatge de Froude) on el superíndex ' indica el valor de la variable al model

$$\frac{L_x}{L'_x} = \frac{L_y}{L'_y} = \frac{L_z}{L'_z} = \frac{S_f}{S'_f} \quad [2.16]$$

$$\frac{q}{q'} = \left(\frac{L}{L'}\right)^{1/2} \quad [2.17]$$

$$\frac{U_x}{U'_x} = \frac{U_y}{U'_y} = \frac{U_z}{U'_z} = \frac{\tilde{v}_x}{\tilde{v}'_x} = \frac{\tilde{v}_y}{\tilde{v}'_y} = \frac{\tilde{v}_z}{\tilde{v}'_z} = \left(\frac{L}{L'}\right)^{1/2} \quad [2.18]$$

$$\frac{U_x}{\tilde{v}_x} = \frac{U'_x}{\tilde{v}'_x}, \quad \frac{U_y}{\tilde{v}_y} = \frac{U'_y}{\tilde{v}'_y}, \quad \frac{U_z}{\tilde{v}_z} = \frac{U'_z}{\tilde{v}'_z} \quad [2.19]$$

Després de realitzar diverses proves amb el model en un túnel de vent, Emori i Saito (1982) arribaren a la conclusió que el canvi de comportament podia tenir el seu origen en un remolí provocat pel propi foc, ja que observaren l'aparició d'aquest tipus de fenomen per a velocitats de flux entre 0,15 m/s i 0,50 m/s al model, que a la realitat equivaldrien a velocitats del vent entre 7,5 m/s i 25 m/s. En l'escala de Beaufort, aquests valors equivalen a vents de grau 4 a 10, és a dir, de vents moderats a temporals molt forts.

D'aquest treball, els autors conclouen que les lleis d'escala formulades i la tècnica d'escalatge que descriuen és útil per a predir la generació de remolins de foc. En aquest sentit, són diversos els estudis desenvolupats des de l'anàlisi dimensional per a estudiar el comportament dels remolins de foc i predir els valors crítics de les condicions que en provoquen la seva aparició (Soma i Saito, 1991; kuwana *et al.* 2008). No obstant, no s'entrarà més en detall en aquesta àrea, ja que no és objecte d'aquesta tesi l'estudi de la formació de remolins de foc.

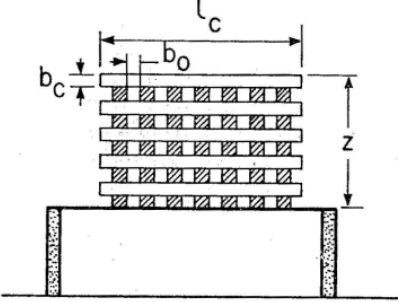
Emori i Saito (1982) va ser el primer treball de tota una línia enfocada a la determinació de les lleis d'escala per a diferents tipus d'incendis. Així, un any més tard els mateixos autors publicaren un altre treball (Emori i Saito, 1983), on proposaren lleis d'escala per a dos tipus de focs diferents, els incendis de bassals de líquids inflamables (*pool fires*) i els incendis de llistons de fusta (*crib fires*). Emori i Saito van escollir aquests tipus d'incendis ja que consideraven que constituïen la base de qualsevol incendi real. Tal i com ja s'ha comentat, els incendis de llistons de fusta han estat molt utilitzats en la recerca en incendis forestals. A banda, han estat també emprats per a simular altres tipus d'incendis com els incendis en recintes tancats. Un dels exemples més recents es pot trobar a Groce i Xin (2005) on s'utilitza l'anàlisi dimensional i de semblança.

Tot i que el treball realitzat a Emori i Saito (1983) analitza dos tipus d'incendis, només es farà referència en aquest text a la part d'aquest estudi relacionada amb el incendi de llistons de fusta, representatiu dels incendis forestals. Aquest tipus d'incendis consisteix en la crema d'estructures formades per llistons de fusta, disposats formant capes, de manera que s'obté una configuració porosa de combustible.

Per a obtenir les lleis d'escala pels incendis de llistons d'acord a les hipòtesis de l'escalatge de Froude per al cas estàtic, a banda d'emprar el teorema de π per a trobar els grups no dimensionals, els autors tingueren en consideració també hipòtesis físiques motivades per l'observació experimental (Taula 2.4). En aquest sentit, els autors apunten la importància de les característiques geomètriques en els incendis de llistons ja que en funció de la seva configuració, poden promoure turbulències, de manera que el flux roman turbulent en models de menors dimensions que en el cas de l'altre tipus d'incendis estudiat en el seu treball. En aquest cas, seguiren utilitzant la mateixa base dimensional que en el treball anterior.

Per a validar les lleis d'escala, construïren diversos models d'estructures de llistons de diferents longituds, concretament, 20 cm, 60 cm i 90 cm, geomètricament semblants i utilitzant sempre el mateix tipus de combustible. Els models de llistons es van condicionar prèviament als experiments per tal de garantir la mateixa humitat del combustible en tots els casos. A més, varen utilitzar també dades publicades a la bibliografia per altres autors.

Taula 2.4 Variables seleccionades i lleis d'escala obtingudes a Emori i Saito (1983).

Esquema de l'estructura de llistons (Emori i Saito, 1983)	Símbol	Variable
	b_0	Espai entre els llistons
	b_c	Gruix dels llistons
	P_R	Irradiància
	H	Altura de la flama
	l_c	Longitud dels llistons
	I_R	Intensitat radiant
	t	Instant de temps
	u_w	Velocitat del vent
	V	Velocitat de combustió
	z	Altura de l'estructura de llistons
ρ_p	Densitat de la fusta dels llistons	
Lleis d'escala (Escalatge de Froude) on el superíndex ' indica el valor de la variable al model		
$\frac{b_0}{b_0'} = \frac{b_c}{b_c'} = \frac{H}{H'} = \frac{z}{z'} = \frac{l_c}{l_c'} \quad [2.20]$		
$\frac{u_w}{u_w'} = \frac{t}{t'} = \frac{P_R}{P_R'} = \left(\frac{l_c}{l_c'}\right)^{1/2} \quad [2.21]$		
$\frac{I_R}{I_R'} = \frac{V}{V'} = \frac{\rho_p l_c^{5/2}}{\rho_p l_c'^{5/2}} \quad [2.22]$		

Els resultats obtinguts, tan a partir dels models experimentals com de la bibliografia, els van permetre validar les lleis d'escala pel què fa a la irradiància, la intensitat radiant i la velocitat de pèrdua de massa. Com a conclusions, Emori i Saito destacaren la necessitat d'establir el rang de validesa de les lleis d'escala plantejades.

Anys més tard i conjuntament amb altres autors, Emori i Saito van presentar un dels pocs treballs trobat a la bibliografia consultada que analitza el cas dinàmic amb l'objectiu de millorar el coneixement sobre les lleis d'escala en la propagació d'un front de flames sobre un pla horitzontal i sobre un pla inclinat (Emori *et al.*, 1988). Amb aquest treball els autors pretenien també estudiar fins a quin punt els conceptes d'escala desenvolupats prèviament per a focs estàtics eren aplicables a focs en moviment.

Per tal de desenvolupar les lleis d'escala en el cas de focs en moviment, Emori *et al.* (1988) varen fer un breu desenvolupament teòric sobre els aspectes generals dels processos físics que intervenen en els incendis forestals. Així, determinaren que la velocitat de gasificació del combustible es trobava controlada bàsicament pel balanç entre la calor de radiació i la calor de convecció que rep el combustible no cremat, la calor latent del combustible i la calor acumulada en el combustible no cremat associada a l'increment de temperatura. D'altra banda consideraren negligible la transferència de calor

per conducció entre el combustible cremat i el combustible no cremat. A més, no tingueren en compte tampoc la possible transferència de calor causada pel transport de partícules incandescentes. Aquest desenvolupament teòric els portà a determinar les principals forces i fluxos de calor involucrats en un incendi forestal, que utilitzaren posteriorment per a obtenir els grups no dimensionals.

L'obtenció de les lleis d'escala estigué lligada als diferents tipus de propagació que estudiaren, és a dir, en condicions sense vent ni pendent, i amb pendent. En el cas de fronts de flames bàsics –sense vent ni pendent– determinaren que la velocitat de propagació es troba controlada per la convecció natural generada. En contraposició, en els casos de fronts propagant pendent amunt, les forces d'empenyiment aerostàtic i d'inèrcia adquireixen importància en el control de la velocitat de propagació. A continuació, la Taula 2.5 recull les lleis d'escala obtingudes per ambdós casos. Per a obtenir aquestes lleis, els autors partiren de la hipòtesi que les proves es realitzarien utilitzant el mateix tipus de combustible i en les mateixes condicions ambientals, és a dir, que en aquest cas s'utilitzà també la tècnica de l'escalatge de Froude.

Taula 2.5 Lleis d'escala derivades del treball de Emori *et al.* (1988).

Símbol	Variable	Símbol	Variable
P_R	Irradiància	u	Velocitat horitzontal de l'aire o del gas
S_f	Gruix de flama	R	Velocitat de propagació
t	Instant de temps		

Lleis d'escala fronts de flama bàsics (Escalatge de Froude) on el superíndex ' indica el valor de la variable al model	
$\frac{u}{u'} = \left(\frac{S_f}{S_f'}\right)^{1/2}$	[2.23]
$\frac{R}{R'} = \frac{P_R}{P_R'}$	[2.24]

Lleis d'escala en presència de pendent (Escalatge de Froude) on el superíndex ' indica el valor de la variable al model	
$\frac{u}{u'} = \frac{R}{R'} = \frac{P_R}{P_R'} = \frac{t}{t'} = \left(\frac{S_f}{S_f'}\right)^{1/2}$	[2.25]

De les lleis d'escala obtingudes, és important destacar en el cas de fronts de flama bàsics, d'acord a l'eq. [2.24], que la velocitat de propagació ha d'escalar linealment amb la irradiància, però no té perquè necessàriament escalar amb l'arrel quadrada de la dimensió característica del sistema.

Per a validar les lleis d'escala, Emori *et al.* (1988) dissenyaren dues classes de models experimentals, que alhora reproduïen dos tipus diferents d'incendis, els incendis de branquillons (*stem fires*) i els incendis de prats i herbassars (*grassland fires*). Per a simular el primer tipus d'incendis, construïren models a base de tires de paper recobertes de cera i disposades sobre una superfície de material aïllant, mentre que per a reproduir l'altre tipus d'incendis utilitzaren estructures de llistons de fusta, tal i com ja empraren en treballs anteriors. Per a cada classe de model, Emori *et al.* (1988) construïren unitats de diferents mides, representant així diferents escales, però sempre mantenint la semblança geomètrica.

La Taula 2.6 resumeix les principals característiques pel què fa a les dimensions per cada tipus de model i en quines condicions es varen desenvolupar les proves.

Taula 2.6 Característiques dels models experimentals utilitzats a Emori *et al.* (1988).

Models de paper	
Nombre de models	3
Longitud característica	Longitud tires de paper: 5, 10 i 15 cm
Condicions d'experimentació	Inclinació de la superfície: 0°, 15°, 45° i 60°
Resultats	Altura i gruix de la flama, velocitat de propagació i irradiància mitjana
Models de llistons	
Nombre de models	5
Longitud característica	Altura = amplada del llit = 5, 8, 10, 15, 20 i 30 cm (secció quadrada)
Condicions d'experimentació	Inclinació de la superfície: 0° i 25°
Resultats	Velocitat de propagació i irradiància mitjana

En ambdós models es condicionava el combustible prèviament a la realització de les proves. En el primer cas, el paper per a construir el model s'assecava a l'estufa abans de recobrir-lo amb cera i en el segon cas, les estructures de llistons de fusta es mantenien en una cambra que permetia regular les condicions ambientals, durant com a mínim una setmana abans de dur a terme les proves. A més, és important precisar que en els models de llistons es mantingué sempre constant la densitat aparent del llit -12 kg/m^3 .

Dels resultats obtinguts en aquestes proves, Emori *et al.* (1988) analitzen les diferències entre ambdós tipus de models, causades principalment per la porositat del llit de combustible en el cas dels models de llistons, que té un efecte directe en la inclinació de la interfície de piròlisi. A banda, els resultats els permeteren validar la semblança geomètrica pel què fa a les dimensions de les flames per a inclinacions de la superfícies d'avanç del front fins a 45°. Pel què fa a la velocitat de propagació i la irradiància determinada en posicions geomètricament semblants seguien també les lleis d'escala, de manera que en absència de pendent, obtingueren que els valors d'aquestes variables eren independents de les dimensions dels models.

A banda, després de realitzar aquestes sèries de proves exploratòries al laboratori i amb models de petites dimensions, Emori *et al.* (1988) varen realitzar també proves a major escala en parcel·les formades per herbassars, d'aproximadament 17,5 m x 20 m. En funció de les característiques d'aquestes parcel·les construïren els corresponents models a escala, emprant els tipus configurats amb llistons de fusta, mantenint constant la densitat aparent i la humitat del combustible.

Els resultats d'aquestes proves els van permetre validar les lleis d'escala en models de majors dimensions. A més, atès l'interès que té la predicció de la velocitat de propagació per a focs de majors dimensions, els autors d'aquest treball varen plantejar senzills càlculs teòrics per a extrapolar les dades

obtingudes i determinar la velocitat que tindrien focs de 200 m i 1000 m de longitud, i comparar-les amb velocitats mesurades en incendis reals. Els valors determinats teòricament, foren coherents amb els valors mesurats en incendis reals, és a dir, del mateix ordre de magnitud. Nogensmenys, Emori *et al.* (1988) afirmaren que les lleis d'escala proposades en aquest treball tenen un límit, ja que és impossible que la velocitat de propagació del foc creixi indefinidament a mesura que creix el front de flames.

2.2. L'experimentació en incendis forestals

La recerca en incendis forestals s'ha recolzat, ja des del seu inici, en l'experimentació. Els motius són prou evidents, la rèplica a escala real dels incendis amb finalitats de recerca o la presa de dades durant aquest tipus d'emergències resulta una activitat complexa que a més pot generar certa controvèrsia social.

En l'experimentació en incendis forestals s'identifiquen habitualment dos escenaris experimentals, laboratori i camp. Tanmateix, molt sovint a la bibliografia s'utilitza el terme *escala* en lloc d'escenari per distingir entre l'experimentació realitzada a laboratori o a camp. De fet, en l'àmbit dels incendis forestals s'utilitza sovint el terme *escala* per a fer referència a diferents conceptes i a vegades fins i tot abusivament. Al llarg d'aquest treball el terme *escala* s'utilitzarà per a fer referència a les dimensions espacials o temporals d'un fenomen, mentre que el terme *escalatge* s'utilitzarà per referir-se a la transferència d'informació entre escales d'acord a les definicions de Wu i Li (2006).

A continuació es presenta un recull de l'experimentació desenvolupada en incendis forestals a laboratori i a camp amb l'objectiu de fer un repàs de com s'ha dut a terme l'experimentació per a tenir una visió global dels aspectes generals. No és doncs objecte d'aquest apartat fer una anàlisi exhaustiva de tota l'experimentació realitzada en aquest àmbit.

2.2.1. L'experimentació a laboratori

L'experimentació en incendis forestals duta a terme a laboratori té el seu origen als Estats Units, a principis del segle XX tot i que pren especial rellevància a partir dels anys 60. És important destacar el treball realitzat en aquest sentit en el marc del projecte anomenat *Fire Model* (Byram *et al.*, 1966), que s'inicià l'any 1960. En aquest projecte es varen dur a terme diversos programes experimentals per tal d'adquirir més coneixements sobre els mecanismes de propagació, sobre l'estructura de les flames difusives i sobre la significança d'algunes de les moltes variables que intervenen en la propagació d'un incendi forestal. Les proves experimentals que es realitzaren en aquest projecte compregueren focs estàtics en models de bassals de líquids inflamables i focs dinàmics en models de llistons de fusta. A més, es varen considerar també els possibles efectes del vent i del pendent en el temps de residència i en la velocitat de combustió. Tot i això, els mateixos autors reconegueren que amb els resultats obtinguts en els models experimentals utilitzats no es podia predir el comportament dels incendis a gran escala, però que la informació derivada era essencial per a desenvolupar lleis d'escala i determinar les característiques que havia de tenir un model experimental.

A banda d'aquests tipus de models experimentals, ja s'havien començat a utilitzar també models de llits configurats amb combustibles fins naturals com agulles de pi, fulles i restes de fusta en descomposició, ja que s'havia observat que és precisament en aquests tipus de combustibles en què s'inicien els incendis forestals i en què propaguen en el seu estadi inicial (Curry i Fons, 1938; Emmons, 1963; Fons, 1946). L'ús de combustibles naturals posà de manifest la dependència del comportament del foc amb les condicions ambientals i per tant del combustible. Precisament per això, l'experimentació es centrà en controlar les condicions ambientals i les característiques del combustible. Tanmateix, això provocà que s'utilitzessin models construïts seguint un determinat patró geomètric, com per exemple els llits configurats amb llistons de fusta (Bruce *et al.*, 1961; Thomas, 1958). No obstant, tal i com discuteixen Rothermel i Anderson (1966), la utilització d'aquest tipus de combustibles, tot i permetre la realització de rèpliques fàcilment, no representa la distribució aleatòria de combustible que es troba a la natura, ni tampoc la mida de partícula d'aquest. Així, Rothermel i Anderson (1966) varen estudiar l'efecte tant de la humitat del combustible com del vent en la propagació del foc mitjançant l'experimentació en llits d'agulles de pi distribuïdes aleatòriament.

Atesa la inquietud dels investigadors per a poder construir models el més semblants possibles a la realitat però que alhora fossin fàcilment reproduïbles, Schuette (1965), va establir una tècnica per a preparar llits d'agulles de pi uniformes i reproduïbles de forma que presentessin aproximadament les mateixes característiques quant a la combustió i la propagació del foc. Amb aquesta tècnica l'autor va establir un protocol per a construir models per a l'estudi de la velocitat de propagació del foc i també l'efectivitat dels productes retardants.

Tot i això, més endavant es seguiren utilitzant tant els models de llits format per combustibles naturals distribuïts aleatòriament, com els models de llits formats per llistons per a estudiar el comportament dels incendis forestals, però aquests darrers en menor mesura. A més a més, es poden trobar a la bibliografia treballs on s'utilitzaren models experimentals diferents als anteriors, en el sentit que s'empraren configuracions de combustible no contínues, és a dir, amb elements disposats de forma ordenada, però sense contacte entre ells, com per exemple escuradents. Exemples d'aquests treballs es poden trobar a Vogel i Williams (1970), Steward *et al.* (1977) i Wolff *et al.*, (1991) on a més s'estudia l'efecte de l'existència d'elements no combustibles intercalats entre les partícules de combustible.

A partir de mitjans dels anys 80 començà a créixer notòriament la recerca en incendis forestals a nivell d'Europa, de manera que diverses institucions van dissenyar instal·lacions de diferents característiques i equipades amb diferents sensors, per tal d'aprofundir en el coneixement dels factors que s'havien identificat com a claus en la propagació del foc –estat i tipologia de combustible, condicions ambientals, inclinació de la superfície d'avanç del foc i el vent. La Taula 2.7 presenta un recull de les instal·lacions experimentals més conegudes arreu d'Europa, Estats Units i Austràlia.

Taula 2.7 Especificacions de les principals instal·lacions d'experimentació en incendis forestals.

Centre de Recerca *	Tipus d'instal·lació (Àrea útil de crema)	Pendent	Vent	Models experimentals	Referències bibliogràfiques
INRA	Cambra de combustió (3,0 m x 9,0 m)	Sí	No	Llits d'agulles de pi (<i>Pinus pinaster</i> i <i>Pinus halepensis</i>)	Dupuy (1995) Dupuy (1997) Guijarro <i>et al.</i> (2003)
INIA	Túnel de vent obert (0,8 m x 8,0 m)	No	Sí	Llits d'agulles de pi (<i>Pinus pinaster</i> i <i>Pinus halepensis</i>)	Guijarro <i>et al.</i> (1997) Guijarro <i>et al.</i> (2003)
LEIF	Taula de combustió (3,0 m x 3,0 m)	Sí	No		
	Túnel de vent obert (2,6 m x 8,0 m) 0,5 m/s – 5,0 m/s	No	Sí	Llits d'agulles de pi (<i>Pinus pinaster</i>), palla de gramínies (<i>Triticum sp.</i>), restes de poda (<i>Eucaliptus</i>)	Viegas <i>et al.</i> (1998) Viegas <i>et al.</i> (2002) Rossa i Viegas (2009)
	Taula d'assaigs en congostos (6,0 m x 8,0 m)	Sí	No		
USDA	Cambra de combustió (1,0 m x 8,0 m)	No	No	Encenalls de fusta (<i>Populus trunulos</i>), Fusta de pi fins a 6 mm de gruix (<i>Pinus ponderosa</i>),	Catchpole <i>et al.</i> (1998)
	Túnel de vent obert (1,0 m x 4,6 m)	No	Sí	Agulles de pi (<i>Pinus ponderosa</i>)	
IST	Túnel de vent obert (0,7 m x 3,0 m)	Sí	Sí	Llits d'agulles de pi (<i>Pinus pinaster</i> i <i>Pinus halepensis</i>)	Mendes-Lopes <i>et al.</i> (2003) Guijarro <i>et al.</i> (2003)
CERTEC	Taula de combustió (1,6 m x 3,0 m)	No	No	Llits de palla de gramínies (<i>Hordeum vulgare</i> , <i>Triticum turgidum</i>) Llits d'agulles de pi (<i>Pinus halepensis</i>)	Pastor (2004) Pérez <i>et al.</i> (2006)
CSIRO	Túnel de vent tancat (2,0 m x 4,8 m) 0,008 m/s – 6,0 m/s	No	Sí	Llits de fullaraca (Fins a 2,5 kg/m ²)	Sullivan (2009b)

* **INRA**, Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes, Avignon, França. **INIA**, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Centro de Investigación Forestal, Madrid. **LEIF**, Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais, Lousã, Portugal. **USDA**, United States Department of Agriculture, Fire Science Laboratory, Missoula, MT, US. **IST**, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. **CERTEC**, Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Barcelona. **CSIRO**, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Canberra, Austràlia.

Tot i les diferències entre instal·lacions experimentals, totes elles presenten bàsicament les mateixes característiques quan a estructura i varien pel què fa a dimensions, sensors i capacitat per a simular diferents condicions de propagació.

En les darrera dècada, s'ha potenciat gràcies a projectes de recerca finançats per la UE, la interacció entre diferents grups de recerca per tal d'estandarditzar metodologies de mesura, compartir dades, etc.

Dos exemples són el projecte *FireStar* (EVG1-CT-2001-0041) i el projecte *Eufirelab* (EVR1-CT-2002-40028).

2.2.2. L'experimentació a camp

L'experimentació a camp en incendis forestals ha estat molt menys nombrosa que l'experimentació a laboratori. Els primers programes experimentals a camp s'iniciaren pràcticament al mateix temps als EU, Canadà i Austràlia, amb treballs consolidats a partir dels anys 60.

En el cas dels EU, l'experimentació a laboratori ha estat tradicionalment més destacada i nombrosa que l'experimentació a camp. Alguns dels estudis duts a terme a camp es poden trobar a Chandler (1957), Curry i Fons (1938) i Philpot (1965). Tanmateix, són més freqüents a la bibliografia els estudis relacionats amb les cremes prescrits i els seus efectes (Green, 1970; Fischer, 1978; Bruner i Klebenow, 1979).

Pel què fa a l'experimentació a camp al Canadà, es va centrar ja des del seu inici en l'estudi dels incendis en formacions de boscos de pins –*Pinus halepensis*, *Pinus resinosa*– (Van Wagner, 1963; 1973), de manera que ràpidament l'objectiu va anar derivant cap a l'estudi del comportament dels incendis de capçades, atesa l'elevada intensitat i rapidesa d'aquest tipus d'incendis. Alguns dels treballs més destacats en aquest sentit es poden trobar a Albini i Stocks (1986), Stocks (1987,1989) i Van Wagner (1977).

A Austràlia, la majoria d'estudis sobre incendis forestals han estat fonamentats en l'experimentació a camp, de manera que és un país amb un gran bagatge de coneixements en relació als programes experimentals en entorns naturals, lluny de les condicions estables de laboratori. Val a dir, però, que les característiques d'aquest país, amb una gran extensió de superfície, una baixa densitat de població i que a més a més està distribuïda bàsicament en les àrees costaneres ha afavorit que així fos. D'aquesta manera han estat desenvolupats models empírics i semiempírics a partir de dades obtingudes experimentalment. Per exemple, McArthur (1966, 1967) va desenvolupar un índex de risc per a herbassars i boscos (*Forest Fire Danger Index and Meter*) a partir del treball experimental realitzat entre els anys 50 i 60. A Cruz i Gould (2009) es pot trobar un breu recull dels principals programes experimentals a camp realitzats a Austràlia posteriorment al treball de McArthur.

A Europa, l'experimentació a camp s'inicià més tard, als anys 80 (Trabaud, 1979), amb l'excepció del Regne Unit on per exemple Wolliscroft va treballar durant diversos anys consecutius aprofitant programes de cremes controlades per a prendre mesures de la velocitat de propagació, longitud i gruix de flama i fluxos de radiació (Wolliscroft, 1966, 1967, 1969).

A la Taula 2.8 es resumeixen alguns detalls dels programes experimentals més recents desenvolupats tant a Europa com al Canadà i a Austràlia. Cal notar que en molts casos aquests programes sorgeixen de projectes en què participaren diversos grups de recerca, aprofitant així al màxim els recursos i perfils

de cada grup. A la Taula 2.8 únicament s'ha especificat el grup de recerca coordinador, però a les referències bibliogràfiques es pot trobar més informació en aquest sentit.

Taula 2.8 Especificacions dels principals programes experimentals en incendis forestals duts a terme a camp.

Centre de Recerca (*)	Dimensions parcel·les	Tipus de vegetació	Referències bibliogràfiques
ADAI	Amplada: 40 m fins a 100 m Llargada: 50 m fins a 160 m	Matollars (<i>Erica umbellata</i> , <i>Erica australis</i> i <i>Chamaespartium tridentatum</i>)	Viegas <i>et al.</i> (2002)
CIA	25 m x 25 m fins a 60 m x 80 m	Matollars (<i>Ulex sp.</i> , <i>Chamaespartium tridentatum</i> , <i>Erica umbellata</i> , <i>Erica australis</i>)	Vega <i>et al.</i> (1998) Vega <i>et al.</i> (2000)
CFS / ICFME	150 m x 150 m 100 m x 100 m 75 m x 75 m	Bosc compost per pins (<i>Pinus banksiana</i>) i Abets (<i>Picea mariana</i>)	Stocks <i>et al.</i> (2004)
CSIRO	100 m x 100 m, 200 m x 200 m	Herbassars (<i>Erichne sp.</i> , <i>Themenda australis</i>)	Cheney <i>et al.</i> (1993) Cheney i Gould (1995)
	200 m x 200 m	Bosc d'eucaliptus (<i>Eucalyptus sp.</i>)	Gould <i>et al.</i> (2007)
	250 m x 250 m, 800 m x 800 m	Bosc d'eucaliptus - matollars (<i>Eucalyptus sp.</i>), landes (<i>Ericaceae sp.</i>)	Myers <i>et al.</i> (2007) Plucinski <i>et al.</i> (2009)
SPE-UMR CNRS 6134	15 m x 15 m	Matollars (<i>Olea europaea</i> , <i>Arbutus unedo</i> , <i>Erica arborea</i>)	Santoni <i>et al.</i> (2006)
	30 m x 80 m		Morandini <i>et al.</i> (2006) Silvani <i>et al.</i> (2009) Silvani i Morandini (2009)
UTAD	Parcel·les quadrades d'entre 10 m i 15 m d'amplada	Estructures formades per matollars, fullaraca (principalment agulles de <i>Pinus pinaster</i>) i herba.	Fernandes <i>et al.</i> (2002)

(*) **ADAI**, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Indústria, Portugal. **CIA**, Centro de Investigación e Información Ambiental, Galicia. **CFS**, Canadian Forest Service / **ICFME**, International Crown Fire Modelling Experiment, Canadà. **CSIRO**, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Canberra, Austràlia. **SPE-UMR CNRS 6134**, Centre National de la Recherche Scientifique, Unité Mixte de Recherche, Sciences Pour l'Environnement, France. **UTAD**, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

Al igual com en les proves de laboratori, en els darrers projectes de recerca europeus (*FireStar* EVG1-CT-2001-0041 i *Eufirelab* EVR1-CT-2002-40028), s'ha fomentat el treball conjunt entre diferents grups d'investigació per a obtenir dades de major qualitat en l'experimentació a camp (Fernandes *et al.*, 2003). A banda dels programes experimentals purament amb objectius de recerca, també s'han dedicat esforços a coordinar les tasques de gestió de combustible desenvolupades per les agències forestals o cossos de bombers amb les de recerca (Pérez *et al.* 2005).

2.3. Conclusions

De la revisió bibliogràfica realitzada pel què fa als treballs que utilitzen l'anàlisi dimensional i/o de semblança en l'estudi dels incendis forestals, se'n poden extreure les següents conclusions. Aquesta primera part d'anàlisi bibliogràfica ha permès primerament prendre consciència de les possibilitats que presenten aquestes tècniques i de quin ús se n'ha fet en aquest àmbit. Així, s'ha posat de manifest que els nombres no dimensionals més utilitzats en incendis forestals han estat el nombre de N_c i el nombre de Fr , aquest darrer segons diferents formulacions. Ambdós nombres han estat relacionats tant amb l'angle d'inclinació de les flames com amb un determinat tipus de comportament del foc segons el valor que prenen. No obstant, no hi ha cap estudi concloent en aquest sentit. A banda, s'ha deixat constància de la utilitat d'aquestes tècniques en la modelització i correlació de dades experimentals, tot i la poca difusió que han tingut en l'àmbit dels incendis forestals.

Pel què fa als articles relacionats amb l'escalatge, la revisió bibliogràfica ha posat de manifest la manca de treballs, especialment pel què fa a l'anàlisi de models amb focs dinàmics, de manera que s'ha evidenciat que el grau de coneixement actual sobre les diferents escales de treball i la seva influència en els paràmetres que determinen el comportament d'un incendi forestal és molt bàsic i insuficient per a poder establir la validesa de l'extrapolació de resultats obtinguts en diferents escales.

Pel que respecta estrictament a la tècnica de l'anàlisi dimensional, ha quedat clar que independentment del procediment utilitzat per a determinar els grups π , és necessari tenir un nivell de coneixement avançat sobre el fenomen d'estudi ja que d'una banda, l'elecció adient de les variables o la adequada formulació de les equacions de conservació, és fonamental per a assolir bons resultats en l'ús d'aquesta tècnica. D'altra banda, aquest nivell de coneixement és essencial per a evitar l'aparició dels anomenats efectes d'escala, és a dir, el canvi en la significança d'alguns grups π o magnituds, que a gran escala no tenen importància, però que al reduir l'escala esdevenen suficientment significatius com perquè no es puguin menystenir. Aquests efectes únicament es poden eludir augmentant les dimensions del model experimental.

A més, ha quedat clar que no és possible realitzar un escalatge complet dels incendis forestals, i cal realitzar hipòtesis per tal d'arribar a un escalatge parcial. D'entre les diferents possibilitats que presenta l'escalatge parcial, l'estratègia més emprada ha estat l'anomenat escalatge de *Froude* o escalatge estàndard. Aquest tipus d'escalatge deriva entre d'altres en les següents lleis d'escala generals (eq. [2.26]):

$$\ell_i \sim L; t \sim v_i \sim L^{1/2} \quad [2.26]$$

On L és la longitud característica del sistema, ℓ_i qualsevol dimensió lineal del sistema, t qualsevol variable temporal i v_i fa referència a les velocitats associades al sistema. De manera que les dimensions lineals escalen linealment amb la longitud característica del sistema, i els temps i velocitats característiques ho fan amb l'arrel quadrada de la longitud característica.

A banda, remarcar que aquesta anàlisi ha mostrat també la importància de desenvolupar programes experimentals a diferents escales per a obtenir dades que permetin validar les hipòtesis necessàries per a plantejar les lleis d'escalatge parcial i determinar així el rang de validesa de les lleis plantejades.

En relació a l'experimentació que es duu a terme en incendis forestals, la revisió de la literatura ha permès determinar que els models experimentals que s'utilitzen normalment a laboratori per a l'estudi de la propagació i comportament dels incendis forestals són llits de combustible, configurats generalment per agulles de pi, palla, listons de fusta o encenalls. A més, en general, aquests llits són considerats homogenis i isòtrops, és a dir, que estan formats per les mateixes partícules disposades sense cap direcció preferencial. D'altra banda, l'experimentació a camp es duu a terme en diferents formacions vegetals, principalment matollars.

De l'anàlisi conjunta d'ambdues parts de la bibliografia, ressalta la diferència existent entre l'experimentació que es realitza habitualment a laboratori, amb l'experimentació realitzada en els treballs relacionats amb l'escalatge. D'aquesta manera, en aquests treballs d'escalatge han estat implementats models per a simular incendis a petita escala seguint les lleis d'escala que poc tenen a veure amb les proves que es fan normalment a laboratori. Tot i això, coincideixen en el fet que ambdós tipus de proves es realitzen en les mateixes condicions ambientals i de pressió en què tenen lloc els incendis forestals. Per tant, es podria dir que en certa manera es segueix l'escalatge de Froude en l'experimentació en incendis, estratègia aquesta que no permet realitzar un correcte escalat de radiació i convecció.

Per tant, no existeix a la bibliografia cap estudi en què s'hagin aplicat les lleis d'escala derivades de l'escalatge de Froude, ateses les condicions d'experimentació habituals, als models normalment utilitzats en l'experimentació de laboratori per tal d'estudiar la validesa de l'extrapolació de resultats a una escala diferent a la que han estat obtinguts. Atesa la llunyania entre els models experimentals de laboratori i de camp en l'àmbit dels incendis forestals, aquest fet esdevé crític en el cas de l'experimentació a laboratori.

De les conclusions d'aquesta revisió bibliogràfica n'han derivat els objectius d'aquesta tesi que es presenten a continuació en el següent apartat.

2.4. Objectius de la tesi

L'objectiu general d'aquesta tesi és contribuir a l'estudi del canvi d'escala en l'experimentació en incendis forestals pel què fa al comportament del foc, mitjançant les tècniques de l'anàlisi dimensional i de semblança. Aquest objectiu s'assolirà a partir de la consecució de les següents fites específiques:

- Anàlisi de les variables que determinen el comportament d'un incendi forestal en els diferents escenaris experimentals –laboratori i camp.
- Aplicació de l'anàlisi dimensional, mitjançant el teorema de *Vaschy-Buckingham* o teorema de π , al problema de la propagació en règim estacionari d'un front de flames en un llit de combustible vegetal formant un conjunt porós, en les següents condicions (Figura 2.1):
 - Propagació d'un front de flames bàsic (sense l'efecte del vent i/o pendent)
 - Propagació d'un front de flames sota l'efecte del pendent
 - Propagació d'un front de flames sota l'efecte del vent

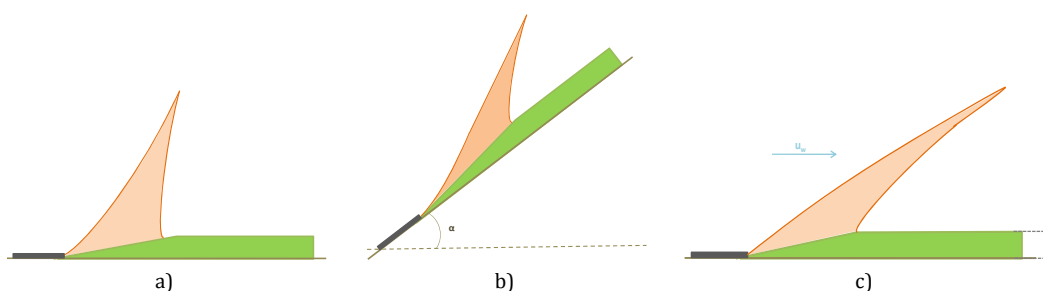


Figura 2.1 Condicions de propagació. a) Front de flames bàsic. b) Front propagant pendent amunt. c) Front conduït pel vent.

- Determinació de les lleis d'escala per a les diferents variables que caracteritzen la propagació d'un incendi forestal.
- Disseny de programes experimentals de laboratori d'acord a les lleis d'escala.
- Validació de les lleis d'escala a laboratori a partir dels resultats experimentals.

En els capítols següents s'aborden amb detall cadascun dels passos que es dugueren a terme per assolir els objectius plantejats.

3. ESTUDI DE VARIABLES

El primer pas per aplicar el teorema de *Vaschy-Buckingham* o teorema de π , és determinar la llista mínima de variables que permeten caracteritzar completament el fenomen d'estudi. El procés per a fer aquesta selecció de variables és sempre complex i requereix d'un ampli coneixement del fenomen a estudiar. En el cas dels incendis forestals, a aquest problema s'hi afegeix el fet que algunes de les variables que s'utilitzen normalment per a descriure el comportament dels incendis forestals no es troben unívocament definides a la bibliografia (Wilson, 1990). En certa manera, això és degut a un altre factor, i és que les diferències entre els escenaris d'experimentació, escales d'observació i/o models experimentals en incendis forestals són prou significatives, de manera que sovint la definició d'aquestes variables es troba lligada a les condicions en què es duu a terme l'experimentació i per tant en què són determinades.

Així, aquest capítol pretén donar una visió global de les variables que descriuen la propagació d'un incendi forestal en funció de diferents models experimentals. Per a això, el primer apartat està dedicat precisament a identificar i caracteritzar els models experimentals més habitualment emprats en l'experimentació en incendis forestals d'acord a la revisió bibliogràfica realitzada al capítol 2. Tot seguit, es descriuen les variables que afecten a la propagació dels incendis, agrupades segons factors com les propietats del combustible o les condicions ambientals i del terreny. A més, s'afegeixen també les variables que descriuen el comportament dels incendis, és a dir, indicadors del comportament, característiques geomètriques del front, de la flama i del plomall. La descripció d'aquestes variables inclou també un estudi del rang de valors que poden assolir en els diferents models experimentals, en base a les dades presents a la bibliografia, i una anàlisi del seu paper en el comportament i/o propagació d'un incendi forestal.

3.1. Escales, escenaris i models experimentals

Els termes escala i escenari experimental sovint s'utilitzen indistintament en l'àmbit dels incendis forestals conduint a confusions. Tanmateix, el terme *escala* es refereix tant a les dimensions espacials com temporals d'un fenomen, mentre que el terme *escenari experimental* es refereix al lloc o entorn en què es desenvolupa l'experimentació. Pel què fa al terme *model experimental*, en l'àrea de l'anàlisi dimensional i de semblança es defineix com la representació simplificada d'un fenomen en una escala diferent a la que aquest té lloc normalment.

Els incendis forestals abasten diverses escales d'acord als diferents processos que es veuen involucrats en la propagació del foc, tal i com es pot observar a la Taula 3.1 (Simard, 1991). Tot i això, en aquesta tesi no es pretenen abordar tots els processos que tenen lloc en un incendi forestal sinó únicament aquells directament lligats al comportament del foc, és a dir, d'acord a la Taula 3.1, es pretén abastar fins a l'escala sensorial. Així doncs aquest treball es centrarà en l'estudi del comportament del foc, entès com el conjunt de processos que tenen lloc en l'escala temporal de l'ordre d'hores i en l'escala espacial de l'ordre de km² (Simard, 1991).

Taula 3.1 Categories d'escales segons les característiques i processos d'un incendi forestal (Simard, 1991).

Classificació per escales	Característiques del foc, processos i influències
Micro	Flux d'energia, piròlisi, actitud personal
Mecànica	Temperatura, radiació, ignició, comportament individual
Sensorial	Observacions meteorològiques, comportament del foc, extinció, activitats humanes
Meso	Pertorbació atmosfèrica, risc d'incendi, supervisió
Sinòptica	Front fred, severitat, mobilització, producció
Estratègica	Sequera, campanya d'incendis, planificació, pressupost
Macro	Clima, ecologia del foc, política en temes d'incendis, govern
Global	Canvi climàtic, anàlisi històrica d'incendis, tractats

En aquest sentit, els processos que determinen el comportament d'un incendi són diversos i presenten escales temporals i espacials distintes, de manera que estudiar la interacció entre tots ells és una tasca altament complexa.

La Taula 3.2 recull el resum dels principals processos i components que segons Sullivan (2009a) ocorren en un incendi forestal, així com també el rang temporal i espacial en el que operen. Aquests processos comprenen des dels fonaments de les reaccions de combustió fins a la formació de focus secundaris pel transport de partícules incandescentes al llarg del plomall. Cal recordar que Sullivan (2009a) descriu els incendis forestals com la combinació de l'energia alliberada en forma de calor degut a les reaccions –principalment d'oxidació– que tenen lloc en el procés de combustió, el transport d'aquesta energia cap al combustible no cremat i la subsegüent ignició d'aquest. Per tant, la Taula 3.2

recull únicament els processos lligats al comportament del foc, que tal i com ja s'ha dit són en els que se centra aquesta Tesi.

Taula 3.2 Principals components i processos biològics, físics i químics que tenen lloc en un incendi forestal i de les escales espacials i temporals en les que operen (Sullivan, 2009a).

Procés	Escala temporal [s]	Escala vertical [m]	Escala horitzontal [m]
Reaccions de combustió	0,0001 - 0,01	0,0001 - 0,01	0,0001 - 0,01
Partícules de combustible	-	0,001 - 0,01	0,001 - 0,01
Complex de combustible	-	1 - 20	1 - 100
Flames	0,1 - 30	0,1 - 10	0,1 - 2
Radiació	0,1 - 30	0,1 - 10	0,1 - 50
Conducció	0,01 - 10	0,01 - 0,1	0,01 - 0,1
Convecció	1 - 100	0,1 - 100	0,1 - 10
Turbulència	0,1 - 1000	1 - 1000	1 - 1000
Focus secundaris	1 - 100	1 - 3000	1 - 10000
Plomall	1 - 10000	1 - 10000	1 - 100

D'altra banda, en l'experimentació en incendis forestals s'identifiquen habitualment dos escenaris experimentals –laboratori i camp. En ambdós tipus d'escenaris s'hi poden dur a terme diferents tipus de programes experimentals, emprant diferents models experimentals (vegeu capítol 2).

Quan es parla de model experimental en incendis forestals, hom es refereix bàsicament a la representació que es fa del combustible i que sustentarà la combustió. De manera que en funció del tipus de propagació que es vulgui estudiar es poden introduir factors com el vent o la inclinació de la superfície on es disposa el combustible. Tal i com ja s'ha vist en l'anàlisi bibliogràfica del capítol 2, tradicionalment en l'experimentació a laboratori han estat emprats com a models, llits de combustible vegetal de fàcil caracterització, per tal d'eliminar l'aleatorietat que presenta aquest factor a la natura, alhora que simplificar-ne l'estructura –presència de diferents estrats de combustible. En el cas de l'experimentació a camp, generalment aquesta s'ha dut a terme *in situ* en parcel·les de terreny forestal amb diferents tipus de cobertes vegetals –matollars, prats, pinedes, etc.

Per tal de dur a terme l'anàlisi de variables i d'acord a la revisió de la literatura realitzada al capítol 2, s'han identificat els models més habitualment utilitzats en l'experimentació en incendis forestals:

- Els llits no naturals de combustible vegetal.
- Les formacions vegetals simples.
- Les formacions vegetals complexes.

A continuació es descriuen en detall cadascun d'aquests models. És important destacar que no s'ha de confondre aquests models experimentals amb els models de combustible detallats al capítol 1. Tot i

això, en alguns casos es poden assimilar. En els casos en què és així a la descripció que segueix s'ha especificat.

Llits no naturals de combustible vegetal

Aquest tipus de complex de combustible, típic de l'experimentació a laboratori, es caracteritza per estar format normalment per una única espècie vegetal, de manera que les partícules de combustible, generalment combustible fi¹ mort, es troben distribuïdes uniformement al llarg de tota la superfície d'experimentació, que coincideix amb la superfície del llit de combustible (Figura 3.1). Habitualment s'utilitza com a combustible agulles de pi o palla. Aquest tipus de complex de combustible és el més senzill de caracteritzar en relació als altres models identificats.



Figura 3.1 Exemple de llit de combustible no natural. a) Imatge d'un llit. b) Detall de les partícules que configuren el llit.

Formacions vegetals simples

El terme formació vegetal simple fa referència en aquest treball a les formacions vegetals naturals de tipus matollar, herbassar, prat, camp de conreu, etc. Aquest tipus de formació doncs, és una de les possibles que es poden trobar en l'experimentació a camp. Dins d'aquest tipus de formacions vegetals se'n poden distingir dos subtipus, que es detallen tot seguit.

Subtipus I: Prats, herbassars i conreus

Aquest tipus de formació vegetal simple és la més semblant als llits de combustible descrits a l'apartat anterior, és a dir, als llits normalment utilitzats en l'experimentació a laboratori (Figura 3.2). Les principals característiques genèriques d'aquestes estructures són:

- El combustible disponible presenta una estructura vertical integrada únicament per l'estrat herbaci, de manera que es pot considerar com a combustible fi.
- L'estructura horitzontal del complex de combustible és contínua, és a dir, el recobriment de vegetació del sòl és superior al 95 %.

¹ **Combustible fi:** S'anomena combustible fi a la fracció de partícules que presenten un diàmetre inferior a 6 mm.

- La distribució del combustible en la superfície d'estudi (o parcel·la) és homogènia.
- Es pot considerar que únicament existeix una espècie vegetal. No obstant, pel què fa a l'estat de combustible, tot i estar viu pot estar compostat per un percentatge de material mort.



a)



b)

Figura 3.2 Exemple d'una formació vegetal simple subtipus I. a) Camp de conreu. b) Detall de les partícules que configuren el complex de combustible.

Aquest tipus d'estructures es poden assimilar als models de combustible 1 i 3 pertanyent al grup de les pastures (vegeu el capítol 1).

Subtipus II: Matollars

D'acord a l'inventari ecològic i forestal de Catalunya (Burriel *et al.* 2002), s'entén per matollar aquell terreny amb un recobriment de capçades d'espècies arbustives igual o superior al 20 % i amb un recobriment de les espècies arbòries inferior al 5 %. La resta del terreny pot estar cobert d'espècies herbàcies o pot estar nu. En relació als models de combustible presentats al capítol 1, aquest subtipus de formacions vegetals es poden assimilar als models de combustible 5, 6 i 7 del grup de matollar. A continuació es detallen les característiques generals d'aquest subtipus de formacions vegetals simples:

- El complex de combustible presenta una estructura vertical integrada per l'estrat herbaci i l'estrat arbustiu.
- L'estrat arbustiu està format per espècies arbustives, espècies arbòries que pel seu estat de desenvolupament formen part de l'estrat arbustiu (plàntules o plançons)².
- Les partícules que configuren el combustible de l'estrat arbustiu presenten diferents classes diametral –inferior a 0,6 cm, 0,6 cm - 2,5 cm, i 2,5 cm - 7,6 cm–.
- Poden existir diferents espècies vegetals repartides al llarg del complex vegetal.
- La vegetació pot presentar un percentatge variable de partícules mortes.

² **Plàntula:** Arbre de rebrot o de llavor de diàmetre normal inferior a 2,5 cm. Aquests arbres formen el que s'anomena regeneració.

Plançó: Arbre de rebrot o de llavor de diàmetre normal entre 2,5 cm i 5,0 cm.

Diàmetre normal: Diàmetre del tronc d'un arbre mesurat a 1,30 m per sobre del terra.

La Figura 3.3.a mostra un exemple d'una parcel·la d'experimentació recoberta amb aquest subtipus de formació vegetal, alhora que la Figura 3.3.b mostren en detall les partícules que la configuren.

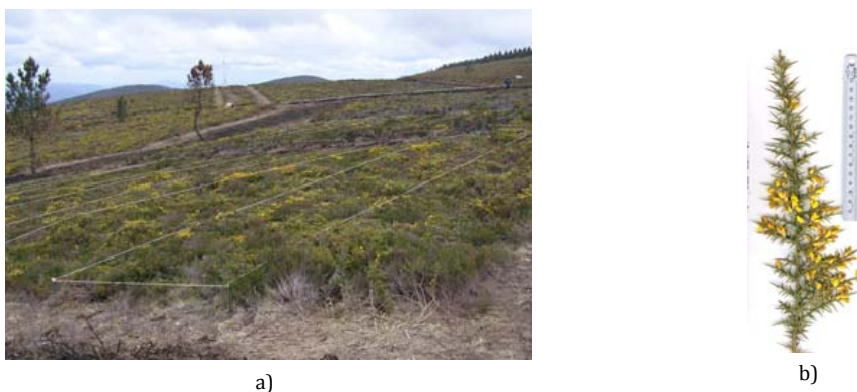


Figura 3.3 Exemple d'una formació vegetal simple subtipus II. a) Matollar. b) Detall de les partícules que configuren el complex de combustible.

D'acord als requisits experimentals els investigadors generalment seleccionen àrees per a l'experimentació que presentin una continuïtat de vegetació elevada –preferiblement superior al 90 %– amb cobertures de vegetació el més homogènies possible.

Formacions vegetals complexes

S'entén per una formació vegetal complexa, una formació boscosa on hi són presents els diferents estrats vegetals. La Figura 3.4 mostra imatges de dos exemples d'aquest tipus de formacions naturals.



Figura 3.4 Exemples de formacions vegetals complexes. a) Formació boscosa amb continuïtat vertical entre els diferents estrats de vegetació. b) Formació boscosa composta pels estrats herbaci i arbori.

A partir d'aquestes imatges es pot deduir el gran ventall de configuracions que poden presentar aquest tipus de formacions vegetals, i per tant la dificultat que implica la seva caracterització.

En funció de la tipologia d'incendi –sòl, superfície o capçades– els estrats vegetals involucrats en la combustió variaran. Els incendis de superfície, objecte d'aquest treball, involucren únicament combustible de superfície (Figura 3.5). Dintre d'aquesta categoria de combustible s'inclouen les espècies arbustives, les espècies arbòries que pel seu grau de desenvolupament encara no han assolit una fase madura i formen part de l'estrat arbustiu (el regenerat), l'herba, la virosta i el material mort. Per tant, d'ara endavant quan es faci referència a les característiques d'aquest tipus de formacions, únicament es tindrà en compte el combustible de superfície.

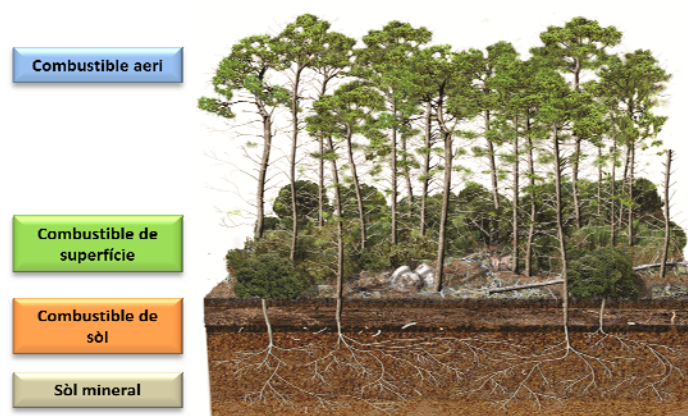


Figura 3.5 Classificació dels combustibles segons l'estrat vertical en el que es troben.

3.2. Variables que descriuen el combustible

Tal i com s'ha especificat al capítol 1, el combustible és un factor clau en la propagació del foc, ja que determina l'energia potencial que es pot alliberar durant un incendi. D'aquesta manera, una informació precisa de les propietats del combustible forestal en una elevada resolució espacial i temporal és imprescindible per a entendre els processos que intervenen en l'inici i propagació dels incendis forestals (Allgöwer *et al.*, 2002).

Tot i que la descripció del combustible en els models experimentals identificats a l'apartat anterior es pot fer utilitzant les mateixes variables en tots els casos, les definicions d'aquestes variaran. En aquest sentit, les principals diferències a l'hora de definir les variables que caracteritzen el combustible en els diferents models experimentals venen determinades per la presència de diferents espècies, de partícules de diferents classes diametral i pel grau d'uniformitat en la distribució de combustible. Cal recordar que aquest estudi està enfocat a la posterior aplicació de la tècnica de l'anàlisi dimensional de forma que és desitjable obtenir un únic valor per cada variable en cada escala.

Pel què fa a les diferències en els dominis experimentals que presenten aquestes variables, lògicament en el cas de les formacions vegetals simples i complexes aquests queden determinats pels valors que

presenten aquestes estructures de vegetació a la natura, mentre que en el cas dels llits no naturals, l'experimentador té un marge de llibertat més gran.

A continuació, es descriuen les variables que caracteritzen el combustible, distingint entre les variables que caracteritzen les partícules i les que caracteritzen el complex de combustible. No obstant, en funció del model experimental, aquesta classificació pot variar ja que quan el combustible presenta únicament partícules d'una mateixa classe diametral i forma –llits no naturals de combustible vegetal i formacions simples subtipus I (prats, herbassars i conreus)– algunes de les seves propietats caracteritzen alhora a tot el conjunt de combustible.

3.2.1. Variables que descriuen les partícules de combustible

Les propietats de les partícules de combustible tenen un efecte directe en la humitat del combustible, la transferència de calor, la ignició i la combustió. D'acord al capítol 1, les partícules de combustible es poden descriure a partir de les següents variables:

- Gruix característic (diàmetre)
- Relació superfície - volum
- Densitat de partícula
- Poder calorífic
- Humitat del combustible

De la llista anterior de variables, les quatre primeres corresponen a característiques pròpies d'una espècie vegetal i/o d'un tipus de partícula –fulles, acícules, branques, etc.–, mentre que la resta depenen d'altres factors i per tant el seu valor no és constant.

Gruix característic (diàmetre)

La definició específica d'aquesta variable depèn de la geometria de la partícula. Així per exemple el gruix característic es correspon al diàmetre de partícules esfèriques o cilíndriques; al costat de la secció transversal quadrada de partícules prismàtiques esveltes, etc.

En general, les partícules que configuren el complex de combustible es classifiquen d'acord a diferents classes diametral (o gruix característic), relacionades amb el temps de resposta del combustible (vegeu Taula 1.2) i per tant amb el paper que juguen en la propagació del foc. En aquest sentit, diversos autors (McArthur, 1962; Cheney, 1990; Burrows, 1995) afirmen que el diàmetre dels combustibles forestals que contribueixen a una millor propagació d'un incendi forestal està al voltant dels 0,6 cm. A més a més, la fracció de combustible fi, és a dir amb un diàmetre inferior a 0,6 cm, és especialment rellevant en les fases d'inici i creixement d'un incendi.

Pel què fa als combustibles gruixuts –diàmetres iguals o superiors a 7,6 cm– tenen un efecte reduït en la propagació dels incendis de superfície (Cruz, 2004), però la calor que alliberen aquests combustibles

per darrera del front de flames pot contribuir a altres aspectes del foc com a la ignició de les copes del arbres, a l'increment del flux d'energia generat pel foc o P_f (Byram, 1959; Nelson, 2003) o a l'increment de la dificultat per a extingir el foc (Sullivan *et al.*, 2002).

En el cas dels llits vegetals no naturals i de les formacions vegetals simples subtipus I, compostats per partícules fines, es pot considerar que les partícules són iguals i donar un únic valor mitjà d'aquesta variable. En la resta de models experimentals –formacions vegetals simples subtipus II i formacions vegetals complexes– en què es poden trobar partícules de diferents classes diametral, caldrà tenir en compte la fracció de combustible corresponent a cada una de les classes diametral. En cas de la presència de combustible gruixut, en l'estudi dels incendis de superfície es podria menystenir la seva contribució.

Relació superfície-volum

La relació superfície-volum és una variable que dóna informació sobre la mida i forma de les partícules de combustible i per tant és una variable relacionada amb el diàmetre o gruix característic de la partícula. Mesurar la grandària i forma dels combustibles resulta difícil per la gran variabilitat que presenten. En general però, per a combustibles amb una forma que es pugui associar a un cilindre, la relació superfície-volum, es pot determinar amb l'eq. [3.1] (Arnaldos *et al.*, 2004):

$$\sigma_s = \frac{4}{d_c} \quad [3.1]$$

Tal i com s'ha vist al capítol 1, les partícules petites tenen una superfície gran comparada amb el seu volum, s'assequen més ràpidament i també són més fàcils de cremar, influint així en la velocitat de propagació. Precisament per això, aquesta variable és sovint un paràmetre d'entrada en models de comportament del foc.

Segons Byram (1959) la mida de la partícula i per tant la relació superfície-volum de la partícula té un major efecte en focs de baixa intensitat, com els que es reproduïxen al laboratori en llits de combustible no naturals. D'altra banda, Cheney *et al.* (1993) observaren que en el cas dels incendis en herbassars i pastures (assimilables a formacions vegetals simples subtipus I), la relació superfície-volum de les partícules semblava tenir un efecte negligible en la propagació d'aquest tipus d'incendis. Per això, i tenint en compte les dificultats pràctiques per a mesurar la relació superfície-volum de les diferents espècies, els autors consideren que l'espècie vegetal i per tant la relació superfície-volum de les partícules es pot menystenir en aquests tipus d'incendis.

Al igual que pel gruix característic, la relació superfície-volum, en el cas dels llits vegetals no naturals i de les formacions vegetals simples subtipus I, compostats per partícules fines, es pot considerar un únic valor mitjà d'aquesta variable. En la resta de models experimentals –formacions vegetals simples subtipus II i formacions vegetals complexes– en què es poden trobar diferents valors caldrà tenir en

compte no només la fracció de combustible corresponent a cada una de les classes diametral, sinó que també la fracció corresponent a cada tipus de partícula –agulles, fulles, troncs, etc.

Densitat de partícula

La densitat de partícula, tal i com s'ha vist al capítol 1, s'expressa generalment en base seca, ja que tant la massa com el volum de la partícula varien en funció de la humitat. Aquesta variable, depèn també de l'espècie vegetal i del tipus de partícula, però no depèn pròpiament del model experimental.

Catchpole *et al.* (1998) determinaren a partir de les observacions en proves realitzades a laboratori, que la densitat de partícula afectava a la velocitat de propagació del foc, de manera que a major densitat de partícula menor era la velocitat d'avanç del foc. Pel què fa a l'experimentació a camp, no s'ha trobat a la bibliografia cap treball en què s'analitzi l'efecte d'aquesta variable en la propagació.

Pel què fa a la definició d'aquesta variable en funció del model experimental, en el cas dels models compostats per un únic tipus de partícula es pot assumir un valor característic pel tipus de partícules utilitzades, mentre en la resta de models experimentals, caldrà considerar la presència de diferents espècies vegetals i també dels diferents tipus de partícules.

No obstant, tal i com s'ha vist al capítol 1, la densitat dels combustibles forestals es troben normalment entre 320 – 750 kg/m³, de manera que el seu rang de variació no és gaire elevat.

Poder calorífic

El poder calorífic és una variable que fa referència a la quantitat d'energia que s'allibera durant l'incendi (vegeu capítol 1), de manera que en un incendi forestals és un paràmetre clau per avaluar-ne la seva intensitat. Així, el poder calorífic representa un element indispensable en el procés de modelització del comportament d'un incendi.

Tal i com s'ha vist al capítol 1, el poder calorífic es pot expressar com a *poder calorífic superior (PCS)* o *poder calorífic inferior (PCI)*, en funció si es considera o no la calor d'evaporació del contingut d'humitat que contingui la mostra, i de la que es desprèn durant la reacció de combustió.

El valor que presenta aquesta variable no depèn del model experimental. En aquest sentit, el poder calorífic depèn de l'espècie vegetal, del tipus de partícula, i de la humitat del combustible. El general, es considera que els combustibles forestals tenen un poder calorífic comprès entre 17000 i 22000 kJ/kg, de manera que es pot considerar com a pràcticament constant.

La Taula 3.3 mostra exemples dels valors que assoleix tant el poder calorífic superior com l'inferior per a diferents tipus de combustibles.

Taula 3.3 Valors que presenta el poder calorífic superior i inferior per a diferents espècies vegetals (Pastor, 2004).

Tipus de combustible	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
Fusta de pi	21290	--
Espècies forestals genèriques	20000	18600
Palla de cereal genèric	17040	15060

Humitat del combustible

El contingut hídric dels combustibles forestals és un factor molt important en la propagació d'un incendi forestal. La humitat del combustible influeix d'una banda a la velocitat de combustió, ja que part de la calor alliberada pel foc ha de vaporitzar la humitat del combustible abans que aquest pugui entrar en ignició. D'altra banda, la presència de vapor d'aigua redueix enormement la radiació de calor d'una flama de tipus difusiu –fet que afecta també a la velocitat de propagació–, i és que segons King (1973), la presència d'humitat redueix l'emissivitat de les flames.

Byram (1959) determinà que l'efecte més important de la humitat del combustible a l'hora de reduir la velocitat de combustió es podia descriure com un procés de suavització en què el vapor d'aigua procedent del combustible dilueix l'oxigen present a l'aire que es troba al voltant del combustible. Per continguts d'humitat molt elevats, la pressió del vapor d'aigua calent procedent del combustible és aproximadament igual a la pressió atmosfèrica. La suma de les pressions de tots els gasos (oxigen, nitrogen, diòxid de carboni i vapor d'aigua) del voltant del combustible ha de ser igual a la pressió atmosfèrica, llavors això provoca que la major part de l'oxigen i també la resta de gasos siguin exclosos de l'espai adjacent al combustible. D'aquesta manera, la combustió dels gasos inflamables no pot tenir lloc en aquestes condicions. Per tant, l'efecte suavitzador de l'aigua o qualsevol altre gas inert en la combustió està estretament relacionat amb els límits d'inflamabilitat. A més a més, Byram (1959) observà també que atès que els productes de la reacció de combustió han de compartir part de la seva energia amb la humitat evaporada del combustible, hi ha una reducció significativa en la temperatura de la flama. Anderson (1969) arribà conclusions similars a les de Byram (1959) a partir de diversos assaigs de laboratori.

A l'apartat 1.1.4 s'ha explicat detalladament de què depèn la humitat del combustible, i s'ha vist que en el cas dels combustibles morts la humitat és sempre inferior al 30 %, mentre que en els combustibles vius, pot variar entre el 30 % i el 300 %. No obstant, cal apuntar que després de l'anàlisi bibliogràfica duta a terme al capítol 2, s'observà que en l'experimentació a laboratori en llits no naturals de combustible vegetal, els valors més habituals d'humitat estan compresos entre el 8 % i el 15 %, a excepció d'aquells casos en què el combustible és assecat a l'estufa, de manera que llavors la humitat del combustible oscil·la entre el 2 % i el 5 %.

Rang de valors de les variables que descriuen les partícules de combustible en els diferents models experimentals

Les variables que descriuen les partícules de combustible, han estat caracteritzades habitualment per a descriure la vegetació utilitzada en l'experimentació de laboratori. D'aquesta manera, s'han caracteritzat principalment partícules fines –amb un diàmetre inferior a 6 mm– i de les espècies més utilitzades per a la construcció de llits no naturals de combustibles vegetals. Per exemple, la Taula 3.4 recull valors concrets determinats per Pastor (2004).

Taula 3.4 Valors de les variables que descriuen les partícules per a espècies utilitzades típicament en l'experimentació a laboratori (Pastor, 2004).

Tipus de combustible - Espècie	Relació superfície - volum [m ⁻¹]	Densitat de partícula [kg·m ⁻³]	Diàmetre [mm]	PCS [kJ·kg ⁻¹]	PCI [kJ·kg ⁻¹]
Agulles de pi pinyoner - <i>Pinus pinaster</i>	5255	686	1,9	20593	18307
Agulles de pi blanc - <i>Pinus halepensis</i>	10351	979	1,2	20999	18548
Palla d'ordi - <i>Hordeum vulgare</i>	16339	595	2,0	18251	16148
Palla de blat comú - <i>Triticum aestivum</i>	7714	315	3,0	18976	16968
Palla de blat dur - <i>Triticum turgidum</i>	4734	258	2,7	18868	16933

De la mateixa manera, la Taula 3.5 presenta el domini experimental que poden presentar les variables que descriuen les partícules de combustible en l'experimentació a laboratori segons André (1996).

Taula 3.5 Domini experimental de les variables que descriuen les partícules per a espècies utilitzades típicament en l'experimentació a laboratori (André, 1996).

Propietat	Domini experimental
Relació superfície - volum [m ⁻¹]	10 ² - 10 ⁴
Diàmetre [mm]	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²
Poder calorífic [J·kg ⁻¹]	≈ 20x10 ⁶
Humitat [% base seca]	0 - 30

En els darrers anys hi ha hagut un interès creixent per tal de caracteritzar amb major precisió el combustible forestal. Aquest fet posà de manifest la carència de dades corresponents a aquestes variables per a altres tipus de partícules, i no només aquelles habitualment utilitzades en l'experimentació a laboratori. Per això, es dedicaren més esforços en aquest sentit. La Taula 3.6 mostra a tall d'exemple algunes de les dades recollides en el projecte europeu *FireStar* (EVG1-CT-2001-0041), de dues espècies típicament presents en els matollars mediterranis. En aquesta taula es pot observar com varien els diferents valors d'algunes de les variables que caracteritzen a les partícules en funció de si es consideren de forma separada o com a conjunt.

Taula 3.6 Valors de les variables que descriuen les partícules per a espècies típiques dels paisatges mediterranis (Cohen *et al.*, 2002).

Espècie	Tipus de partícula	Relació superfície - volum [m ⁻¹]	Densitat de partícula [kg·m ⁻³]	PCS [kJ·kg ⁻¹]
<i>Erica arborea</i>	Branquillons < 6 mm	4500	X	X
	Fulles	13000	X	21600
	Fulles + branquillons < 6 mm	8680	650	X
<i>Chamaespartium tridentatum</i>	Branquillons 2,5 mm < d _p < 6 mm	9090	748	X
	Fulles	6930	X	X
	Fulles + branquillons < 6 mm	4630	669	X

La Taula 3.7 mostra el rang de valors que poden assolir la humitat del combustible, el poder calorífic, la relació superfície-volum, la densitat i el diàmetre de partícula en cada model experimental. Els valors que aquí es proposen deriven dels valors trobats a la bibliografia. Cal especificar que els valors proposats per a la relació superfície-volum per a les formacions vegetals simples i complexes han estat deduïts dels valors dels models de combustible (Arnaldos *et al.*, 2004).

Taula 3.7 Rang de valors que assoleixen normalment les variables que caracteritzen les partícules de combustible

Variàble [unitats]	Llit de combustible	FVS - Subtipus I	FVS - Subtipus II	FVC
Humitat del combustible [% base seca]	< 30 %	< 30 %	< 300 %	< 300 %
Poder calorífic [kJ·kg ⁻¹]	17000 - 22000	17000 - 22000	17000 - 22000	17000 - 22000
Relació superfície - volum [m ⁻¹]	4000 - 16000	5000 - 12000	4000 - 8000	3000 - 12000
Densitat de partícula [kg·m ⁻³]	320 - 750	320 - 750	320 - 750	320 - 750
Diàmetre [mm]	< 6	< 6	< 7,6	< 7,6

FVS: Formació Vegetal Simple; FVC: Formació Vegetal Complexa

D'acord a la taula anterior, es pot observar que les variables que descriuen a les partícules de combustible no presenten una gran variabilitat, o diferències molt grans entre els diferents models experimentals. La principal diferència entre els models i per tant en la seva caracterització és en termes de la presència de diferents tipus de partícules tant pel què fa a la mida com a la forma, i que a més poden presentar diferents estats (viu o mort).

3.2.2. Variables que descriuen el complex de combustible

D'acord al capítol 1, les principals variables que descriuen el complex de combustible es llisten a continuació:

- Altura del complex de combustible
- Càrrega de combustible

- Densitat aparent del complex de combustible
- Pendent de la superfície per on avança el foc

Altura, càrrega i densitat aparent del complex de combustible

La càrrega de combustible i l'altura són propietats importants a l'hora de predir si es pot produir la ignició i en cas que es produeixi, la velocitat de propagació i la intensitat del front de la flama.

L'altura (h), la càrrega (C) i la densitat aparent (ρ_{ap}) del combustible són tres variables que estan estretament lligades. En el cas dels llits no naturals de combustible vegetal, aquestes tres variables es poden relacionar d'acord a la següent expressió (eq. [3.2]):

$$\rho_{ap} = \frac{C}{h} \quad [3.2]$$

Tot i la linealitat de l'equació anterior, la relació entre aquests paràmetres no es manté lineal. En aquest sentit, a mesura que augmenta la càrrega de combustible, el llit tendeix a compactar-se cada vegada més. A continuació, la Taula 3.8 presenta valors d'aquestes tres variables per a llits no naturals de combustible vegetal, on es pot observar aquest fet.

Taula 3.8 Valors mitjans de càrrega, altura i densitat aparent en llits no naturals de combustibles vegetals (Pastor, 2004).

Tipus de combustible - Espècie	Càrrega seca [kg·m ⁻²]	Altura [cm]	Densitat aparent [kg·m ⁻³]
Agulles de pi pinyoner - <i>Pinus pinaster</i>	0,60	4,6	13,0
	0,80	5,6	14,2
Palla de blat comú - <i>Triticum aestivum</i>	0,25	2,8	9,0
	0,50	4,9	10,2

Diversos estudis de laboratori (Rothermel, 1972 i Carrier *et al.*, 1991) suggereixen que l'altura i la densitat aparent del llit de combustible poden tenir efectes contradictoris quan es consideren únicament en termes de la càrrega de combustible. Per exemple Rothermel (1972) suggereix que per a una densitat aparent constant, la velocitat de propagació s'incrementarà a mesura que incrementa l'altura del llit i per tant que augmenta la càrrega de combustible. No obstant, quan l'altura del llit és constant la velocitat de propagació decreix a mesura que augmenta la càrrega de combustible i per tant també la densitat aparent, com a mínim en el rang que assoleixen aquestes variables en els llits de combustible naturals. Aquest mateix fet fou també observat en les proves de laboratori realitzades per Catchpole *et al.* (1998).

Pel què fa a estudis basats en experiments conduïts a camp, per exemple Cheney *et al.* (1993) afirmen en funció de les dades experimentals recollides en diverses proves realitzades en herbassars que no

trobaren cap evidència de que la càrrega de combustible tingués una influència directa en la velocitat de propagació tal i com proposà McArthur (1977). En aquest sentit els autors determinaren que tot i que la càrrega de combustible és un paràmetre que es pot mesurar de forma relativament fàcil, no resulta útil per a predir la propagació del foc perquè combina l'altura i la densitat aparent del llit de combustible.

D'altra banda, segons Cheney i Sullivan (2008) l'altura del combustible influeix notòriament en l'altura de les flames, i per tant en la dificultat per a extingir el foc. De manera molt menys significativa influeix en la velocitat de propagació. A més, l'altura del complex de combustible modifica el perfil de velocitat del vent, de manera que introdueix turbulències. Aquest aspecte però no ha estat tant estudiat.

La Taula 3.9 presenta valors mitjans d'aquestes tres variables per a alguns dels models de combustible que s'assimilen a les formacions vegetals simples.

Taula 3.9 Valors mitjans de la càrrega de combustible, l'altura i la densitat per a diversos models de combustible (Vélez, 2000).

Model de combustible	Càrrega seca [kg·m ⁻²]	Altura [m]	Densitat aparent [kg·m ⁻³]
Model 1 - Pastura fina seca i baixa	0,16	0,30	0,53
Model 3 - Pastura densa seca i alta	0,67	0,75	0,89
Model 5 - Matollar dens i verd	0,78	0,60	1,30
Model 6 - Igual que el model 5 però amb espècies més inflamables	1,35	0,75	1,80
Model 7 - Matollar d'espècies molt inflamables	1,10	0,75	1,47

Tant la definició com la determinació de la càrrega, l'altura i la densitat aparent en els llits no naturals de combustible vegetal és relativament senzilla. En les formacions vegetals simples resulta molt més fècil la determinació d'aquestes variables, tot i que es poden fer ponderacions per a les parcel·les d'estudi atès que tal i com ha estat definit aquest model experimental la distribució de combustible és relativament homogènia. Aquest no és el cas però de les formacions vegetals complexes on pot arribar a resultar molt complex no només la determinació d'aquestes variables sinó també la seva definició, en cas que es vulgui obtenir o treballar amb un únic valor de cadascuna d'elles.

Pendent

El pendent és el factor topogràfic de major importància en la propagació dels incendis forestals, així com el més estudiat a nivell d'experimentació. El pendent provoca un allargament i una inclinació de les flames cap al combustible no cremat –quan el foc propaga pendent amunt– que es tradueix en un increment de la velocitat de propagació. A mesura que s'incrementa el valor del pendent major és l'augment observat en la velocitat de propagació, de manera que per a angles d'inclinació superiors a 20°, la velocitat de propagació s'incrementa abruptament (Dupuy, 1995).

L'efecte del pendent en la propagació del foc ha estat sovint assimilat a l'efecte provocat pel vent, aquest darrer molt més estudiat a la bibliografia. Així, es considera que l'efecte de la component vertical de l'empenyiment aerostàtic de les flames i el plomall en un front avançant pendent amunt es pot assimilar a l'efecte que tenen les forces inercials generades pel vent en la propagació d'un incendi que es desenvolupa en una superfície horitzontal. La principal diferència en aquest sentit, segons Byram *et al.* (1966) és que en el cas de la propagació amb pendent, la component d'empenyiment aerostàtic augmenta a mesura que augmenta la intensitat del foc, mentre que les forces d'inèrcia en el cas del vent es mantenen constants per a una determinada velocitat del vent. Per tant, incendis propagant pendent amunt en complexos de combustible amb una fracció considerable de combustible gruixut poden incrementar ràpidament la seva velocitat de propagació.

La majoria d'instal·lacions experimentals en incendis forestals que permeten estudiar l'efecte d'aquest factor poden operar en un rang de valors comprès entre 0° i 40°, que alhora es pot considerar representatiu també dels valors que es troben a la natura.

Rang de valors de les variables que descriuen el complex de combustible en els diferents models experimentals

La Taula 3.10 recull el rang de valors que presenten habitualment les variables descrites anteriorment per a caracteritzar el complex de combustible segons els diferents models identificats a l'apartat 3.1. Aquests valors han estat extrets de la bibliografia.

Taula 3.10 Rang de valors que assoleixen normalment les variables que caracteritzen el llit de combustible

Variable [unitats]	Llit de combustible	FVS - Subtipus I	FVS - Subtipus II	FVC
Altura del llit [m]	0,02 - 0,20	0,20 - 0,80	0,20 - 1,80	0,20 - 2,00
Càrrega de combustible [kg·m ⁻²]	0,20 - 2,00	0,10 - 0,70	0,75 - 2,50	0,75 - 8,50
Densitat aparent [kg·m ⁻³]	5,00 - 15,0	0,50 - 1,00	1,00 - 5,00	1,00 - 15,00
Pendent [°]	0 - 40	0 - 40	0 - 40	0 - 40

FVS: Formació Vegetal Simple; FVC: Formació Vegetal Complexa

Pel què fa a les variables que descriuen el complex de combustible, s'observa que per exemple pel què fa a la càrrega i densitat aparent del combustible en els llits no naturals de combustible vegetal i en les formacions vegetals subtipus I, que en teoria serien les més semblants, presenten valors molt diferents. Això és degut a que els prats i herbassars a la natura presenten una distribució de partícules vertical de manera que el patró de distribució de la càrrega és distint al que s'obté preparant un llit amb el mateix tipus de combustible però a laboratori.

D'altra banda, a la Taula 3.10 es pot observar també com és en el cas de les formacions vegetals complexes que l'altura, la càrrega i la densitat aparent del llit poden presentar una major variabilitat.

En aquest sentit, cal destacar que els valor majors pel què fa a càrrega de combustible i densitat aparent correspondria a boscos amb gran acumulació de restes silvícoles.

Altres característiques del llit relacionades amb la propagació del foc

Morandini *et al.* (2001a) consideren que tan els descriptors de les partícules de combustible com de les propietats del complex de combustible estan intrínscament inclosos en altres variables relacionades amb la transferència de calor com per exemple el coeficient de convecció, entre d'altres. D'acord amb això, pot ser important per a la posterior aplicació de l'anàlisi dimensional tenir en compte altres variables característiques del combustible, quan ja té lloc la propagació del foc, com per exemple el coeficient de convecció a la superfície del llit, la temperatura del combustible situat per davant del front de flames i que s'està preescalfant i també la magnitud de la franja de combustible que el front de flames és capaç de preescalfar per a garantir la propagació.

3.3. Variables que descriuen l'entorn

Les principals variables que descriuen l'entorn i que tenen un marcat efecte en el comportament i propagació del foc són les següents:

- Humitat relativa
- Temperatura de l'aire
- Propietats de l'aire ambient (capacitat calorífica, conductivitat, coeficient d'expansió, densitat i viscositat)
- Velocitat de l'aire induïda pel foc i velocitat del vent

El valor que poden presentar aquestes variables no depèn del model experimental pròpiament, tot i que sí que cal tenir en compte, pel què fa a l'escenari experimental, que en l'experimentació a laboratori es poden arribar a controlar algunes d'aquestes variables. Tanmateix, pel què fa a la determinació del rang de valors que poden assolir, en aquest cas no té sentit especificar un rang per a cada model experimental. Aquest rang serà el mateix en tots els casos, ja que tot i que a laboratori es puguin controlar algunes de les condicions ambientals, lògicament s'imposaran valors el més semblants possibles als que tenen lloc durant els incendis forestals. L'única excepció és la velocitat del vent.

De totes aquestes variables, sens dubte les més importants són la humitat relativa, la temperatura de l'aire i la velocitat del vent. L'efecte que exerceixen les dues primeres en la propagació del foc ha estat explicat al capítol 1, de manera que en aquest apartat es farà únicament un estudi més detallat de la velocitat del vent.

Velocitat del vent

L'efecte que té el vent en un incendi forestal és extremadament complex ja que afecta a la dinàmica de l'incendi pel què fa a la reacció de combustió, als mecanismes de transferència de calor i al transport de

gasos i partícules incandescentes. A més, cal tenir en compte també la complexa naturalesa del vent en els entorns forestals de manera que presenta una gran variabilitat espacial i temporal pel què fa a la seva direcció i velocitat. En aquest estudi però, es considerarà com a únicament la velocitat vent.

Un dels efectes més directes i intuïtius del vent en els incendis forestals és, al igual que en el cas del pendent, la inclinació i l'allargament de les flames. Sota aquesta nova configuració geomètrica del front de flames, la transferència de calor per radiació s'incrementa, ja que la proximitat de les flames amb el combustible es tradueix en un augment del factor de vista i conseqüentment en un augment del flux de calor transmès per radiació. D'altra banda, en aquesta situació, el combustible no cremat també s'escalfa per convecció forçada i si el vent és molt fort també per conducció degut al contacte directe entre combustible i flama. A més a més, la velocitat amb la que es produeix la transferència de calor entre el front de flames i el combustible no cremat és també major (Byram, 1959).

A més, la presència de vent en un incendi forestal garanteix l'aportació suficient d'oxigen per a una reacció de combustió eficient i afavoreix la dessecació del combustible que encara no ha cremat, anticipant el moment de la ignició. Tot això deriva directament en un augment de la velocitat de combustió i de propagació (Viegas, 1998).

A part de l'efecte en la velocitat de propagació, altres aspectes dels incendis forestals són clarament resultat de la influència del vent. La morfologia del perímetre de l'incendi o la formació de focus secundaris degut al transport de material incandescent en l'interior de la columna de convecció, són alguns dels aspectes més rellevants en aquest sentit.

Un altre aspecte important, és com es mesura aquesta variable, ja que no tots els autors utilitzen un mateix criteri. Alguns models requereixen com a paràmetre d'entrada la velocitat del vent mesurada a una altura equivalent a la meitat de l'altura de la flama, mentre que la opció més utilitzada és mesurar el vent a una altura de 10 metres.

A la natura el vent pot arribar a assolir velocitats majors als 100 km/h, considerant-se aquests valors propis de les condicions d'un temporal segons l'escala Beaufort. Tot i això, generalment en l'experimentació en incendis forestals no són desitjables vents superiors als 25 km/h atès el risc que implicaria en cas de que es perdés el control del foc durant l'experimentació de forma accidental. Igualment succeeix en el cas de les cremes prescrites, en què les finestres de prescripció de la crema sovint limiten la velocitat del vent, ja no tan sols pel risc que implica, sinó també per l'efecte que té el vent en la intensitat que assolirà el foc.

Pel què fa a l'experimentació a laboratori, tal i com s'ha descrit al capítol 2, existeixen diferents instal·lacions que permeten estudiar els incendis forestals en presència de vent. Aquest tipus d'instal·lacions o túnels de vent, normalment poden arribar a generar fluxos d'aire de fins a 6 m/s (22 km/h).

3.4. Variables que descriuen el comportament del foc i la geometria de flama

Al capítol 1 s'han descrit les variables que s'utilitzen més habitualment per a descriure el comportament del foc i la geometria del front de flames. Aquestes variables estan relacionats amb els efectes del foc i són importants a l'hora de predir les conseqüències d'un incendi.

El valor que poden arribar a presentar aquestes variables depèn no només del model experimental, sinó que depèn també d'altres factors que puguin intervenir en la propagació del foc, com el pendent i el vent.

3.4.1. Comportament del foc

Les variables que s'utilitzen per a descriure el comportament del foc, tal i com s'ha vist al capítol 1, es llisten a continuació:

- Velocitat de propagació
- Velocitat de combustió
- Intensitat del front de flames
- Poder emissiu
- Temperatura de la flama
- Temps de residència

Velocitat de propagació

La velocitat de propagació és un dels paràmetres més significatius per a descriure el comportament d'un incendi forestal, ja que està directament relacionada amb la potència calorífica de l'incendi (Byram, 1959) i amb la geometria del front de flames (Anderson, 1968) i, per tant, amb el nivell de risc associat a la seva propagació. Conèixer aquest paràmetre és doncs un fet clau per a la bona gestió de l'emergència en un incendi forestal i per la qual cosa es dediquen en aquest sentit molts esforços científics tant a nivell de modelització matemàtica (Pastor *et al.*, 2003) com a nivell d'avaluació experimental per a la validació de models.

Establir el rang de valors que pot assolir aquesta variable en els diferents models experimentals és certament difícil, ja que la velocitat de propagació depèn de les condicions ambientals i de factors com la presència de vent i/o pendent. Els valors més elevats de la velocitat de propagació s'assoleixen en condicions extremes pel què fa a la temperatura ambient, la humitat relativa, la velocitat del vent i la presència de pendent.

La Taula 3.11 presenta valors de la velocitat de propagació mesurada en proves de laboratori realitzades en llits no naturals de combustible vegetal, formats per agulles de pi (*Pinus halepensis*), on

la càrrega es mantingué igual per a totes les proves -1 kg/m^2 i la humitat mitjana del combustible fou del 5,8 %. En el cas de la prova en què es cremà un llit de 2 m d'amplada en una superfície inclinada 30° no s'arribà a assolir l'estat estacionari i per això no apareix cap valor numèric a la Taula 3.11.

Taula 3.11 Velocitat de propagació en llits d'agulles de pi (Guijarro *et al.*, 2003).

Amplada del llit [m]	Pendent [°]	Velocitat de propagació $\times 10^{-3}$ [m/s]
1	0	4,20
	20	15,4
	30	53,9
2	0	4,70
	20	17,9
	30	--

A la Taula 3.12 es recullen els resultats obtinguts per Viegas i Rossa (2009) en què es dugueren a terme proves en condicions de vent o pendent en llits no naturals de combustible vegetal –palla i agulles de pi. En totes les proves la càrrega fou la mateixa, $0,6 \text{ kg/m}^2$, i la humitat del combustible oscil·là entre el 10 % i el 16 %.

Taula 3.12 Velocitat de propagació mesurada en llits de palla i agulles de pi (Viegas i Rossa, 2009).

Pendent [°]	Velocitat del vent [m/s]	Velocitat de propagació llits de palla $\times 10^{-2}$ [m/s]	Velocitat de propagació llits d'agulles de pi $\times 10^{-2}$ [m/s]
0	1,0	1,87	1,02
0	2,0	5,60	3,59
0	3,0	13,99	9,94
0	4,0	25,52	14,00
10	0	1,49	0,36
20	0	3,13	0,66
30	0	4,87	2,53
40	0	24,88	11,72

A partir de les dades anteriors (Taula 3.11 i Taula 3.12) es pot observar clarament l'efecte del pendent i del vent en la velocitat de propagació en proves realitzades en llits no naturals de combustible vegetals.

D'altra banda, la Taula 3.13 mostra els valors de velocitat de propagació que s'assolirien en els models de combustible que es poden assimilar a les formacions vegetals simples subtipus I i II, per a una velocitat del vent de 8 km/h i humitats del combustible mort del 8 % i una humitat del combustible viu del 100 %.

Taula 3.13 Velocitat de propagació segons diferents models de combustible .

Grup	Model de combustible	Velocitat de propagació [m/s]
Pastures	1	0,45
	3	0,58
Matollars	5	0,10
	6	0,17
	7	0,11

La propagació sense vent ni pendent a la natura és una situació irreal, de fet és també molt poc probable dur a terme proves en absència completa de vent. A continuació es presenten els valors de velocitat de propagació mesurats en proves dutes a terme en matollars a Portugal (Palheiro i Cruz, 2004).

Taula 3.14 Velocitat de propagació mesurada en proves dutes a terme en matollars (Palheiro i Cruz, 2004).

Pendent [°]	Velocitat mitjana del vent [m/s]	Velocitat de propagació [m/s]
21	3,3	0,17
27	2,1	0,21
22	3,3	0,17
21	2,9	0,14
18	2,0	0,13

Amb aquestes dades s'ha volgut deixar constància de la gran quantitat de factors que determinen la velocitat de propagació, alhora que s'ha volgut donar exemples de diferents situacions per a poder tenir un ordre de magnitud dels valors que pot prendre la velocitat de propagació en els diferents models experimentals.

Velocitat de combustió

La velocitat de combustió es defineix com la quantitat de combustible que es crema per unitat de temps i està relacionada amb la velocitat d'alliberació d'energia. Per tant, és un indicador de la potència calorífica que desprèn l'incendi. Alguns autors utilitzen el terme velocitat de pèrdua de massa per referir-se a aquesta variable. La velocitat de combustió pot expressar-se en funció de la superfície que es troba en combustió [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] o de la longitud del front de flames [kg/ms]. Cal tenir present aquest fet alhora d'utilitzar valors experimentals d'altres treballs.

Segons Byram (1959) la velocitat de combustió augmenta amb l'increment de la superfície del combustible, ja que es produeix una millor aportació d'oxigen. A banda, en el cas d'incendis que involucrin combustibles gruixuts, la velocitat de combustió es veurà limitada per la velocitat a la que té lloc la conducció a l'interior del sòlid, ja que aquest és el mecanisme de transferència més lent.

Aquesta variable es determina sovint en les proves que es realitzen al laboratori (Taula 3.15), tanmateix, la seva determinació en l'experimentació a camp és molt més complexa, i en general s'utilitza més la intensitat del front de flames com a indicador de la potència d'un incendi.

Taula 3.15 Velocitat de combustió mesurada en proves dutes a terme en llits de palla (Pastor, 2004).

Càrrega de combustible [kg/m ²]	Velocitat de combustió [g/m·s]
0,25	0,60
0,50	5,73
0,75	6,15

No obstant, una altra variable que relacionada amb la velocitat de combustió i alhora amb la intensitat del front de flames, ja que és necessària per al seu càlcul és la quantitat de combustible consumit, que s'expressa sovint en percentatge. La Taula 3.16 mostra per als grups dels models de combustible corresponents a les pastures i matollars valors de la quantitat de combustible que es pot arribar a consumir en un incendi. Tanmateix, cal anar en compte amb l'ús de la quantitat de combustible consumit, ja que el valor variarà en funció de si es considera el combustible consumit pel front de flames, o el combustible consumit un cop extingit el foc, de manera que en el darrer cas s'obtindrà un valor superior.

Taula 3.16 Combustible que es pot consumir en un incendi en funció dels models de combustible (Vélez, 2001).

Tipus de vegetació	Combustible consumit [%]
Pastures	Fins al 100 %
Matollars	5 % - 95 %

Intensitat del front de flames

La intensitat del front de flames és un nombre calculat que representa la velocitat d'alliberació de calor per unitat longitudinal d'un segment del front de flames.

Tot i que la intensitat del front de flames és una de les variables que s'ha determinat més sovint en l'experimentació a camp, també ha estat calculada per proves dutes a terme al laboratori. Per exemple Nelson i Adkins (1986) determinaren valors d'intensitat del front de flames entre 98 kW/m i 492 kW/m en llits formats per agulles de pi, i en condicions de vent, de manera que les proves es dugueren a terme amb vents de entre 0,59 m/s fins a 2,29 m/s.

Rothermel (1983) va relacionar longituds de flama amb intensitats lineals i amb propostes d'extinció (Taula 3.17) mitjançant l'observació d'incendis de superfície esdevinguts en combustibles forestals modelitzats pel mateix Rothermel. A l'apartat corresponent a la longitud de la flama hi ha més informació sobre la relació entre aquesta i la intensitat del front de flames.

Taula 3.17 Descripció de les possibles longitud de flama i propostes d'atac d'incendi per a diferents intensitats lineals del front d'incendi

Intensitat lineal [kW/m]	Longitud de flama [m]	Observacions
< 350	< 1,2	Els incendis poden ser atacats directament mitjançant eines manuals, pel front de l'incendi o pels flancs.
350 - 1.700	1,2 - 2,4	Són incendis massa intensos per a l'atac directe al front mitjançant eines manuals. L'ús de retardants és recomanable.
1.700 - 3.450	2,4 - 3,4	Incendis que presenten difícil control. Es poden produir incendis de capçades i focus secundaris. En la majoria, incontrolables pel front de l'incendi.
> 3.450	> 3,4	Probabilitat alta de què es produeixi incendi de les capçades i focus secundaris. Són incendis extremadament perillosos pel personal i l'equip d'extinció, completament incontrolables.

Aquests valors concorden amb la classificació dels incendis en funció de la intensitat del front de flames proposada per McArthur (1967) ja que determinà que incendis amb intensitats majors a 4000 kW/m es podien considerar com a incendis de gran intensitat.

Per als incendis en herbassars, Cheney i Sullivan (2008) afirmen que la intensitat d'aquest tipus d'incendis pot anar de dels 10 kW/m fins als 60.000 kW/m. A més, aquests autors recomanen utilitzar la intensitat del front de flames únicament per a comparar incendis propagant en el mateix tipus d'estructures de combustible, ja que en cas contrari es poden extreure conclusions errades.

Poder emissiu

El poder emissiu es defineix com la quantitat de calor emesa en forma de radiació per un cos, expressat per unitat de superfície. El càlcul del poder emissiu emès en els incendis forestals és essencial per poder desenvolupar els models de propagació, ja que la radiació es considera un dels fluxos d'energia més significatius.

El poder emissiu depèn no només de la temperatura, sinó també de l'emissivitat de la superfície que emet la radiació. A més, la humitat del combustible afecta també al valor d'aquesta variable. En general, en un incendi forestal, molts autors han considerat que es pot assumir que el front de flames es comporta com un cos negre, i que per tant presenta una emissivitat igual a la unitat (Cohen i Butler, 1998; Pastor *et al.*, 2002; Sullivan *et al.*, 2003). D'altres autors han preferit utilitzar directament el poder emissiu (Albini, 1985; Dupuy, 1997).

La Taula 3.18 recull dades del poder emissiu en proves de laboratori, però cal destacar que els valors presentats en aquesta taula fan referència al valor conjunt del poder emissiu de les flames i del llit de combustible. Així, aquests valors són molt més elevats dels que correspondrien al poder emissiu únicament de les flames, ja que aquestes presenten una emissivitat inferior a la del llit de combustible, que es pot considerar igual a la unitat. Per exemple, Martin (2007) determinà valors mitjans de 2,4 kW/m² en flames estàtiques de llits d'agulles de pi.

Taula 3.18 Poder emissiu conjunt de les flames i del llit de combustible (Pastor, 2004).

Tipus de combustible	Càrrega de combustible [kg/m ²]	Poder emissiu [kW/m ²]
Palla d'ordi	0,25	18,4
	0,50	21,2
Palla de blat	0,25	13,4
	0,50	20,2
	0,75	21,5

Temperatura de la flama

La temperatura de la flama en un incendi forestal, és un paràmetre molt difícil de determinar ja que presenta grans fluctuacions en l'espai i el temps. Segons Nelson (1980) la temperatura de la flama es troba controlada per la velocitat amb què l'aire es barreja amb el combustible vaporitzat.

Un altre aspecte que complica encara més la determinació de la temperatura de la flama és el mètode de mesura, ja que els errors inherents a cada sistema fa que no sigui convenient comparar temperatures obtingudes amb diferents mètodes i/o equips de mesura.

La Taula 3.19 presenta un recull dels valors de temperatura mesurats per diferents autors tant a laboratori com en proves a camp.

Taula 3.19. Temperatura de flames de focs forestals.

Referència	Valor de temperatura [K]	Aparell de mesura	Condicions experimentals
Morandini <i>et al.</i> (2000)	873	Termoparells	Focs de laboratori. Combustible agulles de <i>Pinus pinaster</i> i <i>Pinus halepensis</i> . Valor de temperatura en condicions sense vent ni pendent.
Trabaud (1992)	873 - 1073	Termoparells	Focs de camp. Combustible: garriguers al sud de França
Ventura <i>et al.</i> (1998)	873 - 1173	Termoparells	Focs de camp. Combustible: agulles de <i>Pinus pinaster</i>
Zárate (2004)	1041 - 1391	Càmera termogràfica	Cremes preescrites en el delta de l'Ebre (Catalunya)
	480 - 587	Càmera termogràfica	Focs de laboratori. Combustible: palla

Martin (2007) realitzà un exhaustiu estudi, on entre d'altres aspectes estudià la temperatura de les flames, de manera que mesurà valors màxims de temperatura entre els 600 K i els 900 K. Pel què fa a la distribució de temperatures en funció de l'altura, Martin (2007) observà que partint de la base de la flama –part més propera al combustible– en direcció a la punta de la flama, la temperatura comença a augmentar fins aproximadament un quart de l'altura on s'assoleix la temperatura màxima, a partir d'aquest punt disminueix progressivament fins arribar a la temperatura mínima en l'altura màxima.

Temps de residència

El temps de residència és una variable difícil de mesurar quantitativament, tant a laboratori com a camp, tal i com s'ha vist al capítol 1. Aquest fet ha provocat que diversos autors hagin modelitzat o definit el temps de residència de diferents formes. Per exemple, quan el combustible per on propaga el foc és homogeni i uniforme, el temps de residència es pot assimilar al que temps que triga en cremar, en presència de flama, una partícula de combustible. En el cas en què el complex de combustible és heterogeni, el temps de residència resulta equivalent al valor mitjà de temps que triguen en cremar totes les partícules que conformen el complex de combustible en un determinat punt.

Els diferents estudis per mesurar el temps que triguen les partícules de combustible en produir una combustió amb flama han estat relacionats amb les característiques físiques dels diferents components vegetals, com el diàmetre mig d'aquests vegetals i la seva relació superfície - volum. Anderson (1969), va donar una expressió d'aquest temps de residència (t_r) per a partícules individuals de combustible en funció del seu diàmetre (d_c), expressat en cm (eq. [3.3]).

$$t_r = 189 \cdot d_c \quad [3.3]$$

A la Taula 3.20 es mostren diferents valors del temps de residència de la flama en funció del diàmetre de combustible. Òbviament, queda reflectit que a diàmetres de partícules més grans, major és el temps de residència (Fahnestock, 1970).

Taula 3.20 Temps de residència de la flama en funció del diàmetre del combustible (Fahnestock, 1970).

Diàmetre del combustible [cm]	Temps de residència de la flama [s]
< 0,6	< 119
0,6 - 2,5	119 - 480
2,5 - 7,6	480 - 1440
> 7,6	> 1440

L'eq. [3.4] mostra una expressió formulada per Andrews (1986) que estima el temps de residència de la flama en les partícules en funció de la seva relació de superfície-volum (σ_s), de manera que el temps de residència de la flama s'incrementa quan la relació de superfície-volum d'una partícula és menor.

$$t_r = \frac{75558}{\sigma_s} \quad [3.4]$$

L'eq. [3.5] presenta la relació més utilitzada per a determinar el temps de residència del front de flames. Aquest model prediu el temps de residència en funció de descriptors de comportament del foc – concretament del gruix de flama (S_f) i de la velocitat de propagació (R)– i no en funció de les característiques físiques del combustible. Aquesta equació ha estat validada en experimentacions de

camp (McArthur, 1967; McArthur, 1968), i experimentacions de laboratori (Byram, 1966; Rothermel i Anderson, 1966).

$$t_r = \frac{S_f}{R} \quad [3.5]$$

Segons Burrows (1995), el temps de residència és directament proporcional al grau de compactació del llit de combustible i, en combustibles vius, també al grau d'humitat. D'altra banda, McArthur (1967) conclouen que el temps de residència disminueix a mesura que augmentava la velocitat del vent.

Rang de valors de les variables que descriuen el comportament del foc en els diferents models experimentals

La Taula 3.21 mostra el rang de valors que poden arribar a assolir les variables que caracteritzen el comportament del foc, d'acord a les dades trobades a la bibliografia, i a les característiques de cada model experimental. Comentar que el valor que poden prendre aquestes variables depèn també d'altres variables tal i com s'ha descrit, i també estan relacionades entre elles, de manera que cal anar en compte a l'hora d'utilitzar la informació que recull la propera taula, ja que si es treballa en unes condicions determinades d'aquestes variables, probablement no es podran assolir qualsevol dels valors possibles que poden presentar.

Taula 3.21 Rang de valors que assoleixen normalment les variables que caracteritzen el comportament del foc.

Variable [unitats]	Llit de combustible	FVS - Subtipus I	FVS - Subtipus II	FVC
Velocitat de propagació [m/s]	0,01 - 0,30	0,20 - 0,60	0,10 - 0,25	< 20
Velocitat de combustió [g/m·s]	0,3 - 8,00	X	X	X
Intensitat del front de flames [kW/m]	<1500	10 - 60000	10 - 80000	100 - 100000
Poder emissiu [kW/m ²]	< 25	25 - 170	25 - 500	80 - 900
Temperatura de la flama [K]	< 1000	< 1300	< 1800	< 2000
Temps de residència [s]	0 - 119	0 - 119	0 - 1440	0 - 1440

A la taula anterior, no s'han especificat valors per a la velocitat de combustió pels models corresponents a les formacions vegetals simples i complexes per falta de dades a la bibliografia. A més, cal notar que els valors de poder emissiu foren determinats en funció dels valors de temperatura de flama proposats, tenint en compte en cada cas, és a dir, per cada model experimental el valor d'emissivitat més adequat, d'acord a la informació trobada a la literatura.

3.4.2. Geometria del front de flames

Les característiques geomètriques del front de flames són indicadors de com està progressant un incendi, i determinen la configuració i la dimensió de la superfície radiant. Les més importants d'acord

al capítol 1 són l'altura, la longitud, l'angle d'inclinació de les flames i el gruix de la flama. A més, una altra variable de rellevància en l'experimentació en incendis forestals és la longitud del front de flames. Com s'ha vist al capítol 1, les variables geomètriques no tenen una definició unívoca a la bibliografia i cal anar en compte al comparar dades de diferents fonts.

Altura de flama

L'altura de la flama és un dels paràmetres geomètrics més comuns per a descriure el comportament d'un incendi forestal ja que està relacionat amb la velocitat de propagació de l'incendi. De forma general s'observa que la relació entre l'altura de les flames (H) i la velocitat de propagació (R) té un comportament parabòlic com es mostra a l'eq. [3.6] on a i b són coeficients no dimensionals (Arnaldos *et al.*, 2004).

$$H = a \cdot R^b \quad [3.6]$$

A més, l'altura de flama també està directament relacionada amb la velocitat del vent i la quantitat de combustible. En aquest sentit, l'altura de les flames es veu reduïda significativament amb l'increment de la velocitat del vent i per altra banda creix notòriament amb l'augment de la massa de combustible.

A la següent taula (Taula 3.22) es recullen diferents correlacions que poden trobar-se a la bibliografia per a estimar l'altura de les flames en incendis de superfície.

Taula 3.22 Models per a estimar l'altura de flama (H , H_v).

Referència	Equació	Observacions obtenció equació
McArthur (1966)	$H = 13 \cdot R + 0,24 \cdot C - 2$	Correlació de dades obtingudes en cremes experimentals en herbassars
Nelson (1980)	$H = I - \frac{47}{15444 \cdot R}$	Model teòric ajustat amb dades experimentals de camp
Albini (1981)	$H_v = \frac{\zeta \cdot I}{\eta \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot T_a \cdot u_w}$	Model teòric
Nelson i Adkins (1986)	$H = \frac{I}{385 \cdot u_w}$	Parametrizació del model d'Albini (1981) a partir de dades extretes de proves realitzades en un túnel de vent

On C és la càrrega total de combustible expressada en $[t \cdot ha^{-1}]$, I la intensitat lineal del front $[kW \cdot m^{-1}]$, u_w és la velocitat del vent a mitja flama $[m \cdot s^{-1}]$ o $[km \cdot h^{-1}]$, $\rho_a \cdot c_{pa} \cdot T_a$ la calor per unitat de volum d'aire $[kJ \cdot m^{-3}]$, ζ la fracció pirolitzada de combustible $[-]$ i η la fracció de l'aire que s'incorpora a la flama $[-]$.

La Taula 3.23 presenta valors de l'altura, la longitud i l'angle d'inclinació de les flames, mesurades en les mateixes proves que les que apareixen a la Taula 3.11. En aquest cas, els autors utilitzaren la definició de l'angle d'inclinació de la flama igual a β_l d'acord a la notació que apareix al capítol 1. Pel què fa a l'altura i longitud de la flama es corresponen als paràmetres H i a L_l definits al capítol 1, però sense considerar l'altura del llit de combustible.

Taula 3.23 Paràmetres geomètrics de la flama en proves de laboratori (Guijarro *et al.*, 2003).

Amplada llit [m]	Pendent [°]	Altura flama [m]	Longitud flama [m]	Angle d'inclinació [°]
1	0	0,77	0,79	102
	20	0,93	1,02	65
	30	0,92	1,30	45
2	0	0,71	0,74	104
	20	1,09	1,30	63
	30	X	X	X

La Taula 3.24 mostra els valors mitjans de l'altura de flama segons els models de combustible que es poden assimilar a les formacions vegetals simples subtipus I i II, per a velocitat del vent de 8 km/h i humitats del combustible mort del 8 % i una humitat del combustible viu del 100 %.

Taula 3.24 Altura de flama per diferents models de combustible (Arnaldos *et al.*, 2004).

Grup	Model de combustible	Altura de flama [m]
Pastures	1	1,2
	3	3,7
Matollars	5	1,2
	6	1,8
	7	1,5

Longitud de flama

La longitud de flama pot proporcionar una ràpida estimació de la intensitat de l'incendi, de manera que diversos autors han desenvolupat equacions per a relacionar ambdues variables (Taula 3.25).

Taula 3.25 Models per a estimar la longitud de flama (L_a) en funció de la intensitat del foc (I).

Referència	Equació	Observacions obtenció equació
Byram (1959)	$L_a = 0,0775 \cdot I^{0,46}$	Correlació empírica amb dades obtingudes en focs conduïts pel vent
Thomas (1963)	$L_a = 0,0266 \cdot I^{2/3}$	Desenvolupament teòric a partir de l'anàlisi dimensional per a focs estàtics sense vent
Nelson i Adkins (1986)	$L_a = 0,0475 \cdot I^{0,493}$	Correlació de dades extretes de proves realitzades en un túnel de vent i també a camp
Fernandes <i>et al.</i> (2000)	$L_a = 0,0516 \cdot I^{0,453}$	Correlació de dades obtingudes en cremes de matollars

Anderson *et al.* (2006) analitzaren en detall alguns dels models que relacionen la longitud de la flama amb la intensitat del foc a partir de dades experimentals procedents de diverses fonts. D'aquest estudi concloueren que el model de Thomas (1963) resulta força adequat per a predir la longitud de flama en incendis de matollar desenvolupant-se en terrenys sense pendent. No obstant també adverteixen de la

seva poca adequació en condicions de vent o per a focs de gran intensitat. Pel què fa al model de Nelson i Adkins (1986), Anderson *et al.* (2006) observaren que prediu raonablement la longitud de flama en incendis de sotabosc.

De les conclusions del treball de Anderson *et al.* (2006) queda clar que la longitud de flama es troba afectada no només pel tipus de vegetació sinó també per les condicions en les que es desenvolupa l'incendi com la presència de vent o pendent. I és que per exemple, a mesura que augmenta la velocitat del vent i/o el pendent, s'incrementa la longitud de flama. En el cas de la propagació amb vent, Morvan (2007) afirma que la longitud de flama incrementa progressivament però per a velocitats del vent superiors a 6 m/s, aquesta decreix abruptament.

A la Taula 3.23 es presenten exemples dels valors de la longitud de flama en proves experimentals de laboratori segons diferents condicions de propagació. Mentre que a la Taula 3.26 es presenten valors de la longitud de flama en proves dutes a terme a camp, conjuntament amb altres descriptors del comportament del foc.

Taula 3.26 Descriptors del comportament del foc i la geometria de flama (Fernandes *et al.*, 2004).

Longitud línia d'ignició [m]	Velocitat de propagació [m/s]	Longitud flama [m]	Intensitat de Byram [kW/m]
26	0.0742	3.2	3072
28	0.0837	3.3	3267
21	0.0711	3.1	2883
14	0.0723	2.8	2352
35	0.0943	2.9	2523
123	0.1389	4.4	5808
30	0.2733	5.8	10092
30	0.3333	7.0	14700
30	0.1067	5.5	9075
30	0.1300	4.0	4800
30	0.1517	3.8	4332
10	0.0357	< 1.5	< 675

Angle d'inclinació de la flama

La majoria dels paràmetres geomètrics de les flames són obtinguts de forma totalment empírica a partir de les dades experimentals observades. En canvi, per a la determinació d'aquest paràmetre s'han desenvolupat alguns estudis amb base teòrica i posterior comprovació experimental. Taylor (1961) va aplicar les teories de la flotació i empenta de fluids gasosos als fums que conformen la columna de convecció, obtenint una expressió semiempírica que es fonamenta en què la inclinació de la flama és deguda principalment a la flotabilitat i empenta que tenen els fums de la combustió. Posteriorment,

Albini (1981), tractant de forma més rigorosa la teoria proposada per Taylor, va obtenir una expressió de tipus més general basada en el nombre de Froude.

Més tard, Nelson i Adkins (1986) varen trobar, en experiments realitzats en túnels de vent, una altra expressió de l'angle de la flama, que relaciona aquest amb la intensitat lineal del front de l'incendi i no es considera la teoria de flotabilitat desenvolupada per Taylor i Albini. Els resultats obtinguts en les experimentacions de Nelson i Adkins contradiuen, segons aquests autors, la teoria de flotabilitat; encara que una explicació sobre les diferències de resultats observades, és que en el mètode experimental emprat per aquests investigadors, el sostre del túnel de vent impedeix que es desenvolupi tota la columna de convecció després en cremar el combustible, provocant un increment en l'angle d'inclinació de la flama.

El rang de valors que pot cobrir aquesta variable és independent del model experimental. Així, l'angle d'inclinació de la flama depèn principalment dels factors que afecten a la propagació.

Taula 3.27 Correlacions per a estimar l'angle d'inclinació de la flama en incendis de superfície.

Referència	Equació	Observacions obtenció equació
Taylor (1961)	$\theta = \arctg \cdot \left[C \cdot \left(\frac{I}{u_w^3} \right)^{1/2} \right]$	Desenvolupament teòric
Albini (1981)	$\theta = \arctg \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{1}{Fr} \right)^{1/2} \right]$	Desenvolupament teòric
Nelson i Adkins (1986)	$\theta_a = \arctg \cdot \left[0,388 \cdot \left(\frac{I}{u_w^3} \right)^{0,29} \right]$	Correlació de dades extretes de proves realitzades en un túnel de vent i també a camp

Gruix de la flama

El gruix de la flama és la distància darrera del front on hi ha de forma continua flama. Aquest paràmetre depèn de la velocitat amb la què avança el front de flames (velocitat de propagació) i del temps en què les flames romanen en el mateix punt en el llit de combustible (temps de residència). Així, el gruix de la flama és un indicador del tipus i quantitat de combustible que està cremant.

Segons Wilson (1982), aquest paràmetre, a part de presentar grans dificultats per a una exacta determinació experimental, no ha estat definit amb precisió i no existeix una definició estàndard. Malgrat això, des del punt de vista teòric, representa una variable que complementa la caracterització d'una flama i que pot aportar informació important en el procés de modelització. Per aquest motiu s'ha estudiat, trobant que el gruix de la flama està directament relacionat amb la velocitat de propagació de l'incendi –amb la qual hi té una relació lineal (Trabaud, 1992)–, amb la quantitat de combustible disponible i amb el seu contingut d'humitat.

La Taula 3.28 recull correlacions que poden utilitzar-se per a determinar aquest paràmetre en incendis de superfície. D'aquestes expressions, la de Leicester (1985) dóna valors força alts del gruix de la flama.

L'equació de Simard (1989) ha estat validada amb resultats experimentals realitzats per diferents autors (Anderson, 1966; Rothermel i Anderson, 1966; Brown, 1972).

Taula 3.28 Models per a estimar el gruix de flama.

Referència	Equació
Leicester (1985)	$S_f = 1,5 \cdot H$
Nelson i Adkins (1988)	$S_f = 0,39 \cdot (m_c')^{0,25} \cdot u_w^{1,51}$
Simard (1989)	$S_f = \sqrt{L_f^2 - H^2}$

On m_c' és la massa de combustible cremat per unitat de superfície [kg/m^2], S_f el gruix de flama [m] i u_w la velocitat del vent [m/s] o [km/h].

Longitud del front de flames

El front de flames ha estat considerat tradicionalment, especialment pel què fa a la modelització, com una línia quasi-infinita. Tal i com s'ha anat veient al llarg d'aquest treball, molts dels models de comportament en incendis forestals s'ajusten o validen mitjançant dades experimentals. En alguns casos aquestes dades provenen únicament d'experiments duts a terme al laboratori però s'utilitzen per a predir el comportament d'incendis naturals i per tant de majors dimensions. Precisament per això diversos autors han estudiat l'efecte de l'extensió del front de flames, expressada de diferents formes segons l'autor, en la propagació del foc.

En aquest sentit, diversos autors han considerat l'extensió del front de flames igual a l'amplada del complex de combustible, ja que d'acord a la metodologia experimental, si la ignició es duu a terme al llarg de tota l'amplada del llit, aquesta coincidirà amb el que els autors anomenen amplada del front de flames. En la majoria d'aquests treballs els autors sovint utilitzen indistintament el terme amplada per referir-se tant a l'amplada del llit com a la del front de flames.

Per exemple, Fons *et al.* (1962) suggeriren que un incendi no afectat pel vent i amb un gruix de flama menor que l'amplada del front es podia considerar que cremava com una franja quasi-infinita. Els autors assoliren aquesta conclusió després de dur a terme diverses proves en què cremaren llits de llistons de fusta de diferents amplades, de 14,6 cm fins a 41,3 cm.

Anderson (1964) va concloure que una amplada de 30 cm o més era suficient per obtenir velocitats de propagació constants. Anderson arribà a aquesta conclusió després de realitzar diverses proves a laboratori en llits d'agulles de pi –*Pinus ponderosa* i *Pinus monticola*– d'amplades entre 15 cm i 38 cm. El mateix autor en un treball posterior (Anderson, 1968) observà, a partir de resultats experimentals de proves dutes a terme en llits de *Pinus ponderosa* i *Pinus halepensis*, com al variar l'amplada del llit de combustible també ho feia el gruix de flama. A més, va notar també que la velocitat de propagació

augmentava al incrementar l'amplada del llit, i que els llits que generaven les flames més altes eren els que assolien les velocitats de propagació més elevades. En aquest sentit, Anderson (1968) va determinar que els efectes provocats per l'amplada del llit de combustible eren més marcats en aquells combustibles que generaven flames més altes.

Anys més tard, Wolff *et al.* (1991) van dur a terme experiments al laboratori, en un túnel de vent, que consistiren en la crema de matrius d'elements discrets formant llits d'amplades entre 15 cm i 100 cm. Wolff *et al.* (1991) observaren com el front de flames desenvolupava una forma corba durant el transcurs d'algunes proves. Els autors explicaren aquest efecte pel fet que durant el preescalfament del combustible no cremat, els elements situats a les vores del llit reben menys calor que aquells més propers al centre del llit. A més a més, observaren també que aquest efecte de vora era menys significatiu en els llits de major amplada i que alhora era en aquests llits en els que s'assolien velocitats de propagació més elevades. No obstant, Wolff *et al.* (1991) destacaren que la instal·lació en què treballaren no era suficientment gran, quant a amplada, per tal d'obtenir un valor asimptòtic de la velocitat de propagació al centre del llit.

En relació a la instal·lació experimental, Wolff *et al.* (1991) apuntaren que la distància entre el llit de combustible i les parets o tancaments de la instal·lació podien també afectar al flux del foc i del plomall, de manera que això podia contribuir a incrementar la velocitat de propagació en els llits més amples. Per tant, van concloure que la velocitat de propagació depenia no només de l'amplada del llit de combustible sinó que també de l'amplada de la instal·lació experimental.

A més a més, Wolff *et al.* (1991) varen realitzar proves en llits en què l'amplada anava disminuint progressivament amb la intenció d'intentar reproduir fronts de flama el més rectilinis possibles. Comparant els valors de velocitats de propagació en aquests llits amb els mesurats en els llits d'amplada fixa en què es desenvoluparen fronts curvilinis observaren que en el primer cas es podien assolir velocitats del mateix ordre de magnitud que en llits de majors dimensions i amplada constant. Wolff *et al.* (1991) observaren que a mesura que el llit esdevenia més i més estret la velocitat de propagació es reduïa dràsticament, fins que en alguns casos el foc s'extingia. Els autors apuntaren que això era degut a un canvi en els mecanismes que determinen la propagació.

A finals de la dècada dels noranta, Wotton *et al.* (1999) publicaren un treball enfocat també a l'estudi de l'efecte de l'amplada del front de flames en la velocitat de propagació, però en aquest cas, específic per a incendis de superfície de baixa intensitat i en condicions de poc vent. Per a això, els autors partiren de la base que un dels mecanismes fonamentals de la propagació d'aquest tipus d'incendis és el preescalfament per radiació del combustible. Així, realitzaren el càlcul de la radiació emesa pel front de flames per tal de determinar l'extensió d'aquest que contribuïa a l'escalfament del combustible situat per davant del front de flames.

A banda dels càlculs teòrics realitzaren també sèries experimentals simultànies en una plantació de pi, variant l'amplada del front de flames entre 0,5 m i 10 m, en les que mesuraren la radiació total emesa pel front de flames. D'aquests resultats Wotton *et al.* (1999) observaren que per a fronts de flama de 2 m a 5 m la radiació es mantenia constant, tal i com apuntaven els valors calculats teòricament. Així, concloueren que pel tipus d'incendis estudiats, fronts de flama superiors a 2 m tenien un efecte addicional petit en relació a l'energia que rep el combustible situat per davant del front de flames. Dit d'una altra manera, determinaren que la dependència de la velocitat de propagació amb l'amplada del front de flames era feble per a fronts de flames de més de 2 m.

Morandini *et al.* (2001b) estudiaren l'efecte de l'amplada del front de flames en la propagació del foc per tal d'aconseguir prediccions més acurades amb models desenvolupats anteriorment pels mateixos autors (Santoni *et al.*, 1999), a partir de millorar-ne la formulació de la transferència de calor. Per a això dugueren a terme diverses proves a laboratori en llits d'agulles de pi –*Pinus halepensis* i *Pinus pinaster*– de diferents amplades –20 cm, 58 cm i 100 cm– emprant càrregues de combustible de 0,4 kg/m² i 1,2 kg/m², i compararen els resultats experimentals amb els obtinguts amb el model. A més, un tret diferenciador d'aquest estudi és que es va analitzar l'efecte combinat de l'amplada del front de flames i del pendent. Així, es realitzaren assaigs amb diferents angles d'inclinació de la superfície d'avanç del foc –0°, 10°, 20° i 30°.

Pel què fa a la formulació del model i en relació a la propagació pendent amunt, els autors assumiren que la radiació era el mecanisme de transferència de calor dominant i que la convecció induïda per efecte del pendent es podien negligir.

Pel què fa a les proves realitzades sense pendent, Morandini *et al.* (2001b) observaren que la velocitat de propagació als llits de 100 cm foren un 30% i un 40% superiors a les mesurades als llits de 20 cm per a càrregues de *Pinus halepensis* de 0,4 kg/m² i 1,2 kg/m² respectivament. Pel *Pinus pinaster* aquests valors foren iguals al 10% i 20% respectivament. Tot i això, els autors observaren que l'efecte de l'amplada del llit de combustible en la velocitat de propagació no era significativa al comparar els resultats entre els llit de 58 cm i 100 cm. De manera que concloueren que per a fronts de flama bàsics la dependència entre la velocitat de propagació i l'amplada del front de flames era petita i que per tant suposar un valor constant de la velocitat de propagació no constituïa una suposició errònia.

Pel què fa a les proves amb pendent, Morandini *et al.* (2001b) observaren que per a pendents de 30° els resultats obtinguts no eren reproduïbles, ja que en aquests casos la longitud del llit –1,5 m– no era suficient perquè el front de flames assolís un règim de propagació estacionari i per tant una velocitat constant. Pel què fa a l'efecte de l'amplada del front de flames en la velocitat de propagació en presència de pendent observaren que aquest era major per la càrrega superior de combustible, seguint la mateixa tendència que els resultats obtinguts en les proves sense pendent. En el cas d'un pendent de 20°, Morandini *et al.* (2001b) determinaren que els fronts de flama de 100 cm avançaven un 100 % i un 60 % més ràpid que els fronts de 20 cm d'ample en llits d'agulles de *Pinus halepensis* i *Pinus pinaster*,

respectivament. Així, els autors apunten que el foc avança més ràpidament en llits de combustible amples que no pas en llits estrets a causa de la major quantitat d'energia radiant que incideix sobre la superfície del llit de combustible.

A més, Morandini *et al.* (2001b) detectaren que quan el foc propaga pendent amunt, el front de flames desenvolupa un perfil curvilini a mesura que el foc creix, fins a assolir una curvatura límit quan el foc assoleix l'estat estacionari. A més determinaren que la curvatura límit del front era dependent del valor del pendent.

Morandini *et al.* (2001b) concloueren que els mecanismes de transferència de calor des del front cap a les partícules no cremades situades per davant del front de flames eren fonamentalment els mateixos fins a valors del pendent de 20°. En aquest sentit els autors notaren que a mesura que augmentava el pendent, disminuïa el temps que triga el combustible en assolir la temperatura d'ignició, ja que esdevenen importants altres mecanismes de transferència de calor, com la convecció.

A més, Morandini *et al.* (2001b) concloueren també que la longitud de la línia d'ignició influïa el perfil del front de flames en l'estadi inicial de creixement en condicions de pendent i per tant influïa considerablement en la velocitat de propagació. En aquest sentit determinaren que els efectes de l'amplada del front de flames observats a laboratori en flames de fins a 1 m d'altura, havien d'existir també en els incendis forestals a camp amb altures de flama superiors.

Altres treballs en els que apareix el concepte d'extensió del front de flames però amb distintes definicions es poden trobar a Weber (1989), Cheney *et al.* (1993) i Cheney i Gould (1995).

En el primer cas, Weber (1989) suggereix, a partir d'un desenvolupament teòric, que la velocitat de propagació asimptòtica ha d'estar relacionada amb la curvatura del front de flames. A més, Weber (1989) determina que l'acceleració del foc està relacionada també amb la curvatura, i que quan major és la curvatura, major és també l'acceleració del foc.

Cheney *et al.* (1993) i Cheney i Gould (1995) analitzaren el comportament del foc en la seva fase de creixement, ja que és durant aquesta fase en la que les tasques d'extinció resulten més efectives. Part d'aquests treballs s'enfocaren a estudiar l'efecte de l'amplada del front de flames –amplada efectiva d'acord a la terminologia emprada pels autors– en la velocitat de propagació. Més concretament, en la velocitat de propagació asimptòtica, entesa com la velocitat a la que es propagaria un incendi un cop completada la fase de creixement, i que segons els autors és la velocitat que haurien d'intentar predir els models de comportament.

Per a això dugueren a terme diverses proves en herbassars. A diferència dels estudis presentats fins ara, en aquestes proves la línia d'ignició va ser inferior a l'amplada de la parcel·la, atès que es volia estudiar el creixement del foc, de manera que el perfil que desenvolupava el front presentava no només

cap sinó també flancs. Així, els autors definiren l'amplada efectiva del front de flames com l'amplada del foc mesurada perpendicularment a la direcció de propagació del cap de l'incendi, i per tant també perpendicular a la direcció del vent, que afectava la forma i mida del cap de l'incendi. Altrament, els autors definiren l'amplada efectiva del front com la porció del perímetre en què les flames s'inclinaven vers el combustible no cremat.

De les proves experimentals els autors observaren que durant focs simultanis, i per tant en les mateixes condicions de vent, aquells que desenvolupaven un cap més estret i puntí agut avançaven més lentament que aquells que adquirien formes parabòliques i més amples. Aquest fet quedà també palès en les dades que mostraren que la relació entre la velocitat asimptòtica de propagació i la velocitat del vent no era consistent en termes estadístics, suggerint que l'amplada efectiva del front podia influenciar també la propagació del foc. A més, detectaren també que l'amplada efectiva del front de flames necessària per assolir la velocitat de propagació asimptòtica potencial incrementava a mesura que augmentava la velocitat del vent.

Els autors d'aquests treballs (Cheney *et al.*, 1993 i Cheney i Gould, 1995) conclogueren que els models formulats a partir de dades de focs experimentals que no s'haguessin deixat créixer fins a una amplada del front superior als 100 m probablement tendiran a subestimar la velocitat de propagació del foc, particularment per a velocitats elevades del vent. Per tant, suggereixen anar en compte amb les prediccions d'aquests models, ja que aquestes dependran de la forma i mida del front en condicions de vent i pendent. En aquest sentit assenyalaren les importants implicacions de l'amplada efectiva del front en el disseny i anàlisi de les dades experimentals, indicant la necessitat d'emprar lleis d'escala en la predicció de la propagació del foc en condicions d'elevada velocitat del vent.

Aquesta breu revisió bibliogràfica ha posat de manifest que la forma i mida del front de flames té un efecte destacat en la propagació del foc, i que té també una implicació directa en els mecanismes de preescalfament del combustible situat per davant del front de flames. A més, d'acord a aquesta revisió, es proposa en aquest treball determinar la longitud del front de flama com la longitud del perfil del front.

Pel què fa al rang de valors que pot assolir aquesta variable a l'escenari experimental de laboratori, està limitat per les dimensions de la instal·lació experimental, al igual que en l'experimentació a camp està restringida per les dimensions de la parcel·la, si la metodologia experimental implica la ignició de tota l'amplada de la parcel·la. Si no és així, el foc creix desenvolupant un perímetre configurat pel front i pels flancs.

Rang de valors de les variables que descriuen la geometria del front de flames en els diferents models experimentals

La Taula 3.29 recull el rang de valors que poden presentar els descriptors geomètrics del front de flames. Com en el cas de les variables que descriuen el comportament del foc, cal anar en compte a l'hora d'utilitzar la informació recollida en aquesta taula.

Taula 3.29 Rang de valors que assolixen normalment les variables que caracteritzen la geometria del front de flames.

Variable [unitats]	Llit de combustible	FVS – Subtipus I	FVS – Subtipus II	FVC
Altura de flama [m]	0,1 - 1,5	0,3 - 4,0	0,5 - 4,0	0,3 - 10
Longitud de flama [m]	0,1 - 2,5	0,5 - 8,0	0,8 - 8,0	0,5 - 15
Gruix de flama [m]	0,05 - 0,5	0,5 - 1,5	0,5 - 2,0	0,5 - 4,0
Angle d'inclinació [°]	0 - 170	0 - 170	0 - 170	0 - 170
Longitud del front de flames [m]	0,25 - 5,00	10 - 500	10 - 500	10 - 10000

FVS: Formació Vegetal Simple; FVC: Formació Vegetal Complexa

3.5. Variables que descriuen el plomall

El plomall que formen els gasos de combustió es pot descriure en termes de la seva composició química, o en termes de les seves propietats fluidodinàmiques i tèrmiques.

Pel què fa a la composició de la mescla de gasos que configura el plomall, aquesta és molt complexa i està formada per gran quantitat de productes com: C, CO, CO₂, H₂O, CH₄, H₂, C₂H₆, etc., tot i que sovint es simplifica i s'assumeix formada únicament per CO, CO₂, H₂O, O₂ i N₂ (Zhou *et al.*, 2005). La composició de la mescla de gasos que formen el plomall és el resultat dels tipus de combustible involucrat en l'incendi, de la seva composició química i del comportament del foc.

En molts casos, però, en la modelització dels incendis forestals s'acostuma a assumir que les reaccions de combustió acaben a la punta de la flama, de manera que en el plomall no tenen lloc reaccions químiques d'oxidació, especialment si únicament es para atenció al flux de l'incendi. En aquests casos a més, s'assumeix normalment que els gasos que formen el plomall es comporten com un gas ideal, de manera que es determinen les seves característiques com si es tractés d'aire (Cruz, 2004). Llavors les principals característiques que descriuen el plomall són doncs la velocitat, temperatura, viscositat, densitat i altres característiques tèrmiques com la conductivitat o la capacitat calorífica. D'entre totes aquestes, les més estudiades han estat la velocitat i la temperatura dels gasos del plomall per les seves implicacions en l'estructura i la propagació del foc, especialment en els incendis de capçades (Cruz, 2004). Per això a continuació s'analitzen en més detall aquestes dues variables.

Velocitat dels gasos de combustió

La velocitat dels gasos de combustió és una variable que s'utilitza per a caracteritzar el flux de l'incendi. Tanmateix, ateses les característiques del flux en un incendi forestal –turbulència, reactivitat i intermitència– resulta difícil la mesura de la velocitat dels gasos de combustió. En aquest sentit, el valor de la velocitat fluctua en l'espai i el temps, de manera que resulta més útil la determinació d'un perfil de velocitats que no pas un valor puntual, tot i que això requereix també d'un major esforç. Precisament per això la major part dels treballs en què s'estudia aquesta variable s'han dedicat a la seva modelització. Així, a la literatura es poden trobar models relativament senzills com el de Raupach (1990) o el de Nelson (2002), o models més complexos com el de Portiere *et al.* (1999) o Marcelli *et al.* (2004) que permeten caracteritzar tot el camp de velocitats i també de temperatures del plomall resolent les equacions de conservació de la matèria, la quantitat de moviment i l'energia.

L'aparició de noves tècniques de mesura com per exemple la velocimetria làser Doppler (Dupuy *et al.*, 2006) o el processament d'imatges tèrmiques (Zhou *et al.*, 2003) facilita la determinació de la velocitat dels gasos al plomall. Tot i això, aquestes tècniques es troben encara en un estadi inicial de desenvolupament. Probablement per això a la bibliografia no es troben pràcticament dades de la velocitat dels gasos de combustió i únicament s'han trobat dades corresponents a proves de laboratori. Per exemple, Marcelli *et al.* (2004) determinaren valors per a la velocitat dels gasos entre 0,5 m/s i 1,5 m/s aproximadament, en funció de l'altura en què es realitzà la mesura, en llits d'agulles de pi de 0,5 kg/m². D'altra banda, Dupuy *et al.* (2006) mesuraren en focs estàtics d'agulles de pi de 1 kg/m² velocitats mitjanes de flux de l'ordre dels 3 m/s.

Temperatura del plomall

Com en el cas de la velocitat dels gasos, la temperatura d'aquests és també una variable que fluctua en l'espai i el temps, de manera que és desitjable l'obtenció de perfils de temperatura més enllà de valors puntuals. En general, al llarg del plomall es produeix un ràpid descens de les temperatures en funció de l'altura, tot i que també influeixen altres factors com la intensitat del front de flama, l'altura de la vegetació, les condicions ambientals i les possibles turbulències.

Existeixen diversos models que determinen la variació de la temperatura a la flama i el plomall en funció de l'altura (McCaffrey, 1979; Morandini *et al.*, 2002a; Weber *et al.*, 1995). Aquests models tenen un caràcter semi-empíric ja que tot i partir del desenvolupament teòric presenten paràmetres que cal ajustar mitjançant dades experimentals. D'altra banda, tal i com ja s'ha comentat a l'apartat anterior, existeixen també models més complexos que permeten caracteritzar el plomall i per tant també la seva temperatura (Portiere *et al.*, 1999; Marcelli *et al.*, 2004).

A tall d'exemple, per tal de tenir una idea de l'ordre de magnitud que pot presentar aquesta variable, Trabaud (1992) va observar temperatures de tan sols 100°C a una altura de 6 m del sòl en incendis de superfície en matollars de 1,5 m d'altura. Mentre que en incendis amb flames entre 15 m i 18 m d'altura, la temperatura a aproximadament 30 m era de 340°C.

RESUM

Any rere any milions d'hectàrees són destruïdes pels incendis forestals, no només a Europa sinó arreu del món, tan sols cal recordar els dramàtics episodis viscuts a Califòrnia i Austràlia recentment. A banda de l'evident impacte mediambiental que això provoca –emissió de gasos d'efecte hivernacle, pèrdua de biodiversitat, acceleració de l'erosió del sòl, etc.– els incendis són també un problema social de primer ordre, que posa en perill a les persones i els seus béns.

Davant d'aquesta situació, en les darreres dècades s'ha impulsat fortament la recerca en l'àmbit dels incendis forestals. Tanmateix, l'estudi dels incendis forestals és certament complex per les condicions i l'entorn on aquests es desenvolupen, a banda també del gran nombre de fenòmens –físics, químics i socials– que interaccionen al llarg de diferents escales espacials i temporals, per a donar lloc a l'inici i propagació del foc. És per això que bona part de la recerca sobre el comportament dels incendis forestals ha tingut lloc bàsicament al laboratori, tot i que qüestions com ara com traslladar aquests resultats experimentals als incendis reals, o bé fins a quin punt aquest tipus d'experimentació és útil o què és el que realment es pot extrapolar i què no, no han tingut encara cap resposta clara.

L'objectiu d'aquesta tesi ha estat doncs el de contribuir a l'estudi del canvi d'escala en l'experimentació en incendis forestals pel què fa al comportament del foc, mitjançant les tècniques de l'anàlisi dimensional i de semblança. En primer lloc s'ha realitzat una extensa revisió bibliogràfica centrada bàsicament en aquells treballs que havien aplicat d'alguna manera o altra l'anàlisi dimensional i de semblança a l'estudi dels incendis i en particular dels incendis forestals. S'ha vist que no es possible realitzar un escalatge complet d'aquest fenomen i que el més utilitzat ha estat l'escalatge de Froude. A més s'ha detectat que mai abans s'ha aplicat aquest tipus d'anàlisi als models que s'utilitzen normalment avui dia en l'experimentació de laboratori. A continuació s'ha fet doncs una anàlisi

exhaustiva de totes les variables que determinen el comportament d'un incendi forestal en els diferents escenaris experimentals (de laboratori i de camp). A partir d'aquestes variables s'ha realitzat una anàlisi dimensional per a estudiar la propagació d'un front de flames –tan bàsic com en condicions de vent i pendent– així com una anàlisi de semblança que ha permès obtenir les lleis d'escala per a les diferents variables que caracteritzen la propagació d'un incendi forestal. S'ha dissenyat i executat un programa experimental al laboratori amb l'objectiu de validar si es complien les lleis d'escala trobades i de determinar-ne el rang de validesa i les possibles causes en cas que no es complissin.

Els resultats obtinguts han mostrat que per a fronts de flama bàsics propagant-se sense vent ni pendent, totes les variables analitzades segueixen les lleis d'escala derivades de l'estudi teòric, en el rang de longituds de front de flama que va dels 25 cm als 1,6 m. A més, les lleis d'escala corresponents a la velocitat de propagació i a la geometria de flama s'han pogut validar en un rang de longituds del front de flames superior, dels 25 cm als 4,5 m. Nogensmenys cal remarcar que paràmetres com la humitat i el tipus de combustible o les característiques de la instal·lació experimental utilitzada poden alterar enormement els resultats si no es controlen adequadament. En el cas dels fronts de flama propagant pendent amunt, els resultats han mostrat que les lleis d'escala de la geometria de flama es compleixen per a tot el rang de pendents estudiat que va de 0 fins a 30°, mentre que en el cas de la llei d'escala de la velocitat de propagació deixa de complir-se per a pendents de 30°. Finalment, en el cas dels fronts de flama propagant en condicions de vent, els resultats han mostrat que per a velocitats del vent superiors a aproximadament 2,5 m/s les lleis d'escala tant de la velocitat de propagació com de la geometria de flama deixen de complir-se. Tot i que a partir de velocitats del flux superiors a 1,5 m/s ja comencen a observar-se irregularitats.

Al final d'aquest treball s'apunten les causes que poden conduir a l'incompliment de les lleis d'escala així com als factors que poden restar validesa als experiments efectuats a escala de laboratori, quan es vol extrapolar els resultats a escales més grans o fins i tot a incendis reals.

4. APLICACIÓ DE L'ANÀLISI DIMENSIONAL. OBTENCIÓ DE LES LLEIS D'ESCALA

En aquest capítol es fa el plantejament del fenomen que es vol estudiar mitjançant l'anàlisi dimensional, és a dir el de la propagació d'un front de flames bàsic, d'un front de flames conduït pel vent i d'un front de flames avançant pendent amunt. Es formulen també les hipòtesis considerades, necessàries tant per al plantejament del problema com per a la seva resolució ateses les eines de modelització utilitzades.

Una vegada plantejat el fenomen, es presenta l'aplicació pràctica de l'anàlisi dimensional, fins a obtenir els grups no dimensionals segons les condicions de propagació, per a aplicar posteriorment el principi de semblança i obtenir així les lleis d'escala necessàries per al plantejament i disseny dels programes experimentals al laboratori.

4.1. Descripció del fenomen a estudiar

4.1.1. Propagació d'un front de flames bàsic

En aquest treball s'estudia la propagació d'un front de flames bàsic en un llit de combustible porós i isòtrop. Aquest és un cas que sovint es considera com a ideal, ja que a la natura és molt poc freqüent la propagació d'un incendi en condicions sense vent ni pendent, i en complexos de combustible amb aquestes característiques. Nogensmenys, aquesta simplificació ha estat molt utilitzada, precisament per la seva senzillesa, com a primer pas abans d'abordar situacions més complexes. Descriure la propagació d'un front de flames implica parlar de la gran varietat de fenòmens que hi prenen part, tal i com s'ha anat detallant al llarg d'aquest treball. Per exemple, es pot parlar de transferència de calor bé sigui per radiació, convecció o conducció i que es produeixi entre la flama i el combustible no cremat, o dintre de la flama entre els gasos combustibles i les partícules de sutge, etc. Tanmateix, incloure tots aquests fenòmens, implicaria integrar un nivell de complexitat al problema que probablement no es veuria traduït en solucions més precises.

Per a l'aplicació de l'anàlisi dimensional es tingué en compte que la propagació d'un front de flames bàsic implicava els processos descrits a continuació i esquematitzats a la Figura 4.1.

- La generació de volàtils a la part del llit de combustible no cremada per la calor subministrada des de la zona de combustió (Zona de preescalfament).
- La reacció entre el vapor combustible i l'oxigen alliberant calor i generant productes de combustió calents que es mouen de forma ascendent formant un plomall. Aquest moviment provoca alhora l'entrada d'aire fred tant a la flama com al plomall (Zona de combustió).

Val a dir, que aquests processos coincideixen amb els que altres autors han considerat com a principals per a formular models de propagació en aquestes condicions (Porterie *et al.*, 1998). Tot i això, cal puntualitzar que no ha estat tinguda en compte la possible combustió residual un cop el front de flames ha passat per una zona. A més a més, tampoc s'ha entrat en detall en els processos que tenen lloc específicament a l'interior del llit de combustible entre la fase sòlida i la fase gasosa. En aquest sentit l'anàlisi es centra en un element situat a la superfície del llit de combustible, no només perquè aquesta suposició simplifica el model, sinó que també perquè és la capa superficial de combustible la que entra en ignició en primer lloc i segons De Mestre *et al.* (1989) governa la velocitat de propagació.

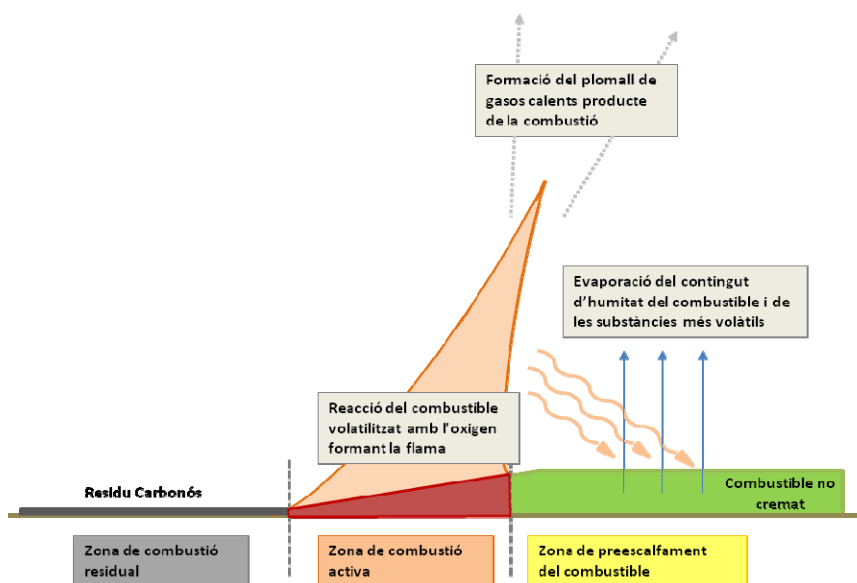


Figura 4.1 Processos implicats en la propagació d'un front de flames bàsic.

A més, per a facilitar l'aplicació de l'anàlisi dimensional es consideraren també les següents hipòtesis:

- La propagació té lloc en règim estacionari.
- El llit de combustible és isòtrop i les partícules de combustible es troben homogèniament distribuïdes.
- Les partícules de combustible es considera que tèrmicament tenen resistència interna negligible, fet que implica que no es produeix variació de temperatura al seu interior.
- Les partícules de combustible són cossos grisos i opacs.
- La velocitat de la reacció de combustió és infinitament ràpida.
- Les reaccions exotèrmiques degudes a l'oxidació del gasos de piròlisi acaben a la punta de la flama, és a dir, a la base del plomall.
- La transferència de calor per conducció al llit de combustible es pot considerar negligible.

Així, les forces dominants de la propagació d'acord amb les hipòtesis descrites són les inercials i les d'empenta ascensional, de manera que es poden negligir les forces viscoses.

4.1.2. Estudi de la propagació d'un front en presència de pendent o vent

El fet d'incorporar factors com el vent o el pendent en la propagació d'un front de flames afecta als mecanismes dominants de la propagació (vegeu capítol 1). A continuació s'especifiquen les consideracions addicionals a les del cas bàsic a tenir en compte a causa de la presència de vent o de pendent.

Propagació en presència de pendent

Pel cas d'un front de flames propagant pendent amunt, es va considerar que les forces de flotabilitat o d'empenyiment aerostàtic esdevenien dominants, de manera que s'assumí que les flames es mantindrien verticals i no hi hauria solapaments entre les flames i el combustible no cremat a causa del pendent.

Propagació en presència de vent

El vent afecta al comportament del foc augmentant la velocitat de producció d'energia i la velocitat de transferència de calor exposant el combustible no cremat a fluxos de calor radiatius i convectius addicionals. A banda, la presència de vent provoca la inclinació de les flames vers el combustible no cremat, de manera que l'angle d'inclinació resulta de la competició entre les forces de flotabilitat i el vent. A més, provoca també l'allargament de les flames, l'augment del gruix del front de flames i un increment de l'entrada d'aire a la flama i el plomall (Cruz *et al.*, 2004).

Com en el cas anterior, es va suposar també que tot i la inclinació de les flames, aquesta no arribaria mai a ser suficient com per a provocar el solapament de la flama amb el combustible no cremat.

Així, tant l'efecte del pendent com el del vent es tingueren en compte a partir dels canvis que produeixen en la geometria del front de flames i en les variables que descriuen la propagació, com per exemple la velocitat de propagació.

4.2. Aplicació del Teorema de *Vaschy-Buckingham* a la propagació d'un front de flames bàsic

En aquest apartat es descriu l'aplicació pràctica del teorema de *Vaschy-Buckingham* a la propagació d'un front de flames bàsic, d'acord a les hipòtesis formulades a l'apartat anterior. Aquesta tècnica comprèn els següents passos, tal i com s'ha detallat més extensament al capítol 1:

- Pas 1. Selecció de variables
- Pas 2. Determinació de la base dimensional
- Pas 3. Obtenció de la matriu dimensional
- Pas 4. Selecció de les variables fonamentals
- Pas 5. Formulació de les equacions dimensionals
- Pas 6. Formació dels grups no dimensionals

4.2.1. Selecció de variables (Pas 1)

Al capítol 3 s'ha realitzat una anàlisi completa de les variables que intervenen en l'estudi de la propagació d'un incendi forestal, d'acord als models experimentals més freqüents en l'experimentació en incendis forestals. Aquesta anàlisi ha estat la base per a fer la selecció de variables per a l'aplicació

del teorema de *Vaschy-Buckingham*. D'aquesta manera, tot seguit es presenten les variables seleccionades agrupades segons si descriuen el combustible, el comportament o geometria del front de flames, el plomall o l'entorn.

Variables que descriuen el combustible

Per tal de descriure el llit de combustible com a conjunt cal tenir en compte tant aspectes geomètrics com aspectes relatius a la seva configuració i també al seu comportament tèrmic.

En relació a la geometria del llit, aquesta queda completament definida mitjançant les seves dimensions característiques, és a dir, amplada, longitud i altura. Tanmateix, a la natura, en general la vegetació no es troba confinada en un determinat espai, de manera que ni amplada ni longitud són dues variables que s'utilitzin per a caracteritzar el combustible implicat en un incendi forestal. Precisament per això, es decidí seleccionar únicament com a descriptor geomètric del llit de combustible la seva **altura** (h). A banda, tenint en compte que una de les hipòtesis de partida és que la propagació té lloc en règim estacionari, la presència de la longitud del llit tampoc tindria massa sentit, sempre i quan aquesta hipòtesi sigui vàlida.

Pel què fa a les variables relacionades amb la configuració del llit, partint de la suposició que aquest serà homogeni, es pot caracteritzar mitjançant la quantitat de combustible present, la seva porositat o distribució en altura. Per tal de considerar aquests aspectes es varen escollir les següents variables: la **càrrega de combustible** (C) i la **densitat aparent** (ρ_{ap}).

Per a descriure el comportament tèrmic del llit de combustible com a conjunt, i d'acord a les hipòtesis de partida es varen seleccionar **l'increment de temperatura de la superfície del llit** ($T_s - T_a$), el **coeficient de convecció** a la superfície del llit (h_{cs}), i la longitud del llit de combustible situada per davant del front de flames preescalfada pel foc i que ha estat anomenada **longitud de preescalfament** (l_s).

Per últim, es va considerar també una altra variable relacionada amb el combustible que com s'ha vist al capítol 1 juga un paper fonamental en la propagació d'un incendi, la **humitat del combustible** (H_s).

Pel què fa a la caracterització de les partícules de combustible, d'acord al capítol 1 i a l'anàlisi de variables realitzat al capítol 3, es varen seleccionar les següents variables: la **densitat del combustible** (ρ_m), el **diàmetre o dimensió característica** de les partícules (d_c), la **relació superfície - volum** (σ_s), i el **poder calorífic inferior** (PCI). Cal destacar que es va escollir el poder calorífic inferior en lloc del poder calorífic superior ja que el valor d'aquesta primera variable és més representatiu de la calor alliberada durant la combustió.

Variables que descriuen el comportament del foc i la geometria del front de flames

Pel què fa a les variables considerades per a descriure el comportament del foc, foren seleccionades les següents: la **velocitat de propagació** (R), la **velocitat de combustió** (V), la **intensitat** del front de flames (I), el **poder emissiu** de les flames (E), el **temps de residència** (t_r) i l'**increment de temperatura a la flama** ($T_f - T_a$).

La geometria de flama es pot descriure mitjançant diverses variables, d'acord al capítol 1. Per a dur a terme aquesta anàlisi es varen triar la **longitud de la flama** (L_f), l'**altura de la flama** (H), el **gruix del front de flames** (S_f) i per últim la **longitud del front de flames** (W) atesa la seva importància en la propagació d'un incendi tal i com s'ha especificat al capítol 3. L'angle d'inclinació de la flama no es va seleccionar ja que d'una banda, queda determinat per la relació entre la longitud i l'altura de la flama, i per altra banda perquè l'inclusió d'una variable adimensional implicaria que s'hauria de mantenir el seu valor constant al llarg de les diferents escales, restricció aquesta que seria molt complicada de seguir al llarg de l'experimentació.

A banda, cal notar que tot i que s'han inclòs variables que poden semblar repetitives –com per exemple l'altura i la longitud de flama–, o variables relacionades entre elles –per exemple, el gruix de la flama, el temps de residència i la velocitat de propagació–, es decidí fer-ho així per a posteriorment veure si els resultats experimentals mostrarien diferències entre aquestes variables, de manera que alguna d'elles resultés ser més significativa a l'hora de caracteritzar el canvi d'escala.

Variables que descriuen el plomall

La composició química dels gasos calents que formen el plomall depèn de la completesa de la reacció de combustió, de les condicions en què té lloc i de la composició inicial del combustible vegetal. Tanmateix, d'acord a les hipòtesis de partida, al plomall no tenen lloc reaccions exotèrmiques de manera que aquest està compost únicament pels productes de la combustió.

Així, per a caracteritzar el plomall es varen seleccionar les següents variables: la **densitat** (ρ_g), la **conductivitat tèrmica** (k_g), la **viscositat** (μ_g), el **coeficient d'expansió tèrmica** (β_g), l'**increment de temperatura al plomall** ($T_g - T_a$) i la **velocitat dels gasos** (u_g).

No obstant, es va assimilar, tal i com s'ha detallat al capítol 3, que els gasos de combustió es comportaven com a aire sec pel què fa a les seves propietats termodinàmiques.

Variables que descriuen l'entorn

L'entorn en què el foc propaga fa referència en aquest treball a les condicions ambientals en què l'incendi transcorre. Per a això es seleccionaren les següents variables: la **capacitat calorífica** de l'aire (c_{pa}), la **densitat** de l'aire (ρ_a), la **conductivitat tèrmica** de l'aire (k_a), la **viscositat** de l'aire (μ_a), el **coeficient d'expansió tèrmica** de l'aire (β_a) i la **velocitat induïda** (u_a).

La humitat relativa no es va considerar, ja que s'assumí que el seu efecte quedava reflectit en la variació experimentada per la humitat del combustible.

La Figura 4.2 mostra un esquema de les variables seleccionades per a descriure el problema plantejat.

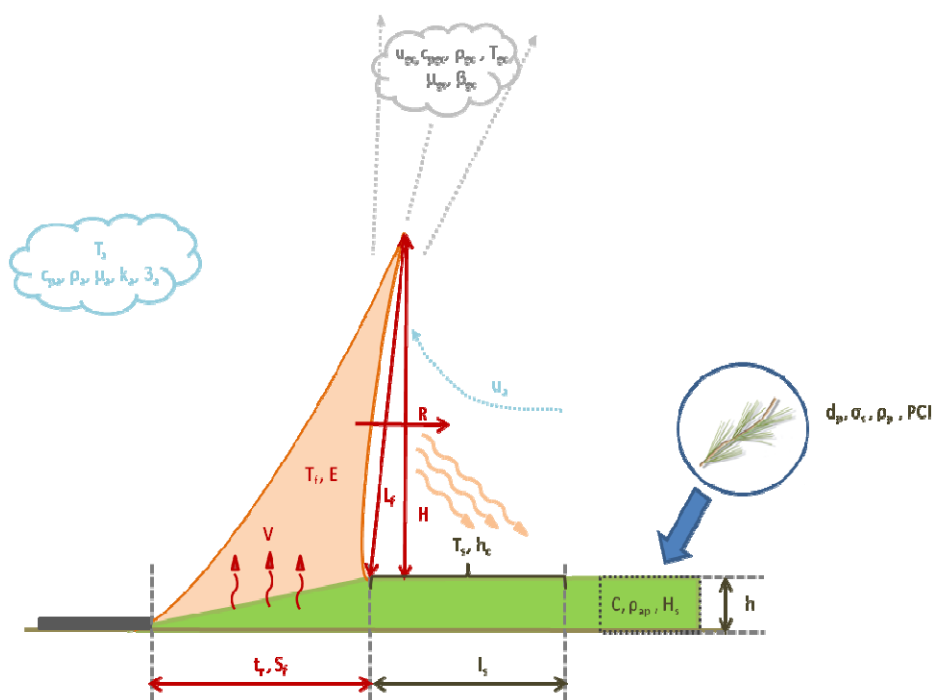


Figura 4.2 Esquema de les variables seleccionades a excepció de la longitud del front de flames per a aplicar l'anàlisi dimensional a la propagació d'un front de flames bàsic.

Constants

Per tal d'aplicar el teorema de *Vaschy-Buckingham*, cal seleccionar també constants universals que es cregui que poden influenciar en els resultats. En aquest cas foren considerades **l'acceleració de la gravetat (g)**, **la constant d'Stefann-Boltzman (σ)**, i **la constant dels gasos (R_g)**.

4.2.2. Obtenció dels grups no dimensionals (Pas 2 - Pas 6)

Després de dur a terme la selecció de variables que s'inclouran en l'anàlisi, cal definir la base dimensional que s'utilitzarà. En aquest cas, es considerarà la base tradicional que inclou les següents magnituds fonamentals: longitud (L), massa (M), temps (T) i temperatura (θ). Fent la relació de les dimensions de totes les variables seleccionades en funció de les dimensions fonamentals s'obtingué la matriu dimensional corresponent (Taula 4.1).

Taula 4.1 Matriu dimensional. En blau s'han indicat les variables fonamentals seleccionades.

Variabls	Unitats	Símbol	L	M	T	θ
Longitud de preescalfament	[m]	l_s	1	0	0	0
Altura del lit	[m]	h	1	0	0	0
Càrrega de combustible	[kg·m ⁻²]	C	-2	1	0	0
Densitat aparent	[kg·m ⁻³]	ρ_{ap}	-3	1	0	0
Humitat del combustible	[%]	H_s	0	0	0	0
Temperatura del lit de combustible	[K]	$T_s - T_a$	0	0	0	1
Coefficient de convecció superfície lit	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	h_{cs}	0	1	-3	-1
Densitat del combustible	[kg·m ⁻³]	ρ_m	-3	1	0	0
Diàmetre de les partícules	[m]	d_c	1	0	0	0
Poder calorífic inferior	[J·kg ⁻¹]	PCI	2	0	-2	0
Relació superfície - volum	[m ² ·m ⁻³]	σ_s	-1	0	0	0
Velocitat de propagació	[m·s⁻¹]	R	1	0	-1	0
Velocitat de combustió	[kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	V	-2	1	-1	0
Gruix del front de flames	[m]	S_f	1	0	0	0
Longitud del front de flames	[m]	W	1	0	0	0
Altura de flama	[m]	H	1	0	0	0
Longitud de flama	[m]	L_f	1	0	0	0
Intensitat del front de flames	[W·m ⁻¹]	I	1	1	-3	0
Poder emissiu de les flames	[W·m ⁻²]	E	0	1	-3	0
Temps de residència	[s]	t_r	0	0	1	0
Temperatura de la flama	[K]	$T_f - T_a$	0	0	0	1
Densitat dels gasos	[kg·m ⁻³]	ρ_g	-3	1	0	0
Conductivitat tèrmica dels gasos	[J·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹]	k_g	1	1	-3	-1
Viscositat dels gasos	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻¹]	μ_g	-1	1	-1	0
Coefficient d'expansió tèrmica gasos	[K ⁻¹]	β_g	0	0	0	-1
Temperatura dels gasos	[K]	$T_g - T_a$	0	0	0	1
Velocitat dels gasos	[m·s ⁻¹]	u_g	1	0	-1	0
Capacitat calorífica de l'aire	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	c_{pa}	2	0	-2	-1
Densitat de l'aire	[kg·m ⁻³]	ρ_a	-3	1	0	0
Conductivitat tèrmica de l'aire	[J·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹]	k_a	1	1	-3	-1
Viscositat de l'aire	[kg·s⁻¹·m⁻¹]	μ_a	-1	1	-1	0
Coefficient d'expansió tèrmica de l'aire	[K ⁻¹]	β_a	0	0	0	-1
Velocitat induïda	[m·s ⁻¹]	u_a	1	0	-1	0
Constant dels gasos	[J·K ⁻¹]	R_g	2	0	-2	-1
Constant d'Stefan - Boltzmann	[J·m ⁻² ·s ⁻¹ ·K ⁻⁴]	σ	0	1	-3	-4
Acceleració de la gravetat	[m·s⁻²]	g	1	0	-2	0

A partir de la matriu dimensional, i seleccionant com a variables fonamentals la velocitat de propagació, l'increment de temperatura a la flama, la viscositat de l'aire i l'acceleració de la gravetat (indicades en blau a la Taula 4.1), s'obtingueren els següents grups no dimensionals (Taula 4.2):

Taula 4.2 Grups no dimensionals obtinguts de l'aplicació de l'anàlisi dimensional.

Grups no dimensionals			
$\pi_1 = \frac{R^2}{l_s \cdot g}$	$\pi_9 = \frac{R^2}{d_c \cdot g}$	$\pi_{17} = \frac{l}{\mu_a \cdot R^2}$	$\pi_{25} = \frac{u_g}{R}$
$\pi_2 = \frac{R^2}{h \cdot g}$	$\pi_{10} = \frac{PCI}{R^2}$	$\pi_{18} = \frac{E}{\mu_a \cdot g}$	$\pi_{26} = \frac{c_{pa} \cdot (T_f - T_a)}{R^2}$
$\pi_3 = \frac{C \cdot R}{\mu_a}$	$\pi_{11} = \frac{\sigma_s \cdot R^2}{g}$	$\pi_{19} = \frac{R}{\tau_r \cdot g}$	$\pi_{27} = \frac{\rho_a \cdot R^3}{\mu_a \cdot g}$
$\pi_4 = \frac{\rho_{ap} \cdot R^3}{\mu_a \cdot g}$	$\pi_{12} = \frac{V \cdot R^2}{\mu_a \cdot g}$	$\pi_{20} = \frac{\rho_g \cdot R^3}{\mu_a \cdot g}$	$\pi_{28} = \frac{k_a \cdot (T_f - T_a)}{\mu_a \cdot R^2}$
$\pi_5 = H_s$	$\pi_{13} = \frac{R^2}{S_f \cdot g}$	$\pi_{21} = \frac{k_g \cdot (T_f - T_a)}{\mu_a \cdot R^2}$	$\pi_{29} = \beta_a \cdot (T_f - T_a)$
$\pi_6 = \frac{T_s - T_a}{T_f - T_a}$	$\pi_{14} = \frac{R^2}{W \cdot g}$	$\pi_{22} = \frac{\mu_g}{\mu_a}$	$\pi_{30} = \frac{u_a}{R}$
$\pi_7 = \frac{h_{cs} \cdot (T_f - T_a)}{\mu_a \cdot g}$	$\pi_{15} = \frac{R^2}{H \cdot g}$	$\pi_{23} = \beta_g \cdot (T_f - T_a)$	$\pi_{31} = \frac{R_g \cdot (T_f - T_a)}{R^2}$
$\pi_8 = \frac{\rho_m \cdot R^3}{\mu_a \cdot g}$	$\pi_{16} = \frac{R^2}{L_f \cdot g}$	$\pi_{24} = \frac{T_g - T_a}{T_f - T_a}$	$\pi_{32} = \frac{\sigma \cdot (T_f - T_a)^4}{\mu_a \cdot g}$

La forma que presenten els grups no dimensionals depèn de les variables fonamentals seleccionades. Tanmateix, els diferents grups es poden combinar entre ells fins a obtenir formes amb un significat físic més comprensible a primera vista.

En la Taula 4.3 es recullen els nombres no dimensionals anteriors, que en alguns casos han estat substituïts per combinacions lineals de diversos nombres, per a facilitar tant la formulació de les lleis d'escala com per a comprendre millor el significat físic d'alguns d'aquests nombres. Aquests nombres es podrien encara reescriure d'acord a altres combinacions entre ells, tanmateix no és objecte d'aquest estudi profunditzar més en aquest sentit ja que independentment de la formulació dels grups no dimensionals s'obtidran les mateixes lleis d'escala.

Taula 4.3 Llistat de nombres no dimensionals amb el corresponent significat físic.

Grups no dimensionals	Significat físic
$\pi_1' = \pi_1 \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \frac{W}{l_s}$	Factors de forma relacionats amb la geometria del sistema tant pel què fa a les característiques del llit de combustible com a les característiques geomètriques del front de flames
$\pi_2' = \pi_2 \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \frac{W}{h}$	
$\pi_9' = \pi_9 \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \frac{W}{d_c}$	
$\pi_{13}' = \pi_{13} \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \frac{W}{S_f}$	
$\pi_{15}' = \pi_{15} \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \frac{W}{H}$	
$\pi_{16}' = \pi_{16} \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \frac{W}{L_f}$	
$\pi_{11}' = \pi_{11} \cdot \frac{1}{\pi_{14}} = \sigma_s \cdot W$	Relació geomètrica de la forma de les partícules
$\pi_8' = \pi_8 \cdot \frac{1}{\pi_4} = \frac{\rho_m}{\rho_{ap}}$	Relació adimensional entre la densitat de partícula i la densitat aparent del llit
$\pi_3' = \pi_3 \cdot \frac{1}{\pi_{22}} = \frac{C \cdot R}{\mu_g}$	Relació entre la quantitat de combustible i la velocitat a la que avança al foc amb la viscositat dels gasos de combustió
$\pi_4 = \frac{\rho_{ap} \cdot R^3}{\mu_a \cdot g}$	Aquest nombre és equivalent al producte de $\pi_2 \cdot \pi_3$ atesa la relació que existeix entre ρ_{ap} , C i h
$\pi_5 = H_s$	Humitat del combustible
$\pi_{10}' = \pi_{10} \cdot \pi_{14} = \frac{PCI}{W \cdot g}$	Paràmetre relacionat amb l'energia per unitat de longitud del front que potencialment es pot alliberar durant l'incendi
$\pi_{12}' = \pi_{12} \cdot \frac{1}{\pi_4} = \frac{V}{\rho_{ap} \cdot R}$	Paràmetre que relaciona la velocitat de combustió amb la velocitat de propagació del foc i la densitat aparent del combustible
$\pi_{17}' = \pi_{17} \cdot \pi_{13} = \frac{I}{\mu_a \cdot g \cdot S_f}$	Paràmetre relacionat amb la intensitat de l'incendi per unitat de superfície de la zona en combustió
$\pi_6 = \frac{T_s - T_a}{T_f - T_a}$	Relació de temperatures adimensional associada amb el preescalfament del combustible
$\pi_7' = \pi_7 \cdot \frac{1}{\pi_{28}} \cdot \frac{1}{\pi_1} = \frac{h_{cs} \cdot l_s}{k_a}$	Expressió equivalent quant a formulació al nombre de Nu
$\pi_{14} = \frac{R^2}{W \cdot g}$	Expressió equivalent quant a formulació, al quadrat del nombre de Fr
$\pi_{18}' = \pi_{18} \cdot \frac{1}{\pi_{17}} = \frac{E \cdot g}{I \cdot R}$	Relació entre el poder emissiu del front de flames i l'energia alliberada pel foc a mesura que avança
$\pi_{19} = \frac{R}{t_r \cdot g}$	Relació entre la velocitat de propagació de l'incendi i el temps de residència del front de flames

Taula 4.3 Llistat de nombres no dimensionals amb el corresponent significat físic (continuació).

Grups no dimensionals	Significat físic
$\pi_{20}' = \pi_{20} \cdot \frac{1}{\pi_{14}} \cdot \frac{1}{\pi_{22}} \cdot \pi_{25} = \frac{\rho_g \cdot u_g \cdot W}{\mu_g}$	Nombre equivalent al nombre de <i>Re</i>
$\pi_{21}' = \pi_{21} \cdot \frac{1}{\pi_{28}} = \frac{k_g}{k_a}$	Relació adimensional entre la conductivitat tèrmica dels gasos de combustió i la de l'aire
$\pi_{22} = \frac{\mu_g}{\mu_a}$	Relació adimensional entre la viscositat dels gasos de combustió i la viscositat de l'aire
$\pi_{23}' = \pi_{23} \cdot \pi_{24} = \beta_g \cdot (T_g - T_a)$	Paràmetre relacionat amb la flotabilitat dels gasos de combustió
$\pi_{24} = \frac{T_g - T_a}{T_f - T_a}$	Relació de temperatures adimensional relacionada amb el gradient de temperatures entre el plomall i la flama
$\pi_{25} = \frac{u_g}{R}$ $\pi_{30} = \frac{u_a}{R}$	Factors de forma corresponents a les velocitats del sistema, és a dir, del foc i dels fluxos d'aire tant naturals com els generats pel propi incendi
$\pi_{26}' = \pi_{26} \cdot \frac{1}{\pi_{28}} = \frac{c_{pa} \cdot \mu_a}{k_a}$	Relació equivalent al nombre de <i>Pr</i>
$\pi_{27}' = \pi_{27} \cdot \frac{1}{\pi_{20}} = \frac{\rho_a}{\rho_g}$	Relació adimensional entre la densitat de l'aire i la densitat dels gasos de combustió
$\pi_{28}' = \pi_{28} \cdot \frac{\pi_6}{\pi_{30}} = \frac{k_a \cdot (T_s - T_a)}{\mu_a \cdot u_a^2}$	Relació entre la conducció de calor i la dissipació causada pel moviment d'aire induït pel foc
$\pi_{29}' = \pi_{29} \cdot \frac{1}{\pi_{23}} = \frac{\beta_a}{\beta_g}$	Relació adimensional entre el coeficient d'expansió tèrmica de l'aire i dels gasos de combustió
$\pi_{31}' = \pi_{31} \cdot \frac{1}{\pi_{10}} = \frac{R_g \cdot (T_f - T_a)}{PCI}$	Relació entre l'energia dels gasos combustibles (flama) i la calor alliberada per la reacció de combustió
$\pi_{32}' = \pi_{32} \cdot \frac{1}{\pi_{18}} = \frac{\sigma \cdot (T_f - T_a)^4}{E}$	Relació entre el poder emissiu total de la flama si fos un cos negre i el seu poder emissiu real, per tant és un indicador de l'emissivitat de les flames

4.3. Aplicació del Teorema de *Vaschy-Buckingham* a la propagació d'un front de flames en presència de vent o pendent

El fet de considerar la presència de vent o pendent en la propagació d'un front de flames a l'hora d'aplicar el teorema de *Vaschy-Buckingham* implica la inclusió de noves variables a banda de les ja seleccionades per a l'estudi de la propagació d'un front de flames bàsic. D'aquesta manera, en aquest apartat es repeteixen els passos que comprèn la metodologia d'aplicació del teorema de *Vaschy-Buckingham* per a les variables addicionals seleccionades. Així, a banda dels grups adimensionals obtinguts a l'apartat anterior, en l'estudi de la propagació d'un front de flames en presència de vent o pendent caldrà afegir els grups que s'obtinguin a partir de les noves variables seleccionades.

D'acord a les hipòtesis formulades a l'apartat 4.1.2, tant l'efecte del pendent com del vent en la propagació es tingueren en compte a partir dels canvis que provoquen en la configuració del front de flames i en les principals variables que descriuen la propagació. Per tant, les úniques variables addicionals que fou necessari considerar foren les fonamentals per a descriure els factors causants d'aquests dos tipus de propagació. Així, en el cas de la propagació pendent amunt (Figura 4.3 a) es considerà com a variable addicional el **pendent** de la superfície per on avança el foc (α), mentre que en el cas de la propagació d'un front de flames conduït pel vent (Figura 4.3 b) es va afegir a l'anàlisi la **velocitat del vent** (u_w).

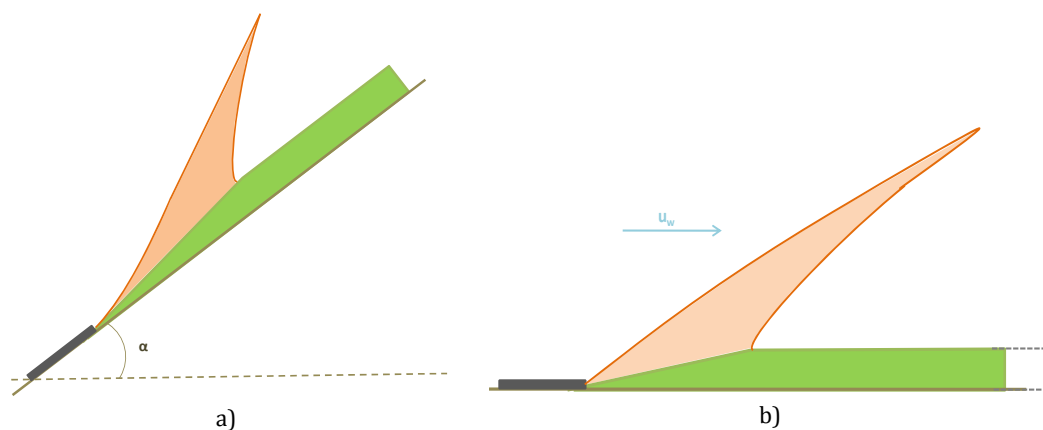


Figura 4.3 Esquema de les variables seleccionades addicionals seleccionades. a) Front de flames en presència de pendent. b) Front de flames en presència de vent.

La Taula 4.4 mostra les files addicionals de la matriu dimensional corresponents a les noves variables.

Taula 4.4 Matriu dimensional variables addicionals per a la propagació amb pendent o vent.

Variables	Unitats	Símbol	L	M	T	θ
Pendent llit	[°]	α	0	0	0	0
Velocitat del vent	[m·s ⁻¹]	u_w	1	0	-1	0

De la mateixa manera, la Taula 4.5 recull els nombres no dimensionals addicionals per a cada cas, on els subíndexs p i w signifiquen respectivament pendent i vent. Aquests nombres foren obtinguts considerant les mateixes variables fonamentals que en el problema de la propagació d'un front de flames bàsic.

Taula 4.5 Nombres no dimensionals addicionals per a la propagació amb pendent o vent.

Grups no dimensionals	Significat físic
$\pi_{33p} = \alpha$	Pendent de la superfície d'avanç del foc
$\pi_{33w} = \frac{u_w}{R}$	Factor de forma que relaciona la velocitat del vent amb la velocitat d'avanç del foc

4.4. Obtenció de les lleis d'escala

D'acord a les hipòtesis de l'apartat 4.1.1 les forces viscoses es consideraren negligibles, fet que és equivalent al que a la literatura es coneix com a escalatge de Froude o escalatge estàndard. Aquest tipus d'escalatge és propi dels estudis en què els experiments i el fenomen real tenen lloc en les mateixes condicions ambientals i gravitatòries. En aquest apartat es detalla el desenvolupament teòric, d'acord a aquesta tècnica d'escalatge parcial, per a obtenir les lleis d'escala per a un front de flames bàsic. Posteriorment s'especifiquen les lleis d'escala addicionals per als casos de propagació amb pendent o vent. Cal notar que per a determinar les lleis d'escala foren utilitzats els grups π d'acord a la formulació que apareix a la Taula 4.3.

4.4.1. Aplicació del principi de semblança. Longitud característica del sistema.

Tal i com s'ha explicat al capítol 1, el principi de semblança estableix que el valor dels grups π s'ha de mantenir constant al llarg de les diferents escales, de manera que imposant aquesta condició s'obtenen les lleis d'escala o instruccions necessàries per a plantejar programes experimentals. L'eq. [4.1] i l'eq. [4.2] mostren exemples detallats de l'aplicació d'aquest principi, concretament als grups $\pi_{1'}$ i π_{14} , on els subíndexs $s1$ i $s2$ fan referència als valors de les variables en dues escales distintes –l'escala 1 i l'escala 2. Aquestes expressions resulten lògicament en lleis d'escala típiques de l'escalatge de Froude en què les dimensions lineals del sistema escalen linealment amb la longitud característica del sistema, mentre que les velocitats ho fan amb l'arrel quadrada de la longitud característica.

$$\pi_{1's1} = \pi_{1's2} \Rightarrow \frac{W_{s1}}{(l_s)_{s1}} = \frac{W_{s2}}{(l_s)_{s2}} \Rightarrow \frac{(l_s)_{s1}}{(l_s)_{s2}} = \frac{W_{s1}}{W_{s2}} \Rightarrow l_s \sim W \quad [4.1]$$

$$\pi_{14s1} = \pi_{14s2} \Rightarrow \frac{R^2_{s1}}{W_{s1} \cdot g} = \frac{R^2_{s2}}{W_{s2} \cdot g} \Rightarrow \frac{R^2_{s1}}{R^2_{s2}} = \frac{W_{s1}}{W_{s2}} \Rightarrow R \sim W^{1/2} \quad [4.2]$$

Les lleis d'escala de les eq. [4.1] i l'eq. [4.2] han estat formulades en funció de la longitud del front de flames (W). Aquesta variable fou seleccionada com a longitud característica del sistema en aquest treball ja que és una de les variables més fàcilment controlables i modificables en l'experimentació en incendis forestals. Això és així perquè la longitud del front de flames coincideix inicialment amb la longitud de la línia d'ignició. A més, tal i com observaren Cheney i Gould (1995), a la bibliografia es poden trobar dades obtingudes tant a laboratori com a camp que suggereixen que la velocitat de propagació pot estar relacionada amb l'amplada del foc (vegeu capítol 3).

Al llarg d'aquest apartat es presentaran la resta de lleis d'escala derivades d'aquest estudi, sense fer més incís en la metodologia per a la seva obtenció, que ha quedat exemplificada en les expressions [4.1] i [4.2]. Únicament en aquells casos en què s'hagin realitzat hipòtesis addicionals s'explicaran de forma més detallada. Primerament però, es presenta l'estudi realitzat per a determinar els grups no dimensionals més significatius.

4.4.2. Determinació dels grups π principals. Hipòtesis.

L'anàlisi dels grups π obtinguts, juntament amb l'estudi realitzat sobre les diferents variables al capítol 3 permeteren menystenir certs grups atenent bé a la seva poca rellevància a l'hora de plantejar les lleis d'escala o a les hipòtesis pròpies de l'escalatge de Froude. Així, es va obtenir el conjunt principal de nombres no dimensionals que estigué format pels següents grups: $\pi_1, \pi_2', \pi_5, \pi_6, \pi_8', \pi_9', \pi_{11}', \pi_{12}', \pi_{13}', \pi_{14}, \pi_{15}', \pi_{16}', \pi_{17}, \pi_{18}, \pi_{19}, \pi_{24}, \pi_{25}, \pi_{30}, \pi_{33p}$ i π_{33w} . D'aquesta forma es va reduir el total de nombres no dimensionals fins a 18 en el cas de la propagació d'un front de flames bàsic, i fins a 19 en la resta de casos considerats (propagació pendent amunt o conduïda pel vent). A continuació s'especifica quins grups es varen ometre i per quin motiu, de manera que han estat agrupats en funció del seu significat.

Grups π relacionats amb el combustible i el comportament del foc

Dels diferents grups relacionats amb el combustible i el comportament del foc es menystingueren els grups π_3 i π_4 . En el primer cas es decidí menystenir aquest nombre (π_3) ja que si es considera negligible l'efecte de la viscositat, al aplicar el principi de semblança s'obtindria que la velocitat de propagació del foc és inversament proporcional a la càrrega de combustible (eq. [4.3]), expressió que no té consistència física.

$$\pi_3 = \frac{C \cdot R}{\mu_g} \quad \Rightarrow \quad R \sim \frac{1}{C} \quad [4.3]$$

Pel què fa al grup π_4 es decidí no considerar-lo com a part del conjunt principal perquè a banda de ser combinació lineal d'altres grups –a causa de la relació entre ρ_{ap} , h i C – es considerà que l'efecte de la densitat aparent del combustible (ρ_{ap}) en la propagació del foc quedava completament determinada pel grup π_{12} .

Grups π relacionats amb la reacció de combustió

Pel què fa a nombres relacionats amb la reacció de combustió es varen menystenir els grups π_{10} i π_{31}' . En el cas del grup π_{10} , aquest fou omès ja que el rang de variació del poder calorífic inferior (PCI) en els combustibles forestals utilitzats normalment en l'experimentació en incendis forestals és molt petit, de manera que l'aplicació del principi de semblança implicaria que la longitud del front de flames s'hauria de mantenir pràcticament constant al llarg de les diferents escales (eq. [4.4] on \mathbb{C} és una constant), deixant sense marge d'actuació a l'experimentador.

$$\pi_{10}' = \frac{PCI}{W \cdot g} \quad \Rightarrow \quad PCI \sim W \quad \Rightarrow \quad W \sim \mathbb{C} \quad [4.4]$$

Pel què fa al nombre π_{31}' , que relaciona l'energia dels gasos combustibles amb la calor alliberada en la reacció de combustió, es va menystenir per les poques possibilitats de variació que presenta, ja que

entre els seus termes conté la constant dels gasos, igual en totes les escales, i el poder calorífic inferior, que també es pot considerar pràcticament constant pels diferents combustibles forestals.

Grups π relacionats amb la transferència de calor

El grup π_7' , amb una formulació que recorda al nombre de Nu ja que relaciona la transferència de calor per convecció a la superfície del llit amb la conductivitat de l'aire, es va considerar negligible ja que s'assumí que predominava el terme convectiu enfront a la conducció.

En el cas del grup π_{28} , aquest fou menystingut perquè està relacionat amb la dissipació viscosa i d'acord a l'escalatge de Froude les forces viscoses es consideraren negligibles.

Un altre grup relacionat amb la transferència de calor que tampoc es va tenir en compte a l'hora de determinar les lleis d'escala fou el grup π_{32} , ja que al aplicar-li el principi de semblança s'obté una expressió equivalent a l'equació d'Stefan-Boltzmann (eq. [4.5]) que no aporta informació en relació amb l'escalatge.

$$E \sim \sigma \cdot (T_f - T_a)^4 \quad [4.5]$$

Grups π relacionats amb el plomall i l'ambient

El grup π_{20} fou omès perquè és equivalent al nombre de Re i d'acord a la hipòtesi bàsica de l'escalatge de Froude aquest nombre s'ha de menystenir per evitar obtenir lleis d'escala contradictòries.

Pel què fa als grups π_{21} , π_{22} , π_{23} , π_{27} i π_{29} , la majoria dels quals corresponen a factors de forma entre variables termodinàmiques del plomall i de l'ambient, es varen menystenir perquè el seu valor és difícil de canviar en gran mesura i per tant amb l'escalat no es podrien introduir grans variacions.

En darrer lloc el grup π_{26} , equivalent al nombre de Pr , es va ometre ja que les forces viscoses foren considerades negligibles i aquest nombre relaciona la difusió viscosa amb la difusió tèrmica. A més, el rang de variació del valor d'aquest nombre és molt petit ja en l'escalatge de Froude les condicions ambientals són les mateixes en les escales d'experimentació.

4.4.3. Lleis d'escala

Fronts de flames bàsics

A partir de l'aplicació del principi de semblança als grups π_1' , π_2' , π_9' , π_{11}' , π_{13}' , π_{15}' i π_{16}' s'obtingueren les lleis d'escala relatives a la semblança geomètrica que s'ha de mantenir entre el fenomen d'estudi i el model experimental (eq. [4.6] i [4.7]), on ℓ_i és equivalent a qualsevol de les variables lineals del sistema, és a dir, l_s, h, d_c, S_f, H i L_f .

$$\ell_i \sim W \quad [4.6]$$

$$\sigma_s \sim W^{-1} \quad [4.7]$$

A més, pel què respecta a les propietats del combustible, dels grups π_8 i π_5 en derivaren les lleis d'escala formulades a les eq. [4.8] i [4.9]. Aquestes lleis, que no depenen de la longitud característica del sistema, imposen d'una banda que la relació entre la densitat aparent del llit de combustible i la densitat de partícula s'ha de mantenir constant en les diferents escales. D'altra banda, imposen que la humitat del combustible ha de presentar el mateix valor en les diferents escales.

$$\rho_{ap} \sim \rho_m \quad [4.8]$$

$$H_s \sim C \quad [4.9]$$

A partir de π_6 i de π_{24} s'obtingueren respectivament les lleis formulades en les eq. [4.10] i [4.11], que relacionen les temperatures característiques del sistema linealment i també de forma independent de la longitud del front de flames.

$$(T_s - T_a) \sim (T_f - T_a) \quad [4.10]$$

$$(T_g - T_a) \sim (T_f - T_a) \quad [4.11]$$

De l'aplicació del principi de semblança al grup π_{14} s'obtingué l'expressió [4.2] tal i com s'ha detallat a l'apartat 4.4.1. A partir d'aquesta expressió i de les lleis derivades dels grups π_{25} i π_{30} es va determinar l'eq. [4.12] relacionada amb la semblança cinemàtica del sistema, on v_i és equivalent a qualsevol de les velocitats del sistema, és a dir, u_g , u_a i R .

$$v_i \sim W^{1/2} \quad [4.12]$$

De forma similar a partir de π_{19} s'obtingué que el temps de residència ha d'escalar linealment amb la velocitat de propagació. Tenint en compte que la velocitat de propagació ha d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames d'acord a l'eq. [4.12], en resulta que el temps de residència ha d'escalar també amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames, tal i com es detalla a l'eq. [4.13].

$$t_r \sim R \Rightarrow t_r \sim W^{1/2} \quad [4.13]$$

Pel què fa a la velocitat de combustió, a partir de π_{12}' i de l'eq. [4.12] s'obtingué que l'escalat d'aquesta variable no depèn únicament de la longitud del front de flames, sinó que és funció també de la densitat aparent del complex de combustible (eq. [4.14]).

$$V \sim \rho_{ap} \cdot R \Rightarrow V \sim \rho_{ap} \cdot W^{1/2} \quad [4.14]$$

En el cas de la intensitat del front de flames, a partir de l'aplicació del principi de semblança al grup $\pi_{17'}$ i emprant també l'eq. [4.6], s'obtingué que la intensitat lineal del front ha d'escalar linealment amb el producte de la viscositat de l'aire i la longitud del front de flames (eq. [4.15]). No obstant, s'assumí negligible la variació de la viscositat de l'aire entre les diferents escales, de manera que s'obtingué que la intensitat del foc ha d'escalar linealment amb la longitud del front de flames (eq. [4.16]).

$$I \sim \mu_a \cdot S_f \Rightarrow I \sim \mu_a \cdot W \quad [4.15]$$

$$I \sim W \quad [4.16]$$

Per últim, a partir del grup π_{18} i de les lleis expressades a les eq. [4.12] i l'eq. [4.16] s'obtingué la llei d'escala corresponent a la relació entre el poder emissiu del front de flames i la longitud del front de flames (eq. [4.17]).

$$E \sim I \cdot R \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I \sim W \\ R \sim W^{1/2} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad E \sim W^{3/2} \quad [4.17]$$

Fronts de flames conduïts pel vent o pel pendent

En el cas de propagació amb pendent o amb vent, a banda de les lleis d'escala anteriors, s'haurien de considerar respectivament les lleis formulades a les eq. [4.18] i [4.19] que deriven de l'aplicació del principi de semblança als grups π_{33p} i π_{33w} , on C representa una constant.

$$\alpha \sim C \quad [4.18]$$

$$u_w \sim W^{1/2} \quad [4.19]$$

La Taula 4.6 recull a tall de resum les lleis d'escala derivades d'aquesta anàlisi.

Taula 4.6 Lleis d'escala.

Lleis d'escala per a un front de flames bàsic	
$l_s \sim h \sim d_c \sim S_f \sim H \sim L_f \sim I \sim W$	[4.20]
$\sigma_s \sim W^{-1}$	[4.21]
$\rho_{ap} \sim \rho_m$	[4.22]
$H_s \sim \mathbb{C}$	[4.23]
$(T_s - T_a) \sim (T_f - T_a) \sim (T_g - T_a)$	[4.24]
$R \sim u_g \sim u_a \sim t_r \sim W^{1/2}$	[4.25]
$V \sim \rho_{ap} \cdot W^{1/2}$	[4.26]
$E \sim W^{3/2}$	[4.27]
Llei d'escala addicional per a fronts de flames propagant pendent amunt	
$\alpha \sim \mathbb{C}$	[4.28]
Llei d'escala addicional per a fronts de flames conduïts pel vent	
$u_w \sim W^{1/2}$	[4.29]

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Els incendis forestals. Conceptes generals	4
1.1.1. La combustió en els incendis forestals.....	4
1.1.2. La transferència de calor en els incendis forestals	8
1.1.3. Propietats del combustible	10
1.1.4. Contingut d'humitat dels combustibles	13
1.1.5. Inflamabilitat i combustibilitat dels combustibles forestals.....	16
1.1.6. Models de combustible.....	17
1.1.7. Característiques dels incendis forestals.....	19
1.1.8. Factors que influeixen en el comportament dels incendis forestals	23
1.2. Principis de l'anàlisi dimensional.....	28
1.2.1. Magnituds, unitats, dimensions i homogeneïtat dimensional.....	28
1.2.2. Mètodes d'aplicació de l'anàlisi dimensional	29
1.2.3. El teorema de Vaschy-Buckingham o teorema de π	30
1.2.4. Nombres no dimensionals freqüents.....	33
1.3. Anàlisi de semblança i escalatge	34
1.3.1. Criteris de semblança	35

1.3.2. Principi de semblança. Lleis d'escala.....	36
1.3.3. Semblança parcial, efectes d'escala i models distorsionats	37
2. ANTECEDENTS.....	39
2.1. L'anàlisi dimensional i de semblança en l'estudi dels incendis forestals	40
2.1.1. Treballs que utilitzen l'anàlisi dimensional en l'estudi dels incendis forestals.....	40
2.1.2. Treballs relacionats amb l'escalatge	48
2.2. L'experimentació en incendis forestals.....	59
2.2.1. L'experimentació a laboratori	59
2.2.2. L'experimentació a camp	62
2.3. Conclusions.....	66
2.4. Objectius de la tesi.....	66
3. ESTUDI DE VARIABLES.....	67
3.1. Escales, escenaris i models experimentals	68
3.2. Variables que descriuen el combustible	73
3.2.1. Variables que descriuen les partícules de combustible.....	74
3.2.2. Variables que descriuen el complex de combustible	79
3.3. Variables que descriuen l'entorn.....	83
3.4. Variables que descriuen el comportament del foc i la geometria de flama	85
3.4.1. Comportament del foc.....	85
3.4.2. Geometria del front de flames	93
3.5. Variables que descriuen el plomall.....	102
4. APLICACIÓ DE L'ANÀLISI DIMENSIONAL. OBTENCIÓ DE LES LLEIS D'ESCALA.....	105
4.1. Descripció del fenomen a estudiar	106
4.1.1. Propagació d'un front de flames bàsic	106
4.1.2. Estudi de la propagació d'un front en presència de pendent o vent	107
4.2. Aplicació del Teorema de <i>Vaschy-Buckingham</i> a la propagació d'un front de flames bàsic	108
4.2.1. Selecció de variables (Pas 1)	108
4.2.2. Obtenció dels grups no dimensionals (Pas 2 - Pas 6)	111

4.3. Aplicació del Teorema de <i>Vaschy-Buckingham</i> a la propagació d'un front de flames en presència de vent o pendent	115
4.4. Obtenció de les lleis d'escala.....	117
4.4.1. Aplicació del principi de semblança. Longitud característica del sistema.....	117
4.4.2. Determinació dels grups π principals. Hipòtesis.....	118
4.4.3. Lleis d'escala	119
5. DESCRIPCIÓ DE LES INSTAL·LACIONS I METODOLOGIES EXPERIMENTALS.....	123
5.1. Experimentació a la instal·lació del CERTEC	124
5.1.1. Descripció general de la instal·lació experimental.....	124
5.1.2. Equips de mesura.....	127
5.1.3. Sistema d'adquisició de dades	133
5.1.4. Disseny experimental.....	135
5.1.5. Metodologia experimental	139
5.2. Experimentació a les instal·lacions del LEIF.....	141
5.2.1. Descripció general de les instal·lacions.....	141
5.2.2. Equips de mesura i sistema d'adquisició de dades.....	144
5.2.3. Disseny experimental.....	147
5.2.4. Metodologia experimental de les proves a la taula de pendent.....	154
5.2.5. Metodologia experimental de les proves al túnel de combustió.....	158
5.2.6. Metodologia experimental de les proves a la taula DE4.....	159
6. METODOLOGIA D'OBTENCIÓ DE LES VARIABLES	161
6.1. Introducció.....	162
6.2. Variables de comportament del foc i geometria de flama.....	164
6.2.1. Velocitat de propagació	164
6.2.2. Longitud del front de flames	168
6.2.3. Altura i longitud de flama	170
6.2.4. Intensitat de l'incendi.....	172
6.2.5. Temps de residència i gruix del front de flames	173
6.2.6. Velocitat de combustió	174

6.2.7. Temperatura de la flama.....	174
6.2.8. Flux de calor – poder emissiu de les flames.....	177
6.3. Variables característiques del llit de combustible.....	178
6.3.1. Longitud de preescalfament del llit de combustible	179
6.3.2. Temperatura del llit del combustible	181
6.3.3. Coeficient de convecció a la superfície del llit.....	182
6.4. Variables característiques dels gasos o plomall.....	184
6.4.1. Temperatura dels gasos	184
6.4.2. Velocitat dels gasos	187
6.5. Variables característiques de l'entorn.....	189
6.5.1. Velocitat de l'aire induïda pel foc	189
6.5.2. Velocitat del vent.....	190
7. ANÀLISI DE RESULTATS.....	199
7.1. Descripció dels resultats de l'experimentació a la instal·lació del CERTEC	200
7.1.1. Estudi de la dispersió de les variables de disseny i condicions ambientals.....	200
7.1.2. Validació de la llei d'escala de la velocitat de propagació.....	202
7.1.3. Validació de la llei d'escala de la geometria de flama	203
7.1.4. Validació de les altres lleis d'escala.....	205
7.2. Descripció dels resultats de l'experimentació a les instal·lacions del LEIF	211
7.2.1. Resultats de les proves de control.....	211
7.2.2. Resultats de les proves amb pendent.....	233
7.2.3. Resultats de les proves amb vent.....	246
7.2.4. Anàlisi conjunt de les proves amb vent i pendent.....	252
7.3. Conclusions.....	255
8. CONCLUSIONS / CONCLUSIONS	259
NOMENCLATURA	265
BIBLIOGRAFIA	271
ANNEX I.....	289

ANNEX II.....	305
II.1. Preescalfament del combustible	306
II.2. Estudi de l'efecte de la humitat en la longitud de preescalfament	306

5. DESCRIPCIÓ DE LES INSTAL·LACIONS I METODOLOGIES EXPERIMENTALS

L'experimentació a laboratori permet controlar alguns dels factors que determinen el comportament d'un incendi forestal –vent, pendent i/o tipus de combustible– i caracteritzar fronts de flama que es propaguen en llits de combustible vegetal a partir de la mesura de variables com la velocitat de propagació, la velocitat de combustió, la temperatura i propietats geomètriques de la flama, entre d'altres.

Les lleis d'escala i les característiques de les instal·lacions determinaren en gran mesura el disseny experimental. Precisament per aquest motiu, es va programar realitzar l'experimentació de laboratori en instal·lacions de diferents característiques per tal d'estudiar la propagació d'un front de flames en diferents condicions:

- Propagació d'un front de flames bàsic (sense l'efecte del vent i/o pendent).
- Propagació d'un front de flames sota l'efecte del vent.
- Propagació d'un front de flames sota l'efecte del pendent.

Així, foren dissenyats tres blocs experimentals per a estudiar cadascun d'aquests casos en instal·lacions adequades. El primer bloc experimental es dugué a terme a la instal·lació del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC). El segon i tercer bloc experimental es realitzaren en col·laboració amb la Universitat de Coimbra, ja que disposa d'un laboratori, el *Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais* (LEIF), amb diverses instal·lacions que permeten realitzar assajos de laboratori sota l'efecte del vent –túnel de combustió– i del pendent –taula de pendent. També es va dur a terme un quart bloc

experimental, aprofitant la diversitat d'instal·lacions del LEIF, per tal de estudiar la propagació de front de flames bàsics, però ampliant les dimensions del model experimental.

En aquest capítol es descriuen per a cada bloc experimental les característiques de la instal·lació, el disseny experimental i les metodologies utilitzades en la realització dels experiments.

5.1. Experimentació a la instal·lació del CERTEC

Les proves que es dugueren a terme a la instal·lació del CERTEC tingueren com a objectiu l'estudi de la propagació de fronts de flama bàsics. En aquest apartat es detallen les principals característiques de la instal·lació experimental i dels equips de mesura emprats. A més, es descriuen també el disseny i la metodologia experimental.

5.1.1. Descripció general de la instal·lació experimental

La instal·lació experimental del CERTEC es troba ubicada a la planta pilot del Departament d'Enginyeria Química a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Aquesta instal·lació va ser construïda a l'any 2002 amb l'objectiu principal de realitzar estudis de laboratori sobre l'eficàcia dels productes retardants a llarg termini. Tot i això, el seu disseny és suficientment versàtil, de manera que permet realitzar estudis experimentals en altres temàtiques relacionades amb el comportament dels incendis forestals. A Pastor (2004) es descriuen en detall els criteris de disseny de la taula de combustió, i a Pérez (2003) les proves dutes a terme per a posar en marxa la instal·lació (Figura 5.1).

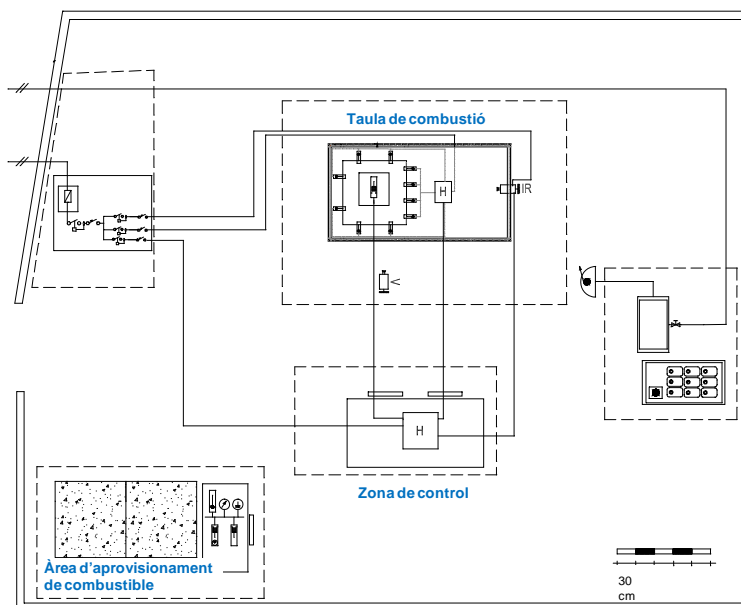


Figura 5.1 Esquema de la disposició en planta del sistema experimental.

La instal·lació experimental es divideix en diversos mòduls:

- Taula de combustió
Aquest mòdul està format per la taula d'assaigs, i pels diversos equips situats en aquest espai: una càmera termogràfica, dues càmeres de vídeo, un sistema de pesatge, un conjunt de termoparells i diversos sensors de flux de calor.
- Zona de control
El mòdul de control està situat just davant de la taula de combustió, i es compon bàsicament d'un ordinador portàtil connectat amb els equips detallats al punt anterior que així ho requereixen. A partir d'un programari específicament dissenyat per a aquesta aplicació, es controla i es grava l'evolució en temps real de les variables monitoritzades durant la realització de la prova.
- Àrea d'aprovisionament de combustible
Mòdul destinat a l'emmagatzematge del combustible forestal emprat en els experiments. Disposa de sensors d'humitat relativa i temperatura per determinar les condicions ambientals, així com d'un analitzador electrònic per mesurar la humitat del combustible i una balança electrònica de precisió. A més, compta també amb una estufa per a poder assecar el combustible.

Taula de combustió

La taula de combustió està constituïda per una superfície horitzontal d'acer, situada a 0,8 m d'altura respecte del terra, revestida amb rajoles refractàries (Figura 5.2). Les dimensions d'aquesta superfície són 3,0 m x 1,6 m (4,8 m² de superfície útil de crema), amb una obertura d'1,0 m x 1,0 m al centre d'una de les seves meitats. Està suportada per una estructura d'acer i recoberta per portes de xapa metàl·lica regulables en altura en tres dels seus costats. A l'altre costat disposa de vidres tèrmics corredissos per a permetre la visualització i filmació dels assaigs. A la part superior hi ha una campana de tiratge natural, independent de l'estructura de la taula, per a l'extracció dels fums resultants dels experiments.



Figura 5.2 Vista general de la taula de combustió.

L'obertura d'1,0 m² es cobreix amb una superfície –superfície de pesatge– que està suportada sobre una balança. Amb aquest sistema es pot mesurar la pèrdua de massa en la superfície de pesatge en funció del temps. Dues alces permeten moure amb facilitat i sostenir aquesta superfície per a què la balança no hagi de suportar-la permanentment.

Un altre component de disseny de què disposa la taula de combustió és un conjunt de perns distribuïts uniformement al llarg dels extrems laterals, amb una separació constant de 10 cm, i una altura de 7 cm. En campanyes experimentals anteriors, la col·locació de fils subjectats als perns, disposats paral·lelament a la línia d'ignició cobrint el llit de combustible permeté determinar la velocitat de propagació del front de flames, enregistrant l'instant de temps en què el front de flames trencava els fils al seu pas.

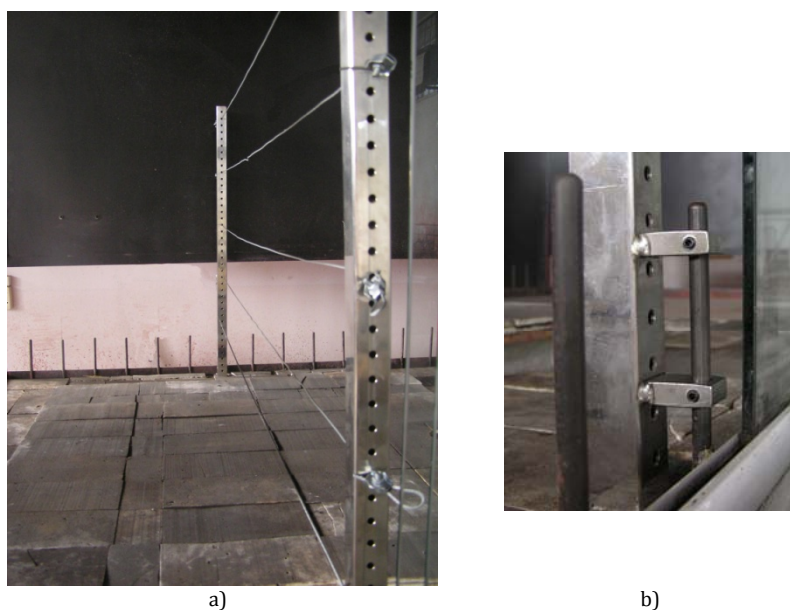
Per a l'experimentació d'aquesta tesi va ser necessari adaptar la instal·lació per a poder mesurar el major nombre possible de les variables que intervenen en l'anàlisi dimensional desenvolupat al capítol 4.

D'una banda fou necessari adaptar la superfície de pesatge per a poder mesurar el flux de calor que rep el llit de combustible a mesura que el front de flames avança. Per això, va ser necessari realitzar una obertura en aquesta superfície que permetés col·locar el sensor de flux de calor –sensor dual– així com incorporar un sistema de suport per a col·locar un conjunt de termoparells a diferents altures respecte de la superfície de la taula. A continuació es descriu aquest sistema més detalladament.

Estructura de suport dels termoparells

Per tal de poder mesurar la distribució vertical de temperatures en la flama es va dissenyar una estructura de suport per a col·locar diversos termoparells a diferents altures (Figura 5.3 a). Aquesta estructura té un disseny flexible, de manera que no és un element permanent de la taula de combustió, sinó que es pot canviar la seva posició o fer-ne ús únicament en el cas que sigui necessari.

L'estructura està formada per dues barres independents d'acer inoxidable i amb un perfil quadrat de 25 x 25 x 2 mm, perforades amb orificis de 5 mm de diàmetre cada 2 cm al llarg de tota la seva longitud (84 cm). Cadascuna de les barres té soldades dues platines en un dels extrems, que tenen un orifici de 10 mm de diàmetre. Mitjançant aquestes platines, les barres s'encaixen en els perns de la taula. A més, cargols Allen a banda i banda de cada platina permeten subjectar amb fermesa les barres als perns (Figura 5.3 b). Amb cable metàl·lic s'uneixen les dues barres, fent-lo passar pels orificis d'aquestes. Aquest cable serveix de guia i suport per a posicionar els termoparells. El nombre de cables i l'altura en què es col·loquen varia en funció de les mesures que es vulguin realitzar.



5.1.2. Equips de mesura

Els assajos realitzats en aquesta tesi han estat dissenyats d'acord amb l'anàlisi teòrica desenvolupada i per tant, amb l'objectiu de poder mesurar el major nombre de les variables que hi intervenen. Per a poder determinar aquestes variables es varen utilitzar diversos dispositius. A continuació es descriuen les principals característiques dels diferents equips de mesura emprats i l'aplicació que tingueren.

Sensors de flux de calor

Durant les proves realitzades a la instal·lació del CERTEC es varen utilitzar tres sensors de flux de calor del tipus termopiles *Schmidt-Boelter*. El principi de funcionament d'aquests sensors es basa en què el flux de calor en una làmina unidimensional, que separa una font freda i una font calenta, és proporcional a la diferència de temperatura entre aquestes. La diferència de temperatura es mesura mitjançant termoparells, de manera que aquesta diferència es tradueix en una diferència de voltatge. Els termoparells es poden connectar en sèrie per formar una termopila que amplifica la sortida d'una certa diferència de temperatura.

Els tres sensors són de la marca *Medtherm*, essent dos d'aquests transductors de flux de calor del model 64-2-16 i l'altre, un sensor dual del model 64-20T-20R(S). A la Taula 5.1 es presenten les principals característiques d'aquests sensors.

Taula 5.1 Característiques tècniques dels sensors de flux de calor.

	Transductor simple 64-2-16	Sensor dual 64-20T-20R(S)
Rang de mesura	0 – 23 kW/m ²	0 – 227 kW/m ²
Senyal de sortida	Lineal, de 0 a 12 mV al valor d'escala màxim	Lineal, de 0 a 15 mV al valor d'escala màxim
Temperatura màxima de treball	200°C en el cos del sensor	200°C en el cos del sensor
Repetibilitat	±0.5%	±0.5%
Absorbància del recobriment del sensor	0,94 nominal, de 0,3 a 15,0 µm	0,94 nominal, de 0,3 a 15,0 µm
Constants de temps típiques	Salt de 568 – 1136 kW·m ⁻² : 120 ms Salt de 23 – 341 kW·m ⁻² : 250 ms Salt de 2 – 11 kW·m ⁻² : 350 ms	Salt de 568 – 1136 kW·m ⁻² : 120 ms Salt de 23 – 341 kW·m ⁻² : 250 ms Salt de 2 – 11 kW·m ⁻² : 350 ms
Refrigeració	---	Mitjançant aigua
Radiòmetre	---	Finestra de safir Angle de visió de 180° Transmitància ~ 0,85 (per a una longitud d'ona de 0,2 a 4 µm i un gruix de 0,5 mm)

Els sensors de flux de calor 64-2-16 mesuren el flux de calor total, és a dir, la suma de la calor transferida per radiació i per convecció. Aquests sensors poden mesurar fluxos de fins a 23 kW/m². El sensor està recobert amb una pel·lícula negra d'alta absorbància.

En un dels transductors 64-2-16, se li va acoblar un limitador de visió, de la mateixa marca comercial i model VR-7C (Figura 5.4). Aquest element té la funció de disminuir l'angle de visió del sensor, en aquest cas fins a 7°, de tal manera que permet mesurar el poder emissiu d'un objecte. El limitador de visió està constituït per un cos cilíndric d'acer que conté diversos diafragmes en el seu interior.

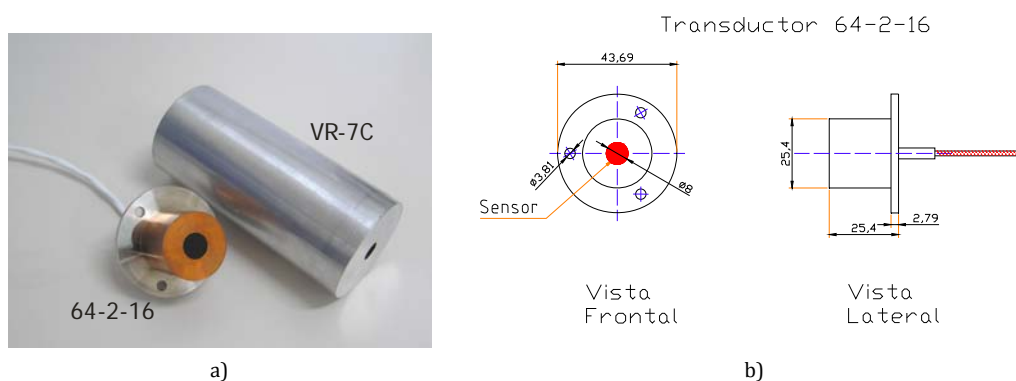


Figura 5.4 Sensor 64-2-16. a) Fotografia del sensor i del limitador de visió VR-7C. b) Esquema i dimensions.

El transductor 64-2-16 i el conjunt transductor i limitador de visió 64-2-16/VR-7C es van utilitzar per a mesurar el flux de calor emès pel front de flames i el poder emissiu del front respectivament. Ambdós sensors es van col·locar al final del llit de combustible, separats 25 cm d'aquest i a una altura igual a

l'altura del llit de combustible. Per ajustar l'altura, els sensors es col·loquen sobre una alça. A més, aquests sensors es van col·locar centrats respecte l'amplada del llit de combustible.

El sensor dual 64-20T-20R(S) està compost com el seu nom indica per dos sensors, un transductor de flux de calor que mesura la calor total i un radiòmetre que mesura la calor irradiada (Figura 5.5). Per a què el radiòmetre mesuri únicament la calor transferida per radiació està aïllat amb una finestra de safir, de manera que aquesta és transparent a la radiació infraroja però impedeix la transferència de calor per convecció.

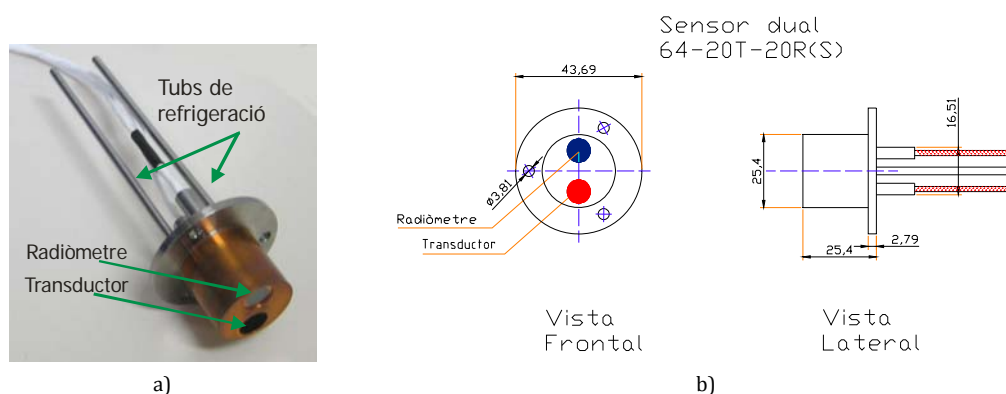


Figura 5.5 Sensor dual 64-20T-20R(S). a) Fotografia del sensor. b) Esquema amb les dimensions.

El sensor dual es va utilitzar per a mesurar el preescalfament del combustible, és a dir, el flux de calor rebut pel combustible situat per davant del front de flames. Per a poder col·locar aquest sensor va ser necessari perforar la superfície de pesatge, de manera que el sensor es pogués col·locar verticalment, quedant a la mateixa altura del llit de combustible. Es va utilitzar un peu de subjecció i unes pinces per a sostenir el sensor. Atès que durant les proves el front de flames sobrepassava aquest sensor, es va refrigerar mitjançant una conducció d'aigua per a mantenir la font freda del sensor a una temperatura suficientment baixa per a què no disminuís l'intercanvi de calor i per tant no es poguessin produir errors de mesura. Aquest sensor també es va col·locar centrat respecte l'amplada del llit de combustible.

Termoparells

Els termoparells emprats durant l'experimentació foren de tipus K (cromel i alumel) d'1 mm de diàmetre, i aïllats amb Inconel 600. Tots els termoparells es van connectar mitjançant cables de compensació al sistema d'adquisició de dades. En total foren col·locats sis termoparells suportats en l'estructura desenvolupada a tal efecte. L'estructura es va posicionar aproximadament centrada respecte a la longitud de la superfície de pesatge. En tots els casos els termoparells estigueren axialment centrats respecte el llit de combustible, però l'altura respecte de la superfície de pesatge a la que foren col·locats varià en funció de les especificacions de les proves.

Per a determinar el temps de residència, es col·locà un termoparell a l'altura del llit de combustible amb la punta del sensor endinsada aproximadament 1 cm en el llit. Per a mesurar la temperatura de flama es van utilitzar els cinc termoparells restants. Per a establir l'altura a la que es col·locarien aquests termoparells, es van tenir en compte dades de geometria de flama –altura i longitud– de programes experimentals desenvolupats anteriorment en la instal·lació del CERTEC en què s'utilitzà el mateix tipus de combustible (Pastor, 2004; Pérez, 2003). A l'apartat 5.1.4 s'especifica la posició en la que foren col·locats els termoparells en cada sèrie experimental.

Càmera termogràfica

La càmera termogràfica és un sistema integrat de mesura de temperatura i d'enregistrament d'imatges en temps real, basat en els principis de la termografia infraroja. D'aquesta manera, aquest equip proporciona seqüències d'imatges que representen en diferents colors o escala de grisos la distribució superficial de temperatures de l'objecte filmat.

La càmera termogràfica utilitzada ha estat l'*AGEMA Thermovision 570 versió Pro* de la casa comercial *FSI FLIR Systems*. Aquesta càmera opera en el rang de l'espectre de l'infraroig comprès entre 7,5 i 13 μm . Per formar la imatge la càmera utilitza un sistema FPA –*Focal Plane Array*– que es basa en una matriu bidimensional de sensors, de dimensions 320x240. Els sensors capten simultàniament el valor de tots els punts i proporcionen una imatge amb aquesta resolució. La freqüència d'enregistrament és de 5 imatges per segon. L'interval de temperatures que es poden mesurar amb la càmera està compres entre -20°C i 1500°C. El mode d'operació es divideix en tres rangs diferents: de -20°C a 120°C, de 80°C a 500°C i de 350°C a 1500°C. La Taula 5.2 presenta de forma resumida les principals característiques tècniques de l'equip.

Taula 5.2. Especificacions tècniques de la càmera termogràfica.

Càmera termogràfica Agema 570 Pro	
Tipus de detector	<i>Focal Plane Array</i> – FPA no refrigerat
Rang espectral	7,5 – 13 μm
Camp de visió (H x V)	24° x 18°
Precisió	$\pm 2\%$ del rang o $\pm 2^\circ\text{C}$
Sensitivitat tèrmica	< 0,15°C
Resolució espacial (IFOV)	1,3 mrad
Rangs de mesura	-20°C – 120°C 80°C – 500°C 350°C – 1500°C



La càmera IR es va col·locar en un trípode situat sobre una taula adjacent a la taula de combustió, de tal forma que s'obtingué una visió en perspectiva del llit de combustible (Figura 5.6). A partir del tractament digital de les imatges termogràfiques, mitjançant la implementació d'algoritmes de càlcul

amb el programari *Matlab*®, es determinaren diverses variables entre elles la velocitat de propagació (Pastor et al., 2006).

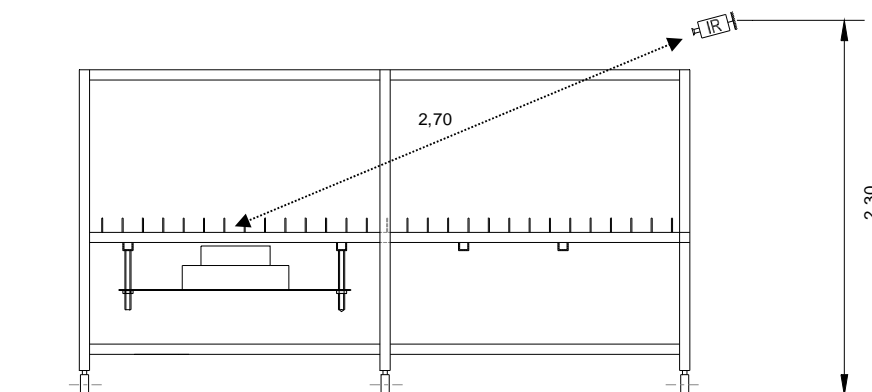


Figura 5.6 Esquema de la posició de la càmera termogràfica.

Càmeres de vídeo

Per a determinar les característiques geomètriques de la flama, totes les proves es varen filmar amb dues càmeres de vídeo (Figura 5.7). Per a filmar perpendicularment el front de flames es va utilitzar una càmera marca *Sony*, model *Handycam Vision CCD-TR840E*, basada en la tecnologia de gravació analògica Hi8. Per a filmar paral·lelament el front de flames es va col·locar una càmera també de la marca *Sony*, model *handycam DCR-HC42E*, supercompacta Mini DV.

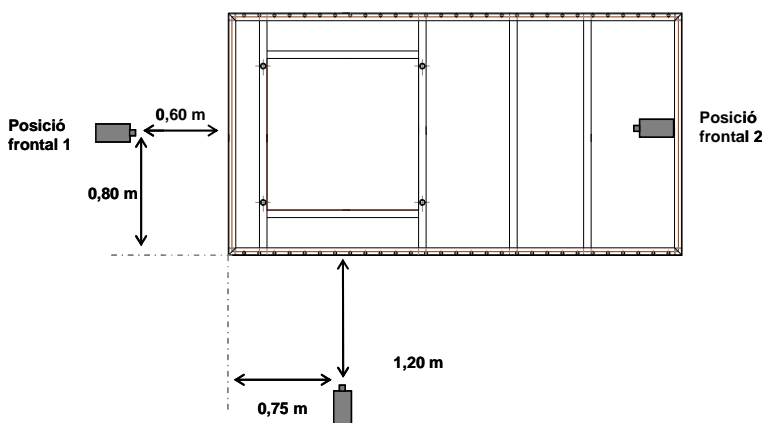


Figura 5.7 Esquema de la disposició en planta de les càmeres de vídeo.

En les proves desenvolupades en els llits de dimensions menors, és a dir, llits d'amplades de 25 cm i 50 cm, la càmera situada perpendicular al front de flames es col·locà en la posició frontal 1 segons la Figura 5.7. Per a les proves amb llits d'amplades de 100 cm aquesta càmera es col·locà en la posició

frontal 2 (Figura 5.7), per a poder filmar correctament les flames i que no quedessin retallades en la seqüència d'imatges per la presència de la comporta anterior de la taula.

Balança del sistema de pesatge

Per a determinar la pèrdua de massa es va utilitzar una balança *Sartorius* model *BL-12*. Aquesta balança ha de suportar el pes de la superfície de pesatge i de la càrrega de combustible, per tant ha de complir uns requisits mínims de capacitat. El model *BL-12* té una capacitat màxima de 12 kg i una precisió de 1 g. La superfície de pesatge que ha de suportar pesa aproximadament 8 kg i per tant la quantitat de combustible que s'hi pot dipositar és de fins a 4 kg/m².

Aquest model de balança pot disposar opcionalment d'una interfície de comunicacions del tipus RS-232 bidireccional, que permet la connexió directa a un ordinador. La configuració de la línia de comunicació es realitzà atenent els paràmetres subministrats pel fabricant, pel què fa a velocitat de transmissió, format de les dades i tipus de sincronització.

Analitzador d'humitat

L'analitzador d'humitat electrònic emprat per a determinar la humitat del combustible és de la marca *Sartorius*, model *MA-45*. La Taula 5.3 presenta les característiques tècniques d'aquest aparell.

Taula 5.3 Especificacions tècniques de l'analitzador d'humitat *Sartorius MA-45*.

Analitzador d'humitat <i>Sartorius MA-45</i>	
Element calefactor	Radiador ceràmic de superfície
Rang de temperatura	40°C - 230°C
Precisió	Ajustable a 1°C
Capacitat de mesura	45 g
Llegibilitat de l'aparell	1 mg, 0,01% humitat
Repetibilitat	A partir d'1 g de mostra: 0,2% A partir de 5 g de mostra: 0,05%
Pes inicial mínim de la mostra	0,1 g
Indicació del resultat	Humitat base seca Humitat base humida Residu (g o g/kg)



El principi de funcionament d'aquest analitzador es basa en la termogravimetria infraroja. L'aparell consta d'una unitat calefactorsa, formada per un element ceràmic que emet radiació infraroja amb longituds d'ona entre 2,8 µm i 5 µm, i que escalfa la mostra d'anàlisi. D'aquesta manera, la mostra desprèn la humitat i l'analitzador enregistra la pèrdua de pes de la mostra.

Aquest tipus d'analitzadors han de ser calibrats d'acord a les característiques de la mostra que es vulgui analitzar. A Pérez (2003) es descriu en detall el procés de calibratge dut a terme i que determina les condicions d'operació seguides per a mesurar la humitat del combustible en les proves realitzades a la instal·lació del CERTEC.

Altres equips de mesura

A banda dels equips anteriorment descrits, al mòdul d'aprovisionament de combustible hi havia també una estufa de laboratori per a assecar el combustible necessari per a cada prova i una balança per a pesar la quantitat de combustible a col·locar a la taula de combustió. A més, també hi havia un termohigròmetre digital per a determinar les condicions ambientals –temperatura i humitat relativa– just abans de l'inici de cada prova.

5.1.3. Sistema d'adquisició de dades

El sistema d'adquisició de dades utilitzat per a la gestió de l'adquisició simultània de dades de la càmera termogràfica, de la balança, dels termoparells i dels sensors de flux de calor es basà en el programari *FireALL Forest*, els mòduls d'entrada/sortida del *FieldPoint* i les connexions dels equips i/o *FieldPoint* a un ordinador portàtil.

Mòduls del FieldPoint

El *FieldPoint* és un sistema modular de distribució d'entrades/sortides que es pot connectar a un ordinador mitjançant un port RS-485. Aquest es compon d'un mòdul de comunicacions, mòduls d'entrada/sortida i terminals de connexió:

- **Mòdul de comunicacions FP-1001**
El mòdul de comunicacions connecta els mòduls d'entrada/sortida amb el port de comunicacions RS-485, a través d'un bus local d'alta velocitat integrat en els terminals de connexió. La velocitat de transmissió del senyal d'informació codificada a la que pot treballar aquest mòdul està compresa entre 300 bps i 115,2 kbps.
- **Mòduls d'entrada/sortida FP-TC-120**
Aquest mòdul presenta 8 canals d'entrada. Té incorporat un filtre que permet eliminar el soroll dels senyals d'entrada de freqüència 50 / 60 Hz, proporcionant així mesures dels senyals amb gran exactitud i precisió. Per a la realització d'aquest estudi únicament foren necessaris dos mòduls FP-TC-120, ja que cada unitat disposa de 8 canals i únicament es va disposar de 6 termoparells i 3 sensors de flux de calor.

- Terminals de connexió FP-TB-1

El mòdul FP-TB-1 és un terminal universal de connexió amb 36 terminals. Un cop instal·lat conforma un bus local d'alta velocitat que permet la comunicació amb els restants mòduls i proporciona l'energia necessària per al seu funcionament.

El *FieldPoint* es va utilitzar per a l'adquisició dels senyals que proporcionen els termoparells i els sensors de flux de calor.

Programari

El programari *FireAll Forest* fou especialment dissenyat per al treball en la instal·lació experimental del CERTEC. Aquest programa permet gestionar i enregistrar de forma sincronitzada les dades provinents dels termoparells, dels sensors de flux de calor, de la balança i de la càmera termogràfica en una interfície comuna. A més, presenta una interfície gràfica senzilla i pràctica per a l'usuari (Figura 5.8).

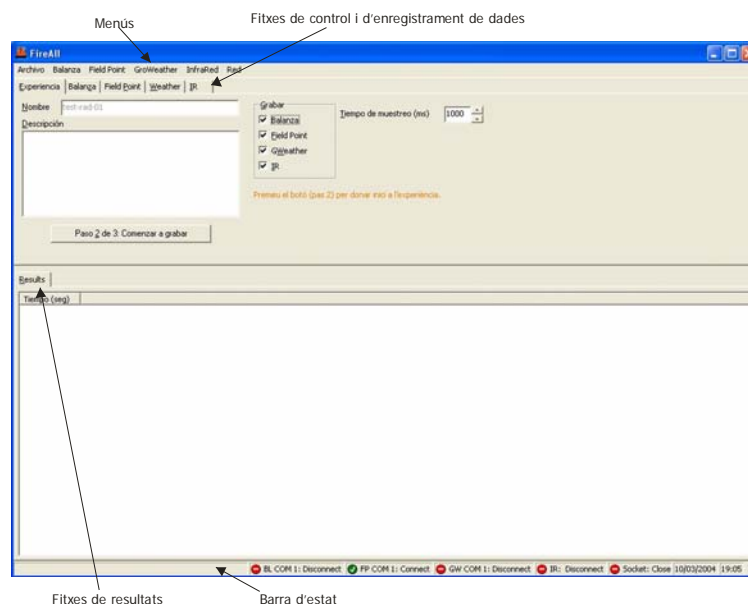


Figura 5.8 Finestra principal del programari *FireAll Forest*.

El sector superior està destinat a la configuració, gestió de l'experiment i control dels equips per mitjà de fitxers o separadors. El sector inferior de la finestra principal permet visualitzar en temps real la progressió de la prova i de les dades enregistrades tant en format text com mitjançant gràfics.

Tots els detalls referents al desenvolupament, funcionament i configuració d'aquest programari es poden trobar a Muñoz (2005).

5.1.4. Disseny experimental

L'objectiu del bloc experimental desenvolupat a la instal·lació del CERTEC fou estudiar la propagació de fronts de flama bàsics –sense vent ni pendent– al laboratori, mitjançant les lleis d'escala derivades de l'aplicació de l'anàlisi dimensional.

Al capítol 4 han estat desenvolupades les lleis d'escala generals. Per tal de simplificar el nombre de lleis a complir en l'experimentació de laboratori es decidí utilitzar un únic combustible, de manera que totes les variables relacionades amb les partícules de combustible que configuren el llit es mantinguessin constants.

Tot seguit es presenten les lleis d'escala aplicables a aquest bloc experimental on els subíndexs $s1$ i $s2$ signifiquen respectivament escala 1 i escala 2. Cal notar que es considerarà com a longitud característica del sistema per a determinar les lleis d'escala la longitud del front de flames, que inicialment coincideix amb l'amplada del llit de combustible:

$$\frac{L_{f_{s1}}}{L_{f_{s2}}} = \frac{S_{f_{s1}}}{S_{f_{s2}}} = \frac{H_{s1}}{H_{s2}} = \frac{l_{s_{s1}}}{l_{s_{s2}}} = \frac{h_{s1}}{h_{s2}} = \frac{W_{s1}}{W_{s2}} \quad [5.1]$$

$$\frac{R_{s1}}{R_{s2}} = \frac{u_{a_{s1}}}{u_{a_{s2}}} = \frac{t_{r_{s1}}}{t_{r_{s2}}} = \left(\frac{W_{s1}}{W_{s2}}\right)^{1/2} \quad [5.2]$$

$$H_{s_{s1}} = H_{s_{s2}} \quad [5.3]$$

$$\rho_{ap_{s1}} = \rho_{ap_{s2}} \quad [5.4]$$

$$\frac{(T_s - T_a)_{s1}}{(T_s - T_a)_{s2}} = \frac{(T_g - T_a)_{s1}}{(T_g - T_a)_{s2}} = \frac{(T_f - T_a)_{s1}}{(T_f - T_a)_{s2}} \quad [5.5]$$

$$\frac{V_{s1}}{V_{s2}} = \left(\frac{W_{s1}}{W_{s2}}\right)^{1/2} \quad [5.6]$$

$$\frac{E_{s1}}{E_{s2}} = \left(\frac{W_{s1}}{W_{s2}}\right)^{3/2} \quad [5.7]$$

Les lleis d'escala formulades a les equacions [5.1], [5.3] i [5.4] determinen el disseny experimental. La primera equació és relativa a la semblança geomètrica entre les diferents variables lineals del sistema, tant referents a les dimensions característiques del llit de combustible com del front de flames. Les altres dues equacions imposen que la humitat del combustible ha de mantenir-se constant, així com també la densitat aparent del llit. La resta de lleis d'escala (eq. [5.2], [5.5], [5.6] i [5.7]) expressen les relacions que s'haurien de verificar entre les variables que caracteritzen la geometria i la propagació

del front de flames, i que per tant, únicament després de dur a terme l'experimentació es podran validar.

D'acord a les equacions [5.1] i [5.4] la relació entre les altures del llit de combustible ha de mantenir-se constant, alhora que també la densitat aparent d'aquest. Això es tradueix en què la relació entre les altures del llit de combustible i la relació entre les càrregues de combustible ha de ser la mateixa. Per tant, els diferents llits han d'augmentar en altura i quantitat de combustible en la mateixa proporció. Tanmateix, els llits de combustible vegetal tendeixen a compactar-se de manera natural a mesura que augmenta la càrrega de combustible.

Així, fou necessari buscar un tipus de combustible que per les seves característiques permetés elaborar llits que acomplissin amb aquests requisits com a mínim en un rang determinat de valors de càrrega i altura. Pastor (2004) va caracteritzar diversos tipus de combustibles, així com els llits formats per aquests. Els combustibles que utilitzà foren agulles de pi i diverses espècies de gramínies. Aquests combustibles són els més utilitzats en experimentació a laboratori en incendis forestals tant per les seves característiques, com per la seva disponibilitat i per la reproductibilitat del llits que configuren. Pastor (2004) va concloure que els llits d'agulles de pi es compacten més ràpidament que els de gramínies, i entre aquests últims l'ordi és l'espècie que menys es compacta.

Per tant, per a dur a terme aquest bloc experimental es va utilitzar palla d'ordi (*Hordeum vulgare*). A la Taula 5.4 es poden trobar les propietats d'aquesta espècie, extretes de Pastor (2004).

Taula 5.4 Propietats del combustible utilitzat en l'experimentació (Pastor, 2004).

Propietats intrínseques de la palla d'ordi - <i>Hordeum vulgare</i>	
Poder calorífic inferior, PCI [kJ/kg]	16148
Relació superfície - volum, σ_s [m ² /m ³]	16339
Densitat del combustible, ρ_m [kg/m ³]	595
Diàmetre de partícula, d_c [mm]	2,15

D'altra banda, d'acord amb l'equació [5.3], la humitat del combustible ha de mantenir un valor constant en totes les proves. No obstant, la humitat del combustible depèn de les condicions ambientals, de manera que canvia amb la variació de la temperatura i humitat relativa de l'aire per tal d'assolir un estat d'equilibri amb aquest.

Per tal de complir amb aquesta llei, es decidí assecar el combustible en una estufa, prèviament a la realització de la prova per intentar aconseguir valors d'humitat del combustible aproximadament constants. Tot i això, es comprovà que la velocitat de recuperació d'humitat del combustible permetria preparar els llits de combustible i iniciar l'execució de la prova abans de que el combustible hagués recuperat completament la humitat. Així, es realitzà un petit estudi, de manera que es mesurà la

humitat al llarg del temps, mitjançant l'analitzador d'humitat, de diverses mostres de combustible que havien estat assecades a l'estufa durant 24 hores a una temperatura de 65°C.

La Figura 5.9 mostra un exemple dels resultats obtinguts. En aquest gràfic es pot observar com en els primers minuts posteriors a l'extracció de les mostres de l'estufa, la recuperació d'humitat és molt ràpida. Amb tot, després dels primers 10 minuts aquesta recuperació és molt més lenta, de manera que pràcticament una hora després d'aquest primer estadi, les mostres recuperen únicament 2 punts d'humitat. Cal notar que per a fer el gràfic s'ha considerat que just abans d'extreure la mostra de l'estufa aquesta estava completament seca, és a dir, amb un contingut d'humitat igual a zero. A més, és important destacar que aquests resultats són vàlids per a les condicions ambientals de temperatura i humitat relativa en què tingué lloc la prova -296 K, 50 %. Per a condicions ambientals diferents, s'observà el mateix patró de comportament pel que fa a la recuperació d'humitat, és a dir, una primera fase de ràpida recuperació i una segona més lenta, però per al mateix interval de temps els valors d'humitat assolits variaren.

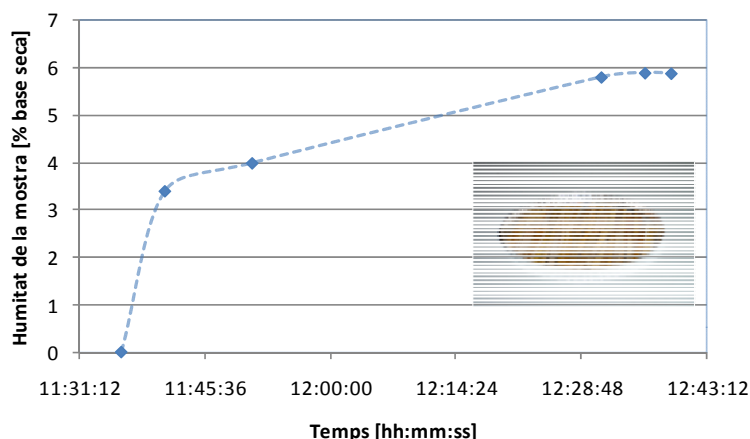


Figura 5.9 Corba de recuperació d'humitat.

El bloc experimental del CERTEC consta d'una única sèrie experimental anomenada C0. Aquesta sèrie compregué proves realitzades en tres models experimentals diferents, o el que és el mateix, en llits amb tres configuracions geomètriques diferents, caracteritzats per la seva amplada, ja que aquesta coincideix inicialment amb la longitud del front de flames, que és la longitud característica del sistema.

Així, es fixaren tres valors d'amplada del llit de combustible -0,25 m, 0,50 m i 1,00 m. Posteriorment, es prepararen diversos llits per a establir la càrrega mínima que permetia formar un llit uniforme, amb una distribució continua de combustible, alhora que assegurava la seva fàcil reproductibilitat (Pérez, 2003). D'aquesta manera es determinà la càrrega de combustible per als assaigs de menor dimensió (0,15 kg/m²) i es mesurà l'altura del llit de combustible. A partir d'aquestes dades, es calculà la densitat aparent teòrica del llit. Seguint les lleis d'escala es pogueren determinar les càrregues de combustible

per als assaigs de la resta d'escapes de treball. La Taula 5.5 resumeix les principals especificacions de les proves.

Taula 5.5. Especificacions de les proves realitzades a la taula de combustió.

Designació escala	Amplada llit combustible [m]	Càrrega de combustible [kg/m ²]	Altura teòrica llit combustible [m]	Densitat aparent teòrica del llit [kg/m ³]
W25	0,25	0,15	0,02	7,5
W50	0,50	0,30	0,04	7,5
W100	1,00	0,60	0,08	7,5

Per a cada escala es realitzaren un mínim de 4 proves, tot i que en alguns casos es dugueren a terme més rèpliques, de manera que en total el bloc experimental desenvolupat a la instal·lació del CERTEC constà de 17 proves.

Cal advertir que la longitud del llit de combustible es mantingué constant a 1,5 m per a totes les proves, ja que resultats de programes experimentals anteriors demostraren que aquest valor era suficient per a assolir un règim estacionari de propagació en proves similars a les descrites a la Taula 5.5.

Un cop definides les especificacions de les proves per a cada escala experimental, es varen fixar les posicions dels termoparells. A la Taula 5.6 es resumeix la posició en la que foren col·locats els termoparells. Com es pot observar en la taula anterior, en les proves en què l'amplada del llit fou de 25 cm o 50 cm es mantingué la mateixa posició dels termoparells utilitzats en la mesura de la temperatura de la flama (TP2 - TP6) per a facilitar l'execució dels assaigs. Per a determinar l'altura en la que es col·locarien els termoparells es tingueren en compte l'altura de les flames que s'obtidrien per tal de poder monitoritzar la temperatura al llarg de l'extensió vertical de la flama.

Taula 5.6 Altura a la que es van posicionar els termoparells segons l'escala experimental.

	Altura dels termoparells respecte de la superfície de pesatge [cm]		
	Escala W25	Escala W50	Escala W100
TP1	1	3	7
TP2	8	8	16
TP3	10	10	32
TP4	12	12	48
TP5	14	14	64
TP6	16	16	80

5.1.5. Metodologia experimental

Atesa l'experiència ja adquirida en programes experimentals anteriors desenvolupats en la instal·lació del CERTEC en els que es va participar activament (Pérez, 2003; Pastor, 2004), es va adaptar la metodologia experimental posada en pràctica en aquests programes als requisits de les proves dissenyades en aquesta tesi i també al fet que una única persona hauria de realitzar els assaigs. Tot seguit es descriuen per ordre cronològic les set tasques que compregué la metodologia experimental.

Tasca 1. Preparació del combustible

Abans de l'inici d'una sessió experimental calia assecat a l'estufa la quantitat de combustible requerida per a les proves. D'acord al procediment habitual per a assecat el combustible, era necessari fer aquesta operació com a mínim 24 hores abans de l'execució dels assaigs.

Tasca 2. Posicionament i connexió dels equips

Aquesta tasca comprenia la col·locació de les dues càmeres de vídeo, la càmera termogràfica, el transductor 64-2-16, el conjunt transductor – limitador de visió 64-2-16/VR-7C, i l'ordinador portàtil a les posicions establertes per a cada equip. Posteriorment, la posada en funcionament i la connexió d'aquests equips, així com dels equips permanentment situats a la instal·lació experimental –balança, sensor dual, termoparells i mòduls *FieldPoint*. Tot seguit, la inicialització del programari d'adquisició de dades i la comprovació del bon estat dels sensors. I per últim, l'enregistrament amb la càmera termogràfica d'un parell d'imatges de referència. Per a la filmació d'aquestes imatges es col·locaven espelmes als 4 extrems de la superfície de pesatge, de manera que fossin visibles en l'espectre infraroig.

Tasca 3. Disposició del combustible

El combustible es distribuïa de manera uniforme per a conformar un llit de combustible homogeni (Figura 5.10 a). Aquesta operació és molt important per tal d'assegurar la reproductibilitat dels resultats. Atès que el combustible era assecat prèviament, aquesta operació calia realitzar-la el més ràpidament possible per evitar que el combustible recuperés humitat. Per tant, per facilitar la preparació dels llits de menor dimensió es varen fer uns motlles de cartró amb les dimensions del llit que facilitaren la tasca de distribució del combustible. En el cas dels llits de major amplada, no fou necessari, ja que la seva preparació era més senzilla, tant perquè s'utilitzava més combustible com perquè l'amplada del llit coincidia amb les dimensions de la superfície de pesatge. Després de muntar el llit de combustible, es verificava que la lectura de la balança coincidís amb el valor calculat per a l'àrea de llit present sobre aquesta. Per últim, es mesurava l'altura del llit de combustible (Figura 5.10 b). Per a determinar l'altura del llit es realitzaven de 5 a 10 mesures, en funció de les dimensions del llit, i es calculava la mitjana aritmètica.



a)



b)

Figura 5.10 Tasca 3. Disposició del combustible. a) Llit de combustible preparat. b) Mesura de l'altura del llit.

Tasca 4. Ajust de la taula de combustió

Després de preparar el llit de combustible es verificava que l'altura de les comportes anterior i posterior –20 i 15 cm respectivament– fos la correcta per a permetre l'avanç estable del front de flames. Aquests valors es van extreure de l'estudi desenvolupat a Pérez (2003). A més, es verificava també que la resta de tancaments laterals, tant comportes com vidres, estiguessin tancats.

Tasca 5. Determinació de la humitat del combustible i de les condicions ambientals

Tot i que el combustible s'assecava prèviament a la prova, recuperava part de la humitat perduda durant el temps transcorregut entre la preparació del llit i la ignició. Atès que la humitat del combustible és una variable amb un efecte significatiu en la propagació del front de flames, es mesurava el seu valor abans de l'execució de la prova. El seu valor es determinà com la mitjana de les mesures en tres mostres mitjançant l'analitzador d'humitat. A banda, es registraven també la temperatura i humitat relativa de l'aire.

Tasca 6. Execució de la prova

Amb tota la instal·lació a punt, es posava en marxa la refrigeració del sensor dual i s'iniciava l'enregistrament de dades just instants abans de la ignició. Per realitzar la ignició s'utilitzava un fil de llana xopat amb gasolina, col·locat al llarg de tota l'amplada del llit de combustible, en un dels seus extrems. Amb aquest tipus de metxa s'aconseguia la formació d'un front rectilini, ja des dels primers segons de la prova. Durant el decurs de la prova es tenia cura que tots els equips funcionessin correctament. La Figura 5.11 mostra una imatge de l'execució d'una prova.



Figura 5.11 Fotografia d'una de les proves durant la seva execució.

Tasca 7. Desmuntatge dels equips i neteja de la instal·lació

Un cop finalitzada la prova es recullen les cendres per al seu pesatge. Seguidament, o bé es procedia a l'inici d'una nova prova o bé es desmuntaven els equips i es duïen a terme les tasques de neteja i condicionament oportunes per a deixar la instal·lació a punt per a la propera sessió experimental.

5.2. Experimentació a les instal·lacions del LEIF

Les proves que es dugueren a terme al LEIF tingueren com a objectiu estudiar l'efecte del vent o del pendent en la propagació d'un front de flames des de dues perspectives diferents, associades a l'estudi del canvi d'escala i a l'estudi de l'efecte dels productes retardants a llarg termini. D'aquesta manera, tant el disseny com la metodologia d'experimentació es van dur a terme per a poder assolir els objectius d'ambdós estudis. Tanmateix, en aquest apartat es farà referència essencialment a l'estudi del canvi d'escala, objecte d'aquesta tesi. A Àgueda *et al.* (2009) es poden trobar més detalls de l'estudi de retardants. A banda d'aquestes proves, en última instància es va realitzar també un altre bloc experimental, que inicialment no estava previst, amb l'objectiu d'estudiar la validesa de les lleis d'escala per a fronts de flames bàsics, en ampliar l'escala experimental.

A continuació es descriuen les instal·lacions experimentals i els equips de mesura utilitzats per a la monitorització de les proves realitzades al LEIF. Es descriuen també el disseny i la metodologia experimental.

5.2.1. Descripció general de les instal·lacions

El LEIF, que forma part de l'*Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial* (ADAI) de la Universitat de Coimbra es troba situat al terme municipal de Lousã, en el recinte del *Centro de Operações e Técnicas Florestais* (Figura 5.12). Aquest laboratori compta amb diverses instal·lacions per

a dur a terme assaigs per a l'estudi del comportament del foc i per a la caracterització dels combustibles forestals.



Figura 5.12 *Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF).*

Per tal d'assolir els objectius proposats es varen realitzar proves principalment a dues de les instal·lacions del LEIF, la taula de pendent i el túnel de combustió (Viegas et al., 1998). A més, també es van realitzar un parell de proves a la taula d'assaigs en congostos – DE4.

Taula de pendent

La taula de pendent està composta per una superfície plana de planxa d'acer amb una àrea útil de crema de 3,0 m x 3,0 m (Figura 5.13 b). La superfície de la taula es troba situada a 1,3 m d'altura respecte del terra i està suportada per una estructura amb rodes. Dos motors elèctrics permeten controlar els angles de rotació i d'inclinació d'aquesta superfície (Figura 5.13 a). La inclinació de la taula pot variar des de 0° fins a 40° en increments de 10°, podent simular així terrenys amb diferents pendents.

A més, aquesta taula disposa de perns de 10,5 cm d'altura situats a banda i banda de l'àrea útil de crema, uniformement distribuïts cada 20 cm. La col·locació de fils paral·lelament a la línia d'ignició, subjectats als perns, permet determinar la velocitat de propagació del front de flames.



Figura 5.13 Taula de pendent. a) Imatge frontal. b) Vista general.

Túnel de combustió

El túnel de combustió està format per una plataforma plana de 24 m², essent la seva superfície útil de crema de 2,6 m d'ample per 8,0 m de llarg. Aquesta plataforma té en un dels seus extrems dos ventiladors axials i un sistema de pantalles i ruscs per a crear un flux uniforme al llarg de la secció del túnel. Lateralment, la plataforma està delimitada en un costat per vidres tèrmics que permeten la visualització i filmació dels assaigs, i a l'altre costat per planxes d'acer (Figura 5.14). Aquestes planxes presenten en la seva cara interior, diverses marques per a facilitar l'estimació visual dels paràmetres descriptors de la geometria de la flama.



Figura 5.14 Vista general del túnel de combustió.

La part superior del túnel i l'extrem oposat als ventiladors no tenen cap tipus de tancament, quedant oberts per a facilitar respectivament el desenvolupament vertical de les flames i l'escolament de l'aire. Sobre els ventiladors hi ha una estructura en forma de pont dotada d'un sistema de subjecció per a emplaçar dispositius de filmació.

La secció útil del túnel disposa també de perns, que en aquest cas es troben separats 25 cm en els primers 2 m de la secció transversal, i a partir d'aquí 50 cm. Aquests elements estructurals facilitaren la col·locació de fils paral·lels a línia d'ignició per a mesurar la velocitat de propagació.

La velocitat del flux d'aire es pot regular amb precisió mitjançant un convertidor de freqüència que controla la velocitat de rotació dels ventiladors. Per a establir la correspondència de valors entre la freqüència de rotació dels ventiladors i la velocitat del flux al centre de la secció del túnel va ser necessari calibrar el sistema, per a obtenir la corba de calibratge del túnel. El rang de velocitats del flux d'aire en el què pot treballar el túnel és de 0,5 a 5 m/s.

Taula d'assaigs en congostos - DE4

La taula d'assaigs en congostos permet realitzar proves replicant orografies del terreny complexes. Per a això compta amb una superfície d'acer de 48 m², dividida en dues parts iguals (4,0 m x 6,0 m), que mitjançant un sistema hidràulic poden inclinar-se respecte de l'eix que uneix ambdues parts i també respecte un eix perpendicular a aquest (Figura 5.15). Tanmateix, cal notar que per a les proves dutes a terme en aquesta es va utilitzar la instal·lació sense modificar-ne la seva configuració bàsica de manera que es poguessin realitzar proves de control.



Figura 5.15 Vista general de la taula d'assaigs en congostos - DE4 en diferents configuracions.

5.2.2. Equips de mesura i sistema d'adquisició de dades

Els equips que es van emprar en l'experimentació al LEIF foren majoritàriament els descrits a l'apartat 5.1.2, excepte pel què fa als instruments de laboratori com l'analitzador d'humitat, balances i sensors

d'humitat relativa i temperatura. Tanmateix, no es varen poder utilitzar ni els termoparells, ni el conjunt transductor – limitador de visió 64-2-16/VR-7C, ni el sistema de pesatge degut a les característiques pròpies de les instal·lacions experimentals del LEIF. A més, en les proves realitzades a la taula d'assaigs en congostos tampoc es varen utilitzar ni el transductor de flux de calor 64-2-16 ni el sensor dual 64-20T-20R(S). Pel què fa al sistema d'adquisició de dades, en tots els casos es va fer servir el mateix que en les proves realitzades a la instal·lació del CERTEC i descrit a l'apartat 5.1.3.

Atès que pràcticament tots els dispositius de mesura ja han estat descrits prèviament només s'especificaran aquí les principals característiques de l'analitzador d'humitat emprat en aquests blocs experimentals (Taula 5.7). Aquest equip es va utilitzar segons el protocol desenvolupat per l'equip de recerca d'ADAI, consistent en un programa d'assecatge de la mostra a 105°C durant 15 minuts.

Taula 5.7 Especificacions tècniques de l'analitzador d'humitat *AND-MX-50*.

Analitzador d'humitat <i>AND-MX-50</i>	
Element calefactor	Làmpada halògena
Rang de temperatura	50°C – 200°C
Precisió	0,01 % - 0,1 %
Capacitat de mesura	51 g
Llegibilitat de l'aparell	1 mg, 0,01% humitat
Pes inicial mínim de la mostra	2 g per a valors d'humitat de l'ordre de l'1 %



Tot seguit es descriuen per a cada instal·lació la disposició dels equips de mesura així com la seva aplicació.

Taula de pendent

Per a cada prova es varen enregistrar imatges frontals de l'avanç del front de flames mitjançant una càmera termogràfica i una càmera de vídeo. Amb aquestes imatges es determinaren entre d'altres la longitud del front de flames i la velocitat de propagació. A més, es van filmar imatges laterals del front de flames per a caracteritzar-ne la seva geometria (Figura 5.16). Tot i que es van enregistrar imatges frontals de l'avanç del front per a determinar la velocitat de propagació, també es van col·locar fils com a mètode alternatiu per a determinar aquesta variable.

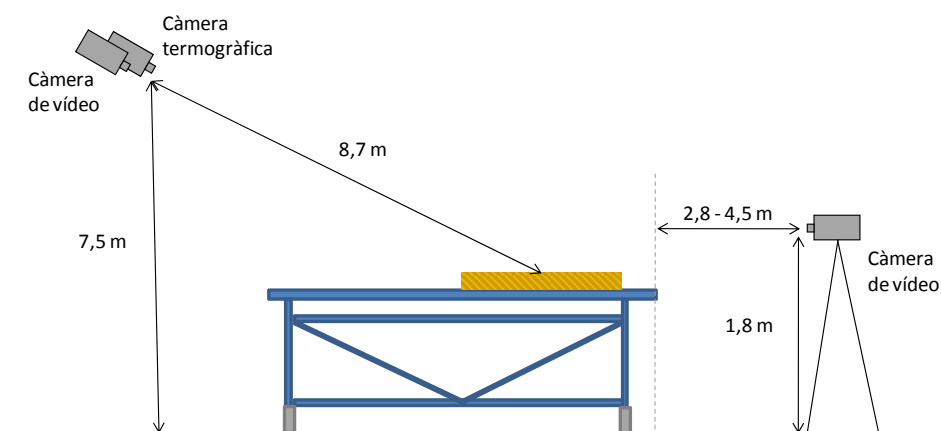


Figura 5.16 Esquema de la posició de la càmera termogràfica i de les càmeres de vídeo en l'experimentació a la taula de pendent.

A més, es van situar dos transductors de flux de calor, el transductor 64-2-16 en la base inferior del llit, i el sensor dual 64-20T-20R(S) en la base superior del llit. Ambdós es van posicionar a l'altura del llit de combustible i separats 8 cm i 5 cm de l'inici i del final del llit respectivament, per a mesurar el flux de calor emès pel front de flames.

Per tal de poder estimar la quantitat de combustible cremat per unitat de superfície, es varen col·locar diverses safates d'alumini sota del llit de combustible per a recollir el residu de cendres després de cada assaig.

Túnel de combustió

En les proves realitzades al túnel de combustió es van fer servir els mateixos equips i sistemes de mesura que en les proves realitzades a la taula de pendent amb l'única diferència que en aquestes proves va ser necessari utilitzar dues càmeres de vídeo per a l'enregistrament d'imatges perpendiculars al front de flames per tal de poder cobrir tota la longitud del llit de combustible i caracteritzar adequadament la geometria de les flames (Figura 5.17). Ambdues càmeres es van situar entre 1,7 m i 2,5 m del túnel de combustió. Pel què fa a la càmera termogràfica i l'altre càmera de vídeo es van posicionar a 6,2 m respecte del centre del llit. Els transductors de flux de calor es van col·locar en la mateixa posició que en les proves dutes a terme a la taula de pendent.



Figura 5.17 Disposició dels equips d'enregistrament d'imatges al túnel de combustió.

Taula d'assaigs en congostos - DE4

En les proves realitzades en aquesta instal·lació experimental únicament es varen emprar equips de filmació. Com en els casos descrits anteriorment, es varen filmar els assaigs frontalment amb una càmera de vídeo i una càmera termogràfica per tal de determinar la velocitat de propagació del front de flames. Aquestes càmeres es col·locaren a 15 metres respecte del centre del llit. A més, les proves es filmaren també lateralment amb una càmera de vídeo per tal de determinar els paràmetres geomètrics de la flama. Aquesta càmera es posicionà aproximadament a 5 m del centre del llit.

5.2.3. Disseny experimental

Amb l'experiència adquirida en l'execució de la sèrie experimental duta a terme al CERTEC i tenint en compte les característiques i la disponibilitat de material al LEIF es dissenyaren dos blocs experimentals, per a estudiar respectivament l'efecte del pendent i del vent en la propagació d'un front de flames, a partir de l'anàlisi dimensional. A més, es va realitzar un tercer bloc experimental per tal d'analitzar l'efecte d'ampliar l'escala de treball per a fronts de flames bàsics.

Atès que el disseny experimental de les proves desenvolupades a la taula de pendent i al túnel de combustió tingué trets comuns i es realitzà simultàniament, es detallarà en primer lloc el disseny d'aquestes proves i posteriorment s'especificarà el disseny del tercer bloc experimental.

Proves a la taula de pendent i al túnel de combustió

Les lleis d'escala derivades d'incorporar l'efecte del pendent i del vent, determinades al capítol 4 i simplificades pel fet d'utilitzar una sola espècie vegetal, són les mateixes que per al bloc experimental

del CERTEC (apartat 5.1.4), és a dir, per a un front de flames bàsic, però incorporant noves restriccions, definides per les següents equacions:

$$\alpha_{S1} = \alpha_{S2} \quad [5.8]$$

$$\frac{u_{wS1}}{u_{wS2}} = \left(\frac{W_{S1}}{W_{S2}} \right)^{1/2} \quad [5.9]$$

Per tant, a banda d'haver de mantenir constant la humitat del combustible i la densitat aparent del llit; i escalar l'altura del llit linealment amb la longitud del front de flames, en les proves amb pendent calgué a més mantenir constant la inclinació de la superfície d'avanç del front (eq. [5.8]). En el cas de les proves amb vent, calgué escalar la velocitat del vent amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames (eq. [5.9]).

Atès de que no es podia disposar del mateix tipus de combustible que l'utilitzat en l'experimentació realitzada al CERTEC, va ser necessari seleccionar novament un combustible que permetés mantenir la densitat aparent constant al incrementar l'altura del llit. A més, un altre requisit fou que el combustible seleccionat fos el més semblant possible a l'utilitzat en l'experimentació desenvolupada al CERTEC, de manera que es poguessin assolir valors del mateix ordre de magnitud pel què fa a la densitat aparent del llit. Tenint en compte això, la disponibilitat de tipologies de combustibles al laboratori del LEIF i ateses les seves similituds amb la palla d'ordi, es seleccionà la palla de blat com a combustible per a dur a terme les proves.

Per cada bloc experimental es programaren proves en tres models o escales experimentals, o el que és el mateix, en llits de combustible amb diferents configuracions però escalats geomètricament d'acord a les lleis d'escala. Com en les proves realitzades al CERTEC, les característiques d'aquests models s'establiren a partir de la determinació inicial de l'amplada per cadascun dels llits. Per tal de seguir al màxim el criteri de disseny experimental de les proves dutes a terme al CERTEC, i tenint en compte les característiques de les instal·lacions del LEIF, es fixaren els valors d'amplada del llit o longitud inicial del front de flames en 0,5 m, 1,0 m i 1,25 m. No es varen testar amplades superiors per les possibles interferències en el flux d'aire ocasionades per la proximitat del llit de combustible a les parets del túnel de combustió. També perquè es preveia que no es podria assolir una propagació estacionària perquè els llits no serien suficientment llargs, degut a les dimensions de les instal·lacions experimentals.

A partir d'aquestes amplades, es provaren de construir llits de combustible amb les mateixes càrregues que els llits de les proves dutes a terme al CERTEC, per tal de validar si s'assolien les mateixes altures i per tant la mateixa densitat aparent. Els llits construïts presentaren característiques molt similars a les dels llits de les proves del CERTEC, de manera que les especificacions teòriques coincideixen, per a igual amplada del llit, amb les de les proves del CERTEC, i es resumeixen en la Taula 5.8.

Taula 5.8. Característiques teòriques del llit en les diferents escales.

Designació de l'escala	Amplada del llit [m]	Càrrega de combustible [kg/m ²]	Altura del llit teòrica [m]	Densitat aparent teòrica [kg/m ³]
W50	0,50	0,30	0,04	7,50
W100	1,00	0,60	0,08	7,50
W125	1,25	0,75	0,10	7,50

Tot i que estava previst realitzar els experiments amb un únic tipus de combustible, les bales servides pel subministrador eren una mescla de diverses espècies, que principalment contenien blat comú – *Triticum aestivum*– i blat dur –*Triticum turgidum*–. Aquestes dues espècies difereixen bàsicament en la relació superfície – volum, tal i com es pot observar a la Taula 5.9 on es detallen les principals característiques de cadascuna.

Taula 5.9 Propietats del combustibles utilitzat en l'experimentació al LEIF (Pastor, 2004).

Propietats intrínseques de la palla de blat comú – <i>Triticum aestivum</i>	
Poder calorífic inferior, PCI [kJ/kg]	16968
Relació superfície – volum, σ_s [m ² /m ³]	7714
Densitat del combustible, ρ_m [kg/m ³]	315
Diàmetre de partícula, d_c [mm]	1,8
Propietats intrínseques de la palla de blat dur – <i>Triticum turgidum</i>	
Poder calorífic inferior, PCI [kJ/kg]	16933
Relació superfície – volum, σ_s [m ² /m ³]	4734
Densitat del combustible, ρ_m [kg/m ³]	258
Diàmetre de partícula, d_c [mm]	2,2

Davant la impossibilitat de controlar quin tipus de bales serien servides pel subministrador es varen haver d'efectuar les proves emprant el combustible disponible i per tant, utilitzant l'espècie de blat disponible en cada moment. Evidentment, l'ús d'una o altra espècie pot conduir a diferents resultats i aquest serà un factor a tenir en compte en l'anàlisi de resultats, com ja observà Pastor (2004).

Atès que la determinació de les característiques dels models experimentals es va dur a terme amb palla de blat comú, es va observà que en alguns casos en què s'utilitzava blat dur, els valors reals mesurats de les característiques del llit no s'ajustaven als teòrics, de manera que en aquests casos es modificà manualment la compactació natural del llit per assolir valors més propers als teòrics.

Pel què fa a les longituds del llit de combustible, en cada bloc experimental foren diferents, d'acord a les característiques de la instal·lació i de les limitacions imposades pels objectius de l'estudi de retardants. Per a aquest estudi era necessari reservar un metre del llit de combustible, on s'hi ubicava una franja de combustible de 0,5 m de llarg tractada amb retardant seguida per una altra franja de combustible no

tractada de les mateixes dimensions. Cal notar que la longitud del llit fou igual per a tots els models experimentals i per tant independent de l'escala experimental.

Així en les proves dutes a terme a la taula de pendent, el llit de combustible tingué 3,0 m de llarg, tenint en compte que l'últim metre fou reservat a l'experimentació amb retardants. Per tant, únicament 2,0 m s'empraren per a aquest estudi.

En el cas de les proves al túnel de combustió, la longitud del llit de combustible també varià en funció de si es tractava de proves de control –sèrie U0– o amb vent –sèries U1, U2 i U3–, tal com es pot observar en la Figura 5.18. En les proves amb vent, és construï un llit de major longitud, d'una banda per a deixar que es formés el front de flames abans de posar en marxa els ventiladors (el primer metre inicial) i un cop iniciat el vent, deixar al front un marge d'espai per a la seva estabilització (0,5 m següents), i d'altra banda per a intentar que el front pogués assolir un estat estacionari de propagació (3,0 m). Fou en aquest darrer tram en el que es realitzaren les mesures de propagació amb vent.

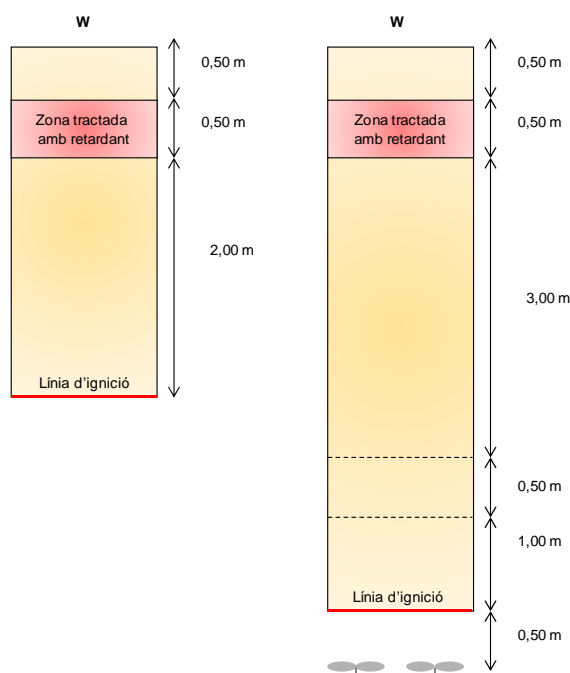


Figura 5.18 Esquema de la disposició del llit de combustible en les proves de la sèrie U0 (esquerra); i U1,U2 i U3 (dreta).

Un altre aspecte destacat de les proves dutes a terme tant a la taula de pendent com al túnel de combustió, és que no es va poder complir amb la llei d'escala de conservació de la humitat del combustible. Atesa la quantitat de combustible necessària per a cada prova no fou factible assecar el combustible tal i com es va fer en les proves realitzades a la instal·lació de Barcelona. D'aquesta manera

el contingut d'humitat del combustible variava d'acord amb les condicions ambientals, ja que les bales de palla s'emmagatzemaven al laboratori en les condicions ambientals existents. Aquest és doncs un altre aspecte que caldrà tenir en compte en l'anàlisi de les dades.

Pel què fa a les proves amb pendent, tal i com ja s'ha vist, l'eq. [5.8] estableix que el valor del pendent s'ha de mantenir constant en les diferents escales. Així, per tal d'estudiar l'efecte del pendent en la propagació es varen programar tres sèries experimentals, anomenades P10, P20 i P30, en què la inclinació de la superfície d'avanç del foc es mantingué constant, prenent valors de 10°, 20° i 30°, respectivament. Per a cada sèrie es va dur a terme una prova en cada escala experimental, tal i com es detalla a la Taula 5.10. A més, es va programar una altra sèrie anomenada P0, en què es dugueren a terme proves de control, és a dir, sense pendent. Aquestes proves es van realitzar per tal de que, al analitzar les dades, es pogués tenir en compte l'efecte del contingut d'humitat del combustible. Així, just abans o després de fer una prova amb pendent, s'efectuava el corresponent assaig de control, és a dir, en la mateixa escala i condicions ambientals, però sense pendent. Lògicament, per a les proves de la sèrie P0 únicament apliquen les lleis d'escala per a fronts de flames bàsics.

Taula 5.10. Sèries experimentals a la taula de pendent.

Sèrie	Angle d'inclinació [°]	Escales d'experimentació
P0	0	W50, W100 i W125
P10	10	W50, W100 i W125
P20	20	W50, W100 i W125
P30	30	W50, W100 i W125

Per cada sèrie es varen dur a terme una prova en cada escala amb pendent més la prova homòloga sense pendent i a més es va fer una rèplica per cada prova. Per tant, en total, a la taula de pendent es van dur a terme 36 proves, 18 amb la superfície d'avanç del front inclinada i les altres 18 foren proves de control.

En relació a les proves realitzades al túnel de combustió, l'eq. [5.9] estableix que la velocitat del vent ha d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. Considerant que el túnel de combustió pot operar en un ampli rang de velocitats -0.5 a 5 m/s-, es decidí dur a terme tres sèries experimentals, anomenades U1, U2 i U3, en què es testaren des de vents suaus fins a vents forts, per tal de cobrir el major rang possible de velocitats. D'aquesta manera, inicialment es fixaren els valors de velocitat per a les escales experimentals menors, W50, i les velocitats per a la resta d'escales vingueren determinades per l'eq. [5.9]. La Taula 5.11 mostra els valors de velocitat de vent assignats a cada escala en les diferents sèries experimentals. Com en el cas de les proves amb pendent, per a cada sèrie experimental es va realitzar una prova en cada escala, més una rèplica. A més, es va dur a terme també una sèrie de proves de control sense vent (U0), seguint els mateixos criteris i objectius que les proves

de control desenvolupades a la taula de pendent. Per tant, al túnel de combustió es van dur a terme un total de 36 proves en què 18 es realitzaren en condicions de vent, i la resta sense vent.

Taula 5.11. Velocitat del vent en cada escala per a les diferents sèries experimentals.

Sèrie	Velocitat vent escala W50 [m/s]	Velocitat vent escala W100 [m/s]	Velocitat vent escala W125 [m/s]
U0	0,0	0,0	0,0
U1	0,7	1,0	1,1
U2	1,4	2,0	2,2
U3	2,1	3,0	3,3

Proves a la taula d'assaigs en congostos - DE4

Les proves realitzades a la taula d'assaigs en congostos - DE4 es van realitzar en darrer lloc ja que inicialment no estaven previstes. Per aquest motiu, es va disposar de molt poc temps tant per al seu disseny com per a dur a terme un bloc experimental amb un major nombre de proves.

L'objectiu d'aquestes proves fou estudiar la validesa de les lleis d'escala en fronts de flames bàsics al ampliar l'escala d'experimentació, atès que les característiques d'aquesta instal·lació permetien realitzar proves amb longituds inicials del front de flames superiors a la resta de les instal·lacions, garantint una longitud del llit suficient per a assolir una propagació estacionària.

El disseny experimental d'aquestes proves seguí les lleis d'escala aplicables a fronts de flama bàsics. Únicament es van poder realitzar dues proves (sèrie AE). En una de les proves s'amplià l'escala experimental de manera que la longitud inicial del front de flames i per tant l'amplada del llit es fixà en 2,5 m (W250). En l'altre prova es fixà la longitud inicial del front de flames en 1,0 m (W100), per tal de tenir una prova en les mateixes condicions que l'anterior, però en una escala comparable a la resta de proves realitzades tant al laboratori del LEIF com del CERTEC. Una vegada fixades les longituds inicials del front de flames es determinà la resta d'especificacions del llit de combustible de la mateixa manera que es feu per a les proves en la taula de pendent i en el túnel de combustió. La Taula 5.12 recull les principals característiques dels llits de combustible per a aquestes proves.

Taula 5.12. Característiques principals del llit en les diferents escales.

Designació de l'escala	Amplada del llit [m]	Càrrega de combustible [kg/m ²]	Altura del llit teòrica [m]	Densitat aparent teòrica [kg/m ³]
W100	1,00	0,60	0,08	7,50
W250	2,50	1,50	0,20	7,50

La longitud del llit del combustible fou igual per a les dues proves i tingué un valor de 3,5 m per tal d'assegurar que el front de flames pogués assolir una propagació estacionària.

El combustible utilitzat per a dur a terme ambdues proves fou el blat comú. Igualment que en la resta de proves realitzades al LEIF, no va ser viable assecar el combustible. Cal tenir en compte, per exemple, que per a dur a terme la prova en l'escala W250 foren necessaris més de 14 kg de palla.

Per últim, i com a resum, la Taula 5.13 recull els diferents blocs i sèries experimentals relatius a les proves de laboratori que es realitzaren al llarg d'aquesta tesi, i que conformen un total de 91 proves.

Taula 5.13. Blocs experimentals de laboratori.

Bloc experimental - Instal·lació	Sèrie	Vent [m/s] (W50 - W100 - W125)	Pendent [°]	Número de proves
Bloc 1 - Taula de combustió (CERTEC)	C0	X	X	17
	P0	X	X	18
Bloc 2 - Taula de pendent (LEIF)	P10	X	10	6
	P20	X	20	6
	P30	X	30	6
Bloc 3 - Túnel de combustió (LEIF)	U0	X	X	18
	U1	0,7 - 1,0 - 1,1	X	6
	U2	1,4 - 2,0 - 2,2	X	6
	U3	2,1 - 3,0 - 3,3	X	6
Bloc 4 - Taula DE4 (LEIF)	AE	X	X	2

5.2.4. Metodologia experimental de les proves a la taula de pendent

Atès que no s'havia treballat amb anterioritat en aquesta instal·lació, va ser molt útil per al disseny de la metodologia experimental conèixer el protocol emprat pel grup de recerca d'ADAI en les proves realitzades en aquesta instal·lació.

La metodologia experimental es dissenyà de manera que pogués ser duta a terme per dues persones, treballant paral·lelament en tasques on només es requereix la participació d'una d'elles, o conjunta en aquelles feines on fos imprescindible que ambdues en prenguessin part. Tot seguit es detallen les tasques que la comprenen.

Tasca 1. Determinació de la humitat del combustible

La primera tasca a efectuar era la determinació de la humitat del combustible. Aquest paràmetre és necessari per a establir la quantitat de combustible requerit per a la prova. A més, atès que el temps per a realitzar la mesura amb l'analitzador d'humitat era de quinze minuts, es col·locava la mostra a l'analitzador en primera instància per a poder començar a treballar en la següent tasca mentre es duia a terme la mesura.

Tasca 2. Posicionament i connexió dels equips

Aquesta tasca comprenia el posicionament de la càmera termogràfica i de les dues càmeres de vídeo – frontal i lateral– i la connexió del transductor 64-2-16 i del sensor dual al mòdul *FieldPoint*. A continuació, la connexió de la càmera termogràfica i del mòdul *FieldPoint* a l'ordinador portàtil per a tot seguit inicialitzar el programari d'adquisició de dades *FireAll Forest*. Per últim, la comprovació del bon estat i correcte funcionament de tots els equips de mesura.

Tasca 3. Preparació del llit de combustible

Per a preparar el llit de combustible, calia en primer lloc determinar la quantitat de combustible en base humida necessària per a la prova, mitjançant el valor d'humitat obtingut en la primera tasca i tenint en compte també les dimensions del llit. Aquests càlculs s'efectuaven amb les següents expressions:

$$C_h = C \cdot \left(1 + \frac{H_s}{100}\right) \quad [5.10]$$

$$M_t = C_h \cdot A_{llit} \quad [5.11]$$

On:

C_h	Càrrega de combustible en base humida [kg/m ²]
C	Càrrega de combustible en base seca [kg/m ²]
H_s	Humitat del combustible en base seca [%]

M_t Massa total de combustible [kg]
 A_{llit} Àrea del llit de combustible [m²]

Per a facilitar la preparació del llit, es col·locaven a la taula fils de llana per a delimitar l'àrea del llit de combustible. Abans de repartir el combustible en aquesta àrea, es distribuïen de forma aleatòria tres safates d'alumini per a recollir el residu de cendres (Figura 5.19), situant sempre una d'elles en la zona on s'ubicaria la franja de combustible tractat amb retardant.



Figura 5.19 Imatge de la posició de les safates de recollida de cendres.

Seguidament es disposava sobre la taula la franja de combustible tractada amb retardant i a continuació es repartia uniformement el combustible en la resta d'àrea superficial del llit (Figura 5.20).



Figura 5.20 Disposició del combustible sobre la taula.

Tasca 4. Col·locació dels fils i mesura de l'altura del llit de combustible

Un cop disposat el combustible conformant un llit homogeni, es col·locaven fils de cotó subjectats als pernys situats a banda i banda de la superfície útil de crema per tal de formar trams paral·lels a la línia d'ignició.

Posteriorment, es mesurava l'altura del llit de combustible, diferenciant entre la part del llit no tractada amb retardant, i la part tractada amb retardant. En funció de l'amplada del llit de combustible es realitzaven, en la zona no tractada del llit de combustible, de 12 a 20 mesures. L'altura del llit s'obtingué com a la mitjana aritmètica d'aquestes mesures. Si a l'iniciar les mesures s'observava que els valors obtinguts estaven per sota dels teòrics, es modificava manualment la compactació del llit i s'iniciava novament el procediment de mesura de l'altura del llit.

Tasca 5. Ajust de la posició de la taula i posicionament dels sensors de flux de calor

En funció de les especificacions de la prova calia ajustar l'angle d'inclinació de la taula. Només després de col·locar la superfície de la taula en l'angle correcte es podia d'una banda posicionar els sensors de flux de calor i de l'altra enregistrar amb la càmera termogràfica punts de referència per al posterior tractament digital de les imatges.

Tasca 6. Determinació de la humitat del combustible i de les condicions ambientals

Tot i que la humitat del combustible es mesurava abans de preparar el llit, es tornava a mesurar just abans de la ignició, ja que durant el temps transcorregut en preparar un assaig, aproximadament una hora, s'observà que les condicions ambientals podien canviar considerablement. A més, es va observar també que la superfície de la taula podia arribar a mantenir temperatures superiors a l'ambient després d'haver-hi realitzat una prova, de manera que al disposar-hi el combustible, aquest podia perdre humitat per contacte amb la superfície calenta.

A banda, es mesuraven també la temperatura i humitat relativa de l'aire.

Tasca 7. Execució de la prova

Instants abans de la ignició s'iniciava l'enregistrament de dades. La ignició era lineal, i com a metxa s'emprava un fil de llana xopat amb una mescla de gasolina i gasoil. Inicialment el fil es col·locà en la base inferior del llit de combustible. Posteriorment però, es canvià lleugerament el patró d'ignició de manera que tot i que la ignició va continuar essent lineal, es va canviar la seva posició, de manera que es va situar a 0,35 m de l'inici del llit.

Durant el decurs de la prova, un observador enregistrava l'instant de temps exacte en que el front al seu avanç anava trencant els fils de cotó. Alhora, aquest temps s'enregistrava també mitjançant el programari *FireAll Forest*, per tal de tenir totes les dades sincronitzades.

La Figura 5.21 i la Figura 5.22 mostren respectivament una imatge frontal i una lateral de dues proves diferents. Aquestes imatges han estat extretes de les seqüències de vídeo enregistrades amb els equips de filmació.



Figura 5.21 Imatge frontal d'una prova en curs amb pendent de 10°.



Figura 5.22 Imatge lateral d'una prova en curs amb un pendent de 20°.

Tasca 8. Recollida de cendres

Un cop finalitzada la prova, es posicionava la superfície de la taula paral·lela al terra en cas que la prova hagués estat realitzada amb un cert angle d'inclinació. D'aquesta manera s'accedia al llit per a retirar les safates de recollida de cendres. Aquest procés, era especialment delicat i calia anar amb molt de compte a l'hora tant de retirar les safates com de portar-les al laboratori, per tal de no perdre material abans de pesar-les.

Tasca 9. Desmuntatge dels equips i neteja de la instal·lació

Per últim, es posaven en marxa els extractors del laboratori per a eliminar el fum i es procedia a la retirada de la resta de cendres presents a la taula, per a iniciar una nova prova o bé desmuntar els equips i dur a terme les tasques de condicionament oportunes per a deixar la instal·lació a punt per a la propera sessió experimental.

5.2.5. Metodologia experimental de les proves al túnel de combustió

La metodologia experimental al túnel de combustió compregué bàsicament les mateixes tasques que les proves dutes a terme a la taula de pendent, descrites a l'apartat anterior (5.2.4), però òbviament, adaptades als requeriments d'aquesta instal·lació i de les proves que s'hi dugueren a terme. Així, les principals diferències en aquest sentit van ser el patró d'ignició i l'ajust i posada en marxa dels ventiladors, activitats aquestes incloses en la tasca d'execució de la prova. Tot seguit s'enumeren les tasques que compregueren la metodologia experimental al túnel de combustió, entrant únicament en detall en aquells aspectes que diferiren en relació a la mateixa tasca desenvolupada a la taula de pendent.

- Tasca 1. Determinació de la humitat del combustible.
- Tasca 2. Posicionament i connexió dels equips (Figura 5.23).
- Tasca 3. Preparació del llit de combustible.
- Tasca 4. Col·locació dels fils i mesura de l'altura del llit de combustible.
- Tasca 5. Posicionament dels sensors de flux de calor i ajust de la freqüència de rotació dels ventiladors.
- Tasca 6. Determinació de la humitat del combustible i de les condicions ambientals.
- Tasca 7. Execució de la prova (Figura 5.24).
- Tasca 8. Recollida de cendres.
- Tasca 9. Desmuntatge dels equips i neteja de la instal·lació.



Figura 5.23 Imatge de la col·locació dels radiòmetres.



Figura 5.24 Imatge d'una prova en curs

La tasca número 3 de preparació del llit de combustible, compregué les mateixes activitats que en les proves dutes a terme a la taula de pendent i al túnel de combustió, amb l'única diferència que en les proves realitzades amb vent –sèries U1, U2 i U3–, en què el llit de combustible tingué una longitud major, es col·locaren un major nombre de safates per a recollir el residu de cendres (dues al tram inicial del llit i tres en el tram en què es dugueren a terme la resta de mesures). Precisament per això, també es dugueren a terme un major nombre de mesures per a determinar l'altura del llit (tasca número 4) en relació a les proves de la taula de pendent, de manera que es realitzaren de 18 a 24 mesures en funció de l'amplada del llit.

Pel què fa a la tasca número 7 d'execució de la prova, compregué l'inici de l'enregistrament de dades i tot seguit la ignició del llit de combustible. Aquesta es realitzà utilitzant el mateix tipus de metxa que en les proves de la taula de pendent, però en tots els casos la ignició, de patró lineal, es duqué a terme en la base inferior del llit. A més, aquesta tasca compregué també la posada en funcionament dels ventiladors. Abans d'engegar els ventiladors però, es deixava avançar el foc al llarg d'un metre del llit perquè aquest es desenvolupés. A més, també es feu així per motius de seguretat, de manera que la persona que realitzés la ignició tingués un marge de temps per sortir de l'espai del túnel.

5.2.6. Metodologia experimental de les proves a la taula DE4

La metodologia de les proves desenvolupades a la taula d'assaigs en congostos, fou molt similar a les metodologies de les proves de la taula de pendent i del túnel de combustió, i inclogué les següents tasques:

- Tasca 1. Determinació de la humitat del combustible.
- Tasca 2. Posicionament i connexió dels equips.
- Tasca 3. Preparació del llit de combustible.
- Tasca 4. Mesura de l'altura del llit de combustible.
- Tasca 5. Determinació de la humitat del combustible i de les condicions ambientals.
- Tasca 6. Execució de la prova (Figura 5.25).

- Tasca 7. Desmuntatge dels equips i neteja de la instal·lació.



Figura 5.25 Imatges del decurs de les proves a la taula DE4. a) Imatge frontal prova W250. b) Imatge lateral prova W250. c) Imatge frontal prova W100. d) Imatge lateral prova W100.

En aquestes proves però, no es van col·locar els sensors de flux de calor ja que no es va disposar del temps necessari per a implementar les modificacions requerides per a poder-los connectar a l'ordinador d'enregistrament de dades, des de la ubicació que haurien hagut de tenir. A més, tampoc es varen col·locar safates per a la recollida del residu de cendres.

6. METODOLOGIA D'OBTENCIÓ DE LES VARIABLES

Actualment existeix un ampli ventall de tècniques i equips de mesura per a determinar les variables habitualment relacionades amb el comportament del foc. La selecció del mètode més apropiat per a mesurar una variable depèn de l'objectiu de l'estudi que s'està duent a terme, de l'escenari experimental en què s'ha de realitzar la mesura, de la precisió requerida i evidentment, del pressupost disponible. Així, l'èxit de les metodologies de mesura a utilitzar recau en un compromís entre la qualitat de la mesura –fiabilitat, precisió i densitat de dades– i els costos, tant econòmics com d'implementació.

En aquest capítol es recullen les metodologies emprades en l'experimentació de laboratori per a determinar les diferents variables incloses en l'anàlisi dimensional, fent un breu recorregut per les metodologies existents per a mesurar cada variable i les limitacions imposades pels mitjans disponibles en l'experimentació d'aquesta tesi. Tanmateix, no és objecte d'aquest capítol entrar en discussions més profundes sobre les diferents metodologies de mesura, per a això el lector pot consultar el treball de Gill i Knight (1988).

A l'inici del capítol es fa un breu resum sobre quines variables foren mesurades directament, quines foren estimades i quines no es pogueren determinar, segons el bloc experimental.

6.1. Introducció

De les variables que formen part de l'anàlisi dimensional desenvolupat, no totes es pogueren mesurar durant l'experimentació, de manera que algunes es varen estimar a partir de valors trobats a la bibliografia mitjançant equacions teòriques o partint d'hipòtesis per al seu càlcul. Pel què fa a la resta de variables fluctuaren en funció del temps i de l'espai. Tanmateix, es va utilitzar un únic valor de cada variable en el càlcul dels nombres adimensionals i en la validació de les lleis d'escala. Per tant, fou necessari definir o fixar un criteri de com determinar un valor mitjà per cadascuna d'aquestes variables. A més, calgué treballar per a què totes les definicions fossin coherents unes amb les altres. En general, es va estudiar l'evolució del foc en el seu estat estacionari, és a dir, sense tenir en compte els instants inicials i finals, corresponents a estats transitoris. Per tant, fou durant aquest període estacionari en què es determinaren les diferents variables. A banda, cal tenir en compte que no totes les variables es van poder determinar per a tots els blocs experimentals, perquè tal i com s'ha explicat al capítol 5 no es va disposar de tots els equips de mesura en tots els blocs experimentals.

A continuació es descriuen les metodologies de càlcul de les variables que han requerit una anàlisi més detallada, agrupades per apartats segons corresponguin a variables de comportament del foc i geometria de la flama, característiques del llit de combustible, del plomall o de l'entorn. Les variables característiques del material –poder calorífic inferior, relació superfície-volum, densitat del combustible i diàmetre de partícula– no han estat considerades en aquest capítol, ja que foren obtingudes íntegrament a partir de la bibliografia (Pastor, 2004).

La Taula 6.1 mostra de forma resumida el mètode de càlcul emprat en la determinació de cada variable, especificant en quins blocs experimentals foren determinades. En aquells casos en què no fou possible mesurar directament o indirectament la variable i que fou estimada a partir de la bibliografia s'especifica la referència bibliogràfica. A banda, en els casos de les variables pendent de la superfície i la velocitat del vent, que vingueren determinades pel disseny experimental i que per tant assumiren valors imposats de forma prèvia a la realització de les proves, s'especifiquen en la Taula 6.1 com a variables de disseny.

Per últim, esmentar que les funcions implementades amb el programari *Matlab*[®] a les que es fa referència en aquest capítol es recullen en l'annex I.

Taula 6.1 Resum de les metodologies emprades per determinar les variables que formen part de l'anàlisi.

Variable	Mètode	Bloc experimental
Característiques del material		
Poder calorífic inferior, Relació superfície volum, densitat del combustible, diàmetre de partícula	Pastor (2004)	1, 2, 3 i 4
Característiques del llit de combustible		
Longitud de preescalfament	Tractament digital imatges termogràfiques	1
Altura del llit	Mesura directa – Flexòmetre	1, 2, 3 i 4
Càrrega de combustible	Variable de disseny – sistema pesatge/balança	1, 2, 3 i 4
Densitat aparent	Funció de la càrrega (C) i l'altura (h), C/h	1, 2, 3 i 4
Humitat del combustible	Mesura directa – Analitzador d'humitat	1, 2, 3 i 4
Temperatura del llit de combustible	Tractament digital imatges termogràfiques – Algoritme 'temp_s.m'	1
Coefficient de convecció superfície llit	Incropera i DeWitt (2002)	1
Pendent llit	Variable de disseny	2
Comportament del foc i geometria		
Velocitat de propagació	Tractament digital imatges termogràfiques – Algoritmes 'velocitat.m', 'velocitat_mod.m' i 'homografia.m'	1, 2, 3 i 4
Velocitat de combustió	Mesura directa – Sistema pesatge	1
Gruix del front de flames	Funció de la velocitat de propagació (R) i del temps de residència (t_r), R/t_r	1
Longitud del front de flames	Tractament digital imatges termogràfiques – Algoritme 'eflength.m'	1, 2, 3 i 4
Altura de flama	Tractament digital imatges vídeo – Algoritme 'altura.m'	1, 2, 3 i 4
Longitud de flama	Tractament digital imatges vídeo – Algoritme 'altura.m'	1, 2, 3 i 4
Intensitat del front de flames	Byram (1959) i Alexander (1982)	1, 2, 3
Flux de calor	Mesura directa – Sensors de flux de calor	1
Temperatura de la flama	Mesura directa – Termoparells	1
Temps de residència	Mesura indirecta – Termoparells	1
Característiques plomall		
Densitat, conductivitat tèrmica, coeficient d'expansió, viscositat	Incropera i DeWitt (2002)	1
Temperatura	Ajust model Weber et al. (1995)	1
Velocitat	Raupach (1990)	1
Característiques entorn		
Capacitat calorífica, densitat, conductivitat tèrmica, coeficient d'expansió, viscositat	Incropera i DeWitt (2002)	1, 2, 3 i 4
Humitat relativa i temperatura de l'aire	Mesura directa – Termohigròmetre	1, 2, 3 i 4
Velocitat induïda	Nelson (2003)	1
Velocitat del vent	Variable de disseny	3
	Nelson (2002)	2

6.2. Variables de comportament del foc i geometria de flama

En aquest apartat es descriuen les metodologies d'obtenció de les variables relacionades amb el comportament del foc i la geometria de flama. D'aquestes, la velocitat de propagació, la longitud del front de flames, l'altura i la longitud de flama es pogueren obtenir per a tots els blocs experimentals. Els mètodes d'obtenció d'aquestes variables estigueren lligats al tractament digital d'imatges, tant termogràfiques com visibles, de manera que fou necessària la implementació d'algoritmes de càlcul per agilitzar i automatitzar la seva determinació. Pel què fa a la intensitat de l'incendi, fou calculada per als blocs experimentals 1, 2 i 3, però no així per al bloc 4, ja que en les proves d'aquest bloc no es pogueren obtenir dades del consum de combustible. La resta de variables –temps de residència, gruix de flama, velocitat de combustió, temperatura de flama i flux de calor–, únicament es pogueren determinar per a les proves dutes a terme al CERTEC.

6.2.1. Velocitat de propagació

Les tècniques utilitzades per a determinar la velocitat de propagació consisteixen en mesurar el temps que el foc necessita per a recórrer una distància coneguda o bé mesurar la posició del perímetre de l'incendi per a certs intervals de temps conegut. Aquesta informació es va extreure a partir de l'anàlisi de les imatges captades per la càmera termogràfica mitjançant l'algoritme desenvolupat a Pastor et al. (2006). Aquest mètode consta bàsicament de dos passos, de manera que cadascun d'ells fou implementat en una funció diferent –'homografia.m' i 'velocitat.m'– mitjançant el programari *Matlab*®. Tot seguit es descriuen més en detall ambdós passos.

El primer pas, implementat en la funció 'homografia.m', consisteix en trobar la correspondència entre el sistema de coordenades de la imatge, expressat en píxels, i el sistema de coordenades real, expressat en metres. Aquesta correspondència permet localitzar la posició real del front de flames a partir de la seva posició en la imatge. Per a resoldre aquest problema s'utilitza una tècnica de geometria projectiva de múltiples vistes que permet determinar la matriu d'homografia planar. L'homografia és la transformació geomètrica biunívoca entre dos plans o d'un pla amb ell mateix, de forma que qualsevol recta d'un pla correspon a una recta de l'altre pla i un punt de la primera recta correspon a un punt de l'altra recta.

Les imatges obtingudes amb la càmera termogràfica permeten conèixer la temperatura que correspon a cada píxel de la imatge (Figura 6.1 a), el qual alhora es correspon a un punt de la superfície d'estudi real. Per a obtenir la distribució de temperatures sobre la superfície d'estudi es discretitza aquesta àrea com una matriu de punts, a cada un dels quals li correspon una posició. A partir de la inversa de la matriu d'homografia s'obté la seva posició en les coordenades del sistema de referència real. El valor de temperatura emmagatzemat en cadascuna d'aquestes posicions és el que s'introdueix a la matriu corresponent a la superfície d'estudi (Figura 6.1 b).

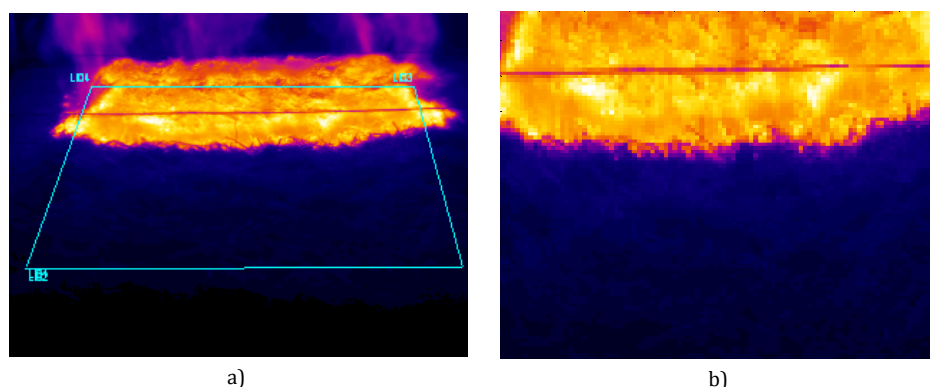


Figura 6.1 Aplicació de la transformació homogràfica a imatges termogràfiques. a) Imatge original de l'avanç del front. b) Imatge després d'eliminar la distorsió geomètrica.

El segon pas, implementat en la funció '*velocitat.m*', consisteix en determinar la posició exacta del front de flames en cada imatge a partir d'un valor llindar de temperatura. Per a determinar la posició del front de flames en cada instant de temps és necessari establir un criteri de cerca dins la matriu de temperatures corresponent a la superfície d'estudi. Prèviament però, es normalitza d'acord amb la següent expressió:

$$T'_{ij} = \frac{(T_{ij} - T_{min})}{(T_{max} - T_{min})} \quad [6.1]$$

On:

T'_{ij} Valor normalitzat de temperatura de l'element ij

T_{ij} Temperatura de l'element ij

T_{min} Temperatura mínima de la matriu corresponent a la superfície del llit

T_{max} Temperatura màxima de la matriu corresponent a la superfície del llit

Aquesta transformació permet obtenir una nova matriu que conté valors compresos entre 0 i 1. Aquesta forma adimensional per expressar la temperatura ja fou utilitzada a Ventura *et al.* (1994) per a modelitzar les corbes temperatura - temps de flames d'agulles de pi en experiments de laboratori.

La cerca de la posició del front es realitza per columnes en la matriu normalitzada de temperatures i s'inicia des de l'última fila, que físicament correspon al costat de la superfície, paral·lel a la línia d'ignició, que crema en últim lloc. D'aquesta manera s'eviten errors de localització del front derivats de la detecció de punts calents que no formen part del front, sinó que són punts que continuen en combustió incandescent després del pas del front.

El valor llindar de temperatura normalitzada a partir del qual es considera que un punt pertany al front de flames és un paràmetre d'entrada de la funció, anomenat m , i per tant és l'usuari qui fixa aquest valor. En aquest cas, es fixà a 0,3 que equival aproximadament a una temperatura instantània (T_{ij}) de 500 K, valor que correspon a la temperatura d'ignició de la palla (Grotkjaer et al., 2003).

Per a cada instant de temps es determina quina és la posició mitjana del front i quina és la posició més avançada. Així la funció '*velocitat.m*' pot calcular dos valors de velocitat de propagació, un valor màxim i un valor mitjà. El primer determina l'evolució del sector del front de flames més avançat en cada instant de temps, de manera que es correspon amb el valor de velocitat de propagació determinat a partir d'altres mètodes de mesura. El segon valor dóna informació qualitativa de la linealitat del front, ja que si difereix en gran mesura del valor de velocitat de propagació màxima, pot ser indicatiu de l'alteració de la geometria inicial del front de flames. Tanmateix, és recomanable sempre comprovar aquest fet a partir del gràfic del perfil del front.

La Figura 6.2 mostra un exemple dels resultats de l'aplicació d'aquest programa a una seqüència d'imatges, de manera que a banda de mostrar la progressió del front de flames –tant del punt més avançat com en terme mitjà– permet visualitzar-ne també el seu perfil.

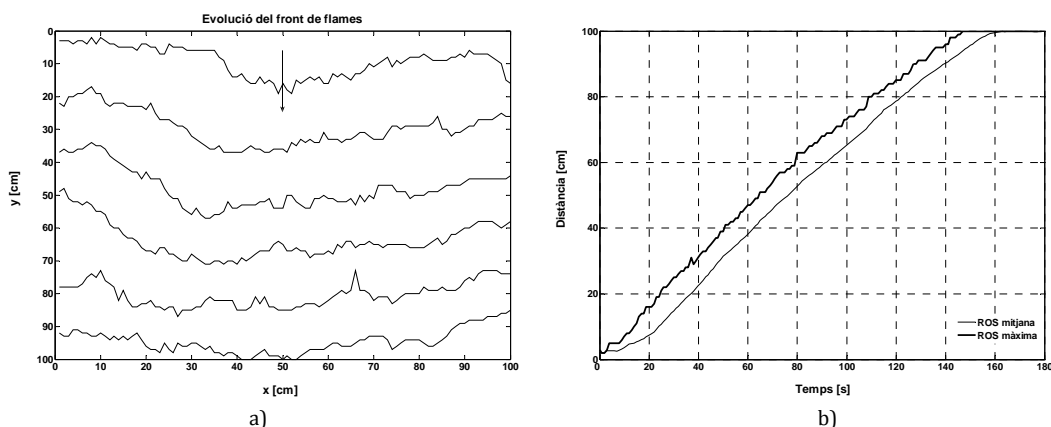


Figura 6.2 Resultats del programa '*velocitat.m*'. a) Evolució del perfil del front de flames. b) Posició del front (mitjana i màxima) en funció del temps.

Cal remarcar que per a l'anàlisi de les dades es va utilitzar el valor de velocitat de propagació màxim, en previsió de comparar aquests resultats amb altres resultats obtinguts a proves de camp, probablement calculats amb mètodes que únicament proporcionen el valor corresponent a l'avanç més ràpid del front.

La funció '*velocitat.m*' fou implementada en base a les imatges enregistrades en les proves dutes a terme al CERTEC. En el cas de les imatges enregistrades en les proves realitzades al LEIF, la posició de la càmera termogràfica canvià en relació a l'avanç del front, de manera que en aquestes imatges

s'observa com el front s'allunya de la càmera. Això provoca que quan les flames estan molt inclinades cap al combustible no cremat, a causa del vent o del pendent, puguin arribar a interferir en la detecció de la posició del front de flames. A més en aquestes proves, la distància de la càmera al centre del llit fou també molt més gran. Així, fou necessari introduir algunes modificacions en l'algoritme '*velocitat.m*' per tal de resoldre aquestes qüestions. Els canvis s'implementaren en una nova funció anomenada '*velocitat_mod.m*'. Aquesta nova funció mantingué les instruccions principals de la funció '*velocitat.m*' però va incorporar una correcció dels valors de posició màxima obtinguts i utilitzats en el càlcul de la velocitat d'avanç del front. Per a això s'allisà la corba de valors de posició màxima del front al llarg del temps, aplicant un filtre de mitjana mòbil en un rang de 5 punts. La Figura 6.3 il·lustra els resultats obtinguts, de manera que en blau s'observa la línia dels punts detectats inicialment i en verd els valors obtinguts després d'aplicar aquest filtre.

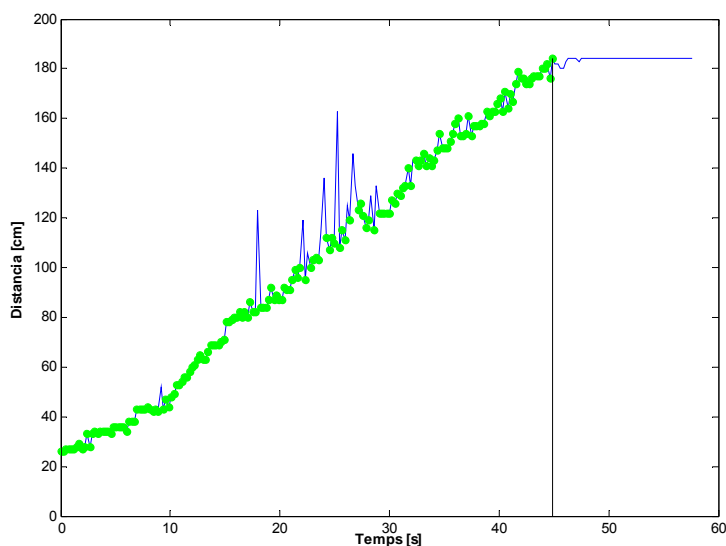


Figura 6.3 Posició més avançada del front de flames en funció de temps (línia blava), i valors corregits (punts verds) per a una prova de la sèrie P30 (W100_P30_30).

A més, també es va haver d'ajustar el valor utilitzat del paràmetre d'entrada m per a detectar la posició del perfil del front, a causa de les interferències generades per les flames i els gasos calents. En general, la utilització d'un valor de 0,4 fou suficient per a detectar correctament la posició del front de flames, a excepció dels casos extrems de vent i pendent, en què fou necessari incrementar aquest valor fins a 0,5. Cal notar que valors superiors de m corresponen a valors superiors de temperatura, de manera que al fer la cerca de la posició del front s'evita detectar punts corresponents a les flames o gasos calents com a pertanyents al front de flames. A la Figura 6.4 es pot observar un exemple d'aquest fet, on en verd s'indica la posició del front detectada per l'algoritme quan s'utilitza un valor de m igual a 0,4 i en blau la posició obtinguda per a un valor de m igual a 0,5.

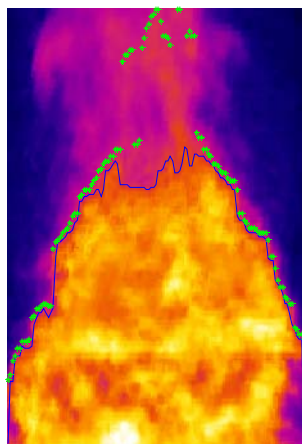


Figura 6.4 Imatge termogràfica d'una prova de la sèrie P30 on s'ha superposat la posició del front detectada amb diferents valors de m , en verd $m = 0,4$ i en blau $m = 0,5$.

6.2.2. Longitud del front de flames

La longitud del front de flames es determina a partir de la informació generada amb el càlcul de la velocitat de propagació, en què per a cada imatge s'obté la posició del perfil del front de flames. Els programes '*velocitat.m*' i '*velocitat_mod.m*' enregistren les coordenades de posició dels punts que configuren el perfil del front en una matriu, de manera que a cada fila s'emmagatzemen les coordenades del front en un determinat instant de temps.

Aquesta matriu fou utilitzada com a paràmetre d'entrada per la funció '*eflength.m*', implementada també amb el programari *Matlab*[®], per a determinar la longitud del front de flames en l'interval de temps en què el front de flames avançà en règim estacionari.

La funció '*eflength.m*' ajusta els punts que determinen la posició del front de flames en cada instant de temps a una funció polinòmica tipus *spline* cúbica. Aquestes són funcions polinòmiques a trossos que interpolen una sèrie de punts, de manera que cada tram s'ajusta a un polinomi de tercer grau i en cada punt els dos polinomis concurrents tenen la primera i segona derivada iguals.

Llavors, la longitud del front de flames en cada instant de temps es calcula a partir de l'expressió genèrica per a determinar la longitud d'una corba (L) definida per la funció $y(x)$ expressada en coordenades cartesianes (eq. [6.2]).

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \left[\frac{dy}{dx}\right]^2} dx \quad [6.2]$$

Els valors de longitud del front instantània es filtren per a eliminar-ne les observacions atípiques, degudes a errors en la detecció del contorn del front de flames. La funció '*eflength.m*' menysté els valors superiors al valor de la suma de la mitjana de la sèrie més la desviació estàndard. Finalment, el valor de longitud del front per a cada prova es determina com el valor mitjà de les longituds instantànies un cop eliminats els valors atípics.

El programa '*eflength.m*', a banda de proporcionar com a resultat aquest valor mitjà, també presenta l'evolució de la longitud del front instantània al llarg del temps. La Figura 6.5 en mostra un exemple.

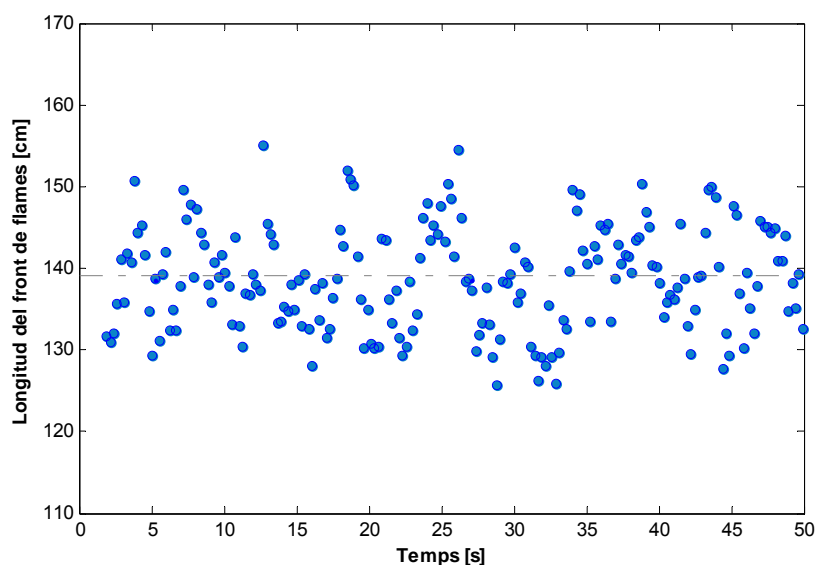


Figura 6.5 Evolució de la longitud del front de flames en funció del temps.

Com en el cas de la funció '*velocitat.m*', la funció '*eflength.m*' fou implementada en base a les imatges obtingudes en les proves dutes a terme al CERTEC. En les proves realitzades al LEIF, la posició de la càmera termogràfica canvià en relació a l'avanç del front, tal i com s'ha comentat en l'apartat anterior. D'aquesta manera fou necessari introduir modificacions en la funció de càlcul de la longitud del perfil del front. Així, calgué inserir noves instruccions per a allisar el perfil del front de flames i evitar en cert grau la detecció de punts corresponents a la flama i no al perfil del front, de manera que s'obtidrien valors de la longitud del front de flames superiors als reals. La Figura 6.6 mostra un exemple de l'evolució del perfil del front al llarg del temps sense aplicar les instruccions d'allisat (a) i després d'aplicar aquest filtre (b).

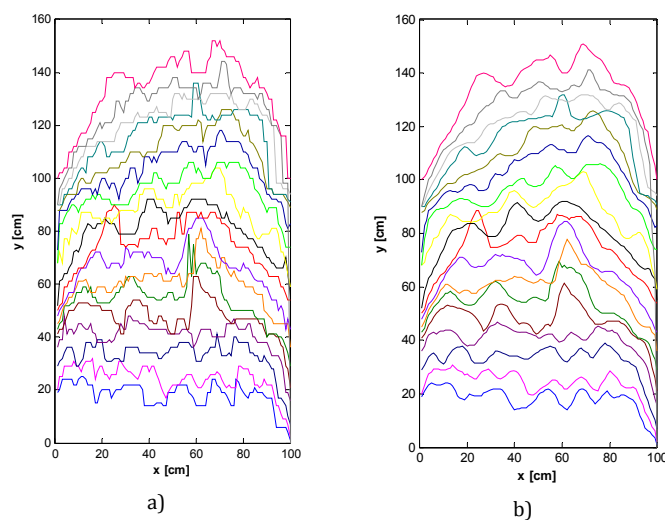


Figura 6.6 Evolució del perfil del front durant el seu avanç. a) Perfils sense allisar. b) Perfils allissats.

6.2.3. Altura i longitud de flama

Les dades sobre les dimensions de les flames s'obtenen generalment mitjançant estimacions visuals amb referències –per bé que aquesta és una tècnica força subjectiva– o mitjançant el tractament digital d'imatges enregistrades durant el pas del front –tècnica que permet donar més valors i alhora més precisos.

En aquest cas, l'altura i la longitud de flama es van determinar a partir de l'anàlisi de les imatges enregistrades amb la càmera de vídeo posicionada perpendicularment a l'avanç del front. Per a això fou necessari inicialment digitalitzar les seqüències d'imatges corresponents a cada prova. De la seqüència d'imatges de cada prova es va seleccionar una porció corresponent a la propagació del foc a la franja central del llit, un cop assolit l'estat estacionari. D'aquestes seqüències es van extreure de 10 a 20 imatges per segon, en funció de la velocitat d'avanç del foc, per a ser tractades.

Per a determinar l'altura i la longitud de flama a partir de les imatges seleccionades de cada prova, es va utilitzar l'algoritme '*altura.m*' desenvolupat en *Matlab*[®]. Aquest algoritme es basa en el programa implementat anteriorment a Muñoz (2005) per a determinar de forma semiautomàtica l'altura i longitud de flama en incendis d'hidrocarburs.

Tot i que es va intentar posicionar la càmera de vídeo per a captar el front de flames en un únic pla, les imatges enregistrades presenten certa perspectiva. Per aquest motiu, es decidí determinar l'altura i longitud de flama en cada imatge com l'altura i longitud màximes en la línia central del front de flames (Figura 6.7). A banda, tant l'altura com la longitud de la flama es van mesurar per sobre del llit de combustible. Diversos són els autors que han mesurat l'altura i longitud de la flama sense tenir en

compte el llit per considerar que és aquí on es produeix un despreniment major d'energia tèrmica (Albini, 1981; Dupuy *et al.*, 1998).

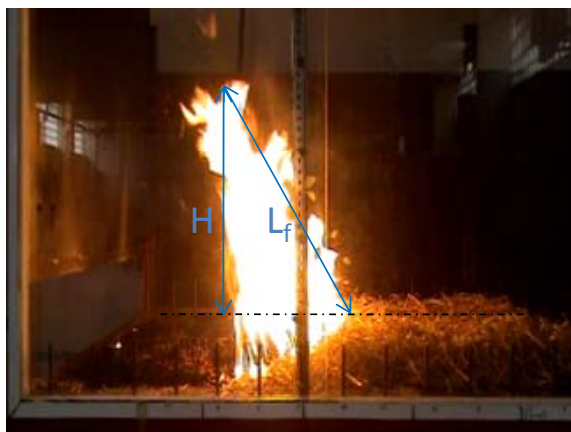


Figura 6.7 Exemple de la determinació de l'altura (H) i la longitud de flama (L_f) a partir d'imatges en una prova del bloc 1.

L'algoritme '*altura.m*' té com a paràmetres d'entrada, les mides horitzontal i vertical del píxel, i les coordenades de l'eix de simetria longitudinal del llit de combustible expressades en píxels. Així, l'usuari ha de determinar inicialment aquests paràmetres.

Les dimensions del píxel foren determinades per als píxels situats al pla en què es mesuraren l'altura i la longitud de la flama, és a dir, al centre del llit de combustible. Per a fer-ho es van considerar les dimensions conegudes d'elements estructurals de les instal·lacions experimentals presents a la imatge. La mida de píxel resulta doncs de dividir la dimensió coneguda en metres, pel nombre de píxels en la imatge. Per tal d'assolir la màxima fiabilitat es realitzaren diverses mesures per a cada seqüència d'imatges. Les coordenades de l'eix de simetria es van extreure a partir de la posició dels pernns a banda i banda de la taula en el cas de les proves del bloc experimental 1, a partir de la posició dels sensors de flux de calor en els blocs experimentals 2 i 3, i a partir de les dimensions del llit per al bloc 4.

El programa '*altura.m*' requereix que l'usuari manualment indiqui la posició de la base i de la punta de la flama per a calcular l'altura i longitud de flama màxima per a cada imatge. Posteriorment, en presenta el valor mitjà per a cadascuna d'aquestes variables, de manera que van ser aquests els valors utilitzats en el càlcul dels nombres adimensionals corresponents.

Cal destacar que per a les proves amb pendent –sèrie P10, P20 i P30– fou necessari modificar lleugerament el programa '*altura.m*', per tal de considerar la inclinació de la superfície d'avanç del foc i determinar així l'altura i la longitud de la flama en funció del sistema de referència format per la superfície d'avanç del foc i l'eix vertical perpendicular a aquesta superfície, tal i com es mostra en la Figura 6.8.

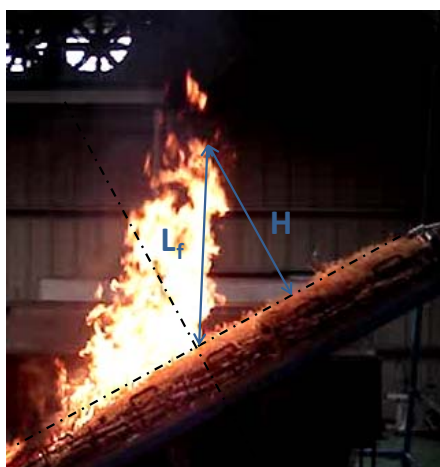


Figura 6.8 Exemple de la determinació de l'altura (H) i la longitud de flama (L_f) a partir d'imatges en una prova de la sèrie experimental P30.

6.2.4. Intensitat de l'incendi

La intensitat de l'incendi fou definida per Byram (1959), com la quantitat de calor alliberada pel front de flames per unitat de temps i de longitud, tal i com s'ha explicat en el capítol 1. Byram (1959) va expressar la intensitat com el producte de la calor de combustió –subjecte a diverses reduccions– per la quantitat de combustible consumit i per la velocitat de propagació. Tanmateix, la interpretació de la variable calor de combustió a utilitzar en el càlcul de la intensitat de l'incendi ha anat sovint precedida de certa controvèrsia que ha derivat en diferents definicions. En aquest estudi, la intensitat de l'incendi es va calcular d'acord a la definició de Byram (1959), seguint les consideracions d'Alexander (1982) per a determinar la calor de combustió. Així, aquesta es va determinar d'acord a la següent expressió (eq. [6.3]), on HY és la calor de combustió o calor alliberada, PCI és el poder calorífic inferior i H_s és la humitat del combustible expressada en tant per cent.

$$HY = PCI - 24 \cdot H_s \quad [6.3]$$

És important remarcar que Alexander (1982) considera que el poder calorífic inferior s'obté a partir del poder calorífic superior menys la calor latent absorbida quan l'aigua de reacció és vaporitzada que té un valor de 1263 kJ/kg (Byram, 1959). En aquest cas es va utilitzar directament el valor del poder calorífic inferior obtingut experimentalment a Pastor (2004).

Pel què fa a la resta de variables que intervenen en el càlcul de la intensitat, la velocitat de propagació i la quantitat de combustible consumida, la primera d'aquestes variables fou determinada tal i com es detalla a l'apartat 6.2.1. En el cas de la quantitat de combustible consumit, la seva determinació depengué del bloc experimental. Per al bloc 1, és a dir, per a les proves realitzades al CERTEC, s'utilitzaren les dades enregistrades pel sistema de pesatge que permeté determinar de forma senzilla i

precisa la quantitat de combustible consumit. Per als blocs experimentals 2 i 3, en què no es va disposar de sistema de pesatge, i en què no es va poder determinar la velocitat de combustió, es varen col·locar safates d'alumini sota el llit de combustible per tal de recollir el residu de cendres després de cada prova. Lògicament, la precisió d'aquestes mesures fou limitada. No obstant, aquest era l'únic mètode disponible per a poder mesurar la quantitat de combustible consumit.

6.2.5. Temps de residència i gruix del front de flames

El temps de residència (t_r) i el gruix del front de flames (S_f) es poden relacionar amb la velocitat de propagació (R) d'acord a la següent expressió:

$$S_f = R \cdot t_r \quad [6.4]$$

Ateses les dificultats observades al intentar determinar el gruix de flama mitjançant les imatges enregistrades amb la càmera de vídeo lateral, es decidí estimar aquesta variable a partir de l'expressió [6.4]. Pel què fa al temps de residència, a continuació de detalla el procediment de càlcul dut a terme per a obtenir el seu valor a partir de les dades experimentals enregistrades pel termoparell situat al llit de combustible.

La Figura 6.9.a, mostra una corba típica de l'evolució de la temperatura en funció del temps enregistrada amb un termoparell situat al llit de combustible. Per a determinar el temps de residència, es calculà el temps en què la flama romania en contacte amb el termoparell. Així, es va considerar que l'instant inicial de contacte entre flama i termoparell quedava definit per un ràpid i sobtat increment de temperatura al voltant dels 500 K, que és aproximadament la temperatura d'ignició del combustible (Grotkjaer *et al.*, 2003). D'altra banda, la pèrdua de contacte entre flama i termoparell es definí com l'instant en què es produí l'últim pic de temperatura significatiu. Per tal de identificar amb més facilitat aquests instants de temps es calculà la derivada de la corba temperatura - temps (Figura 6.9.b).

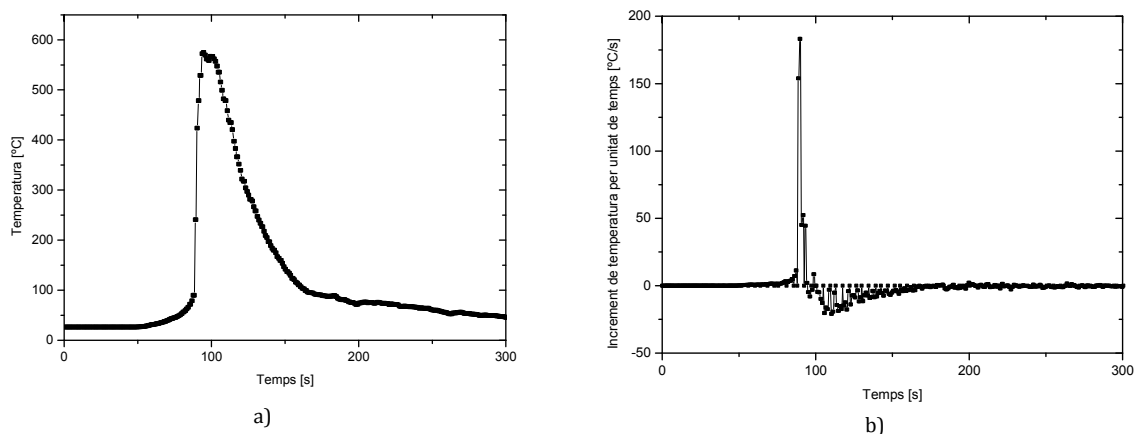


Figura 6.9 a) Evolució de la temperatura al llit en funció del temps. b) Derivada de la corba temps - temperatura.

La determinació del temps de residència i per tant també del gruix de flama només es pogué realitzar per al bloc experimental dut a terme al CERTEC, atès que en la resta de blocs no es pogueren col·locar termoparells.

6.2.6. Velocitat de combustió

La velocitat de combustió només es pogué obtenir per a les proves dutes a terme al CERTEC. Aquesta variable es determinà amb les dades obtingudes a partir de les lectures realitzades per la balança que suporta la superfície de pesatge. La corba de pèrdua de pes es va suavitzar per a eliminar-ne el soroll, calculant el valor mitjà de la massa cada 5 segons. Després es derivà aquesta nova funció, i es calculà el valor mitjà d'aquesta en l'interval de temps en què el foc es propagà per la superfície de pesatge – gràficament l'instant d'entrada i sortida del foc a la superfície de pesatge coincideix amb els canvis de pendent de la corba (Figura 6.10).

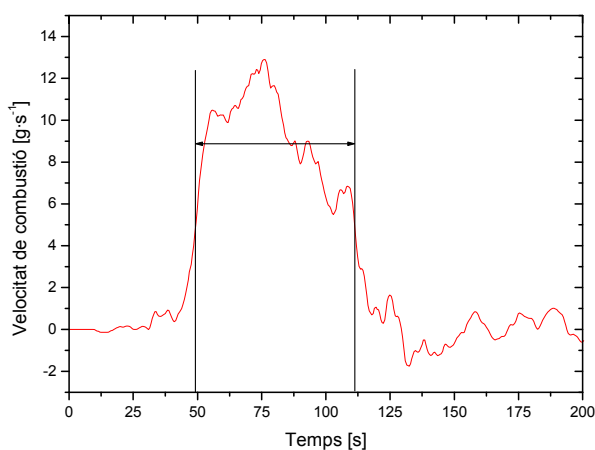


Figura 6.10 Evolució de la velocitat de combustió en funció del temps.

Aquest valor mitjà correspon a la pèrdua de pes expressada en $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$. Tal i com ha estat definida la velocitat de combustió en l'anàlisi, aquesta ve expressada en $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, per tant es dividí el valor anterior per l'àrea en què tingué lloc la combustió activa, és a dir, pel producte de l'amplada del llit i el gruix del front de flames.

6.2.7. Temperatura de la flama

La temperatura de la flama és, certament, una variable difícil de mesurar ja que es caracteritza per les seves grans i ràpides fluctuacions tant en l'espai com en el temps. Les tècniques de mesura utilitzades més freqüentment per a determinar temperatures en aplicacions a altes temperatures i en medis exigents, com és el cas dels incendis forestals, són bàsicament la termografia i els termoparells. La termografia és una tècnica no intrusiva que permet mesurar la distribució de temperatures superficials en una àrea, tal i com ja s'ha anat veient al llarg d'aquest capítol. Per contra, els termoparells són

sensors de mesura per contacte i realitzen mesures puntuals. A Guijarro *et al.* (2006) es pot trobar una àmplia discussió sobre els avantatges i inconvenients de cada mètode en aplicacions en l'àmbit dels incendis forestals.

En l'experimentació de laboratori d'aquesta tesi la termografia es va utilitzar per a determinar la velocitat de propagació, la longitud del front de flames, la longitud de preescalfament i la temperatura superficial del llit. No obstant, la col·locació de la càmera per a poder realitzar totes aquestes mesures no permetia determinar alhora temperatures de flama. A Pérez (2003) es pot trobar més informació sobre les implicacions que té la ubicació de la càmera termogràfica en les mesures que es podran realitzar. Així, per tal de caracteritzar la distribució vertical de temperatures a la flama es van col·locar diversos termoparells a diferents altures (Figura 6.11), en funció de les característiques de les proves (capítol 5). Tal i com s'ha explicat al capítol anterior això només fou possible al bloc experimental realitzat al CERTEC.

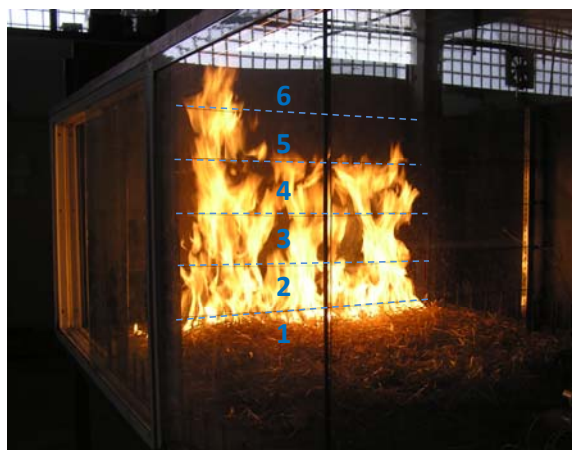


Figura 6.11 Imatge d'una prova on s'indica la disposició dels termoparells.

Tanmateix, cal tenir en compte que els termoparells tenen errors inherents de mesura, deguts al balanç tèrmic entre el flux de calor existent entre la unió del termoparell i la flama, i a la calor que transfereix el termoparell degut a la radiació i conducció del filferro (Walker i Stokes, 1968). A més, els termoparells tenen una certa inèrcia, fet que pot limitar la seva precisió quan s'utilitzen per a la caracterització de fenòmens transitoris com les flames turbulentes dels incendis forestal.

Knight *et al.* (2002), asseveren que la flama esdevé més difusa a mesura que augmenta verticalment la distància entre el punt de mesura i el llit de combustible. Així, com més amunt estigui col·locat el termoparell major serà la influència dels components no reactius en el volum de la flama, i per tant la mesura que realitzaran aquests sensors serà inferior al valor real de temperatura. En aquesta línia, Sullivan *et al.* (2003) confirmen que la zona de reacció de la flama és prima i presenta un règim transitori que fa que la mesura de valors reals de temperatura a les flames, emprant aquests sensors,

sigui una operació complexa. Tant és així, que els termoparell són susceptibles a induir errors, i és difícil determinar què és en realitat el que s'està mesurant. En aquest sentit Gill i Knight (1993) proposen parlar de *temperatura de termoparell*. Així mateix, Cruz (2004) adverteix sobre la relació entre el valor de temperatura obtingut i el sistema de mesura emprat i, per tant sobre la prudència amb la que s'ha de procedir al interpretar els valors numèrics de temperatura. Atès que no és objecte d'aquesta tesi realitzar un estudi comparatiu de temperatures amb altres sistemes de mesura i/o fonts bibliogràfiques es cregué convenient utilitzar els termoparells com a sensors de mesura de la temperatura de la flama, entenent que l'error comès seria semblant en tots els casos.

La Figura 6.12 mostra un exemple de les dades enregistrades pels termoparells en el transcurs d'una prova. Cal notar que a aquesta figura no han estat representades les dades corresponents al termoparell que es situà a l'interior del llit.

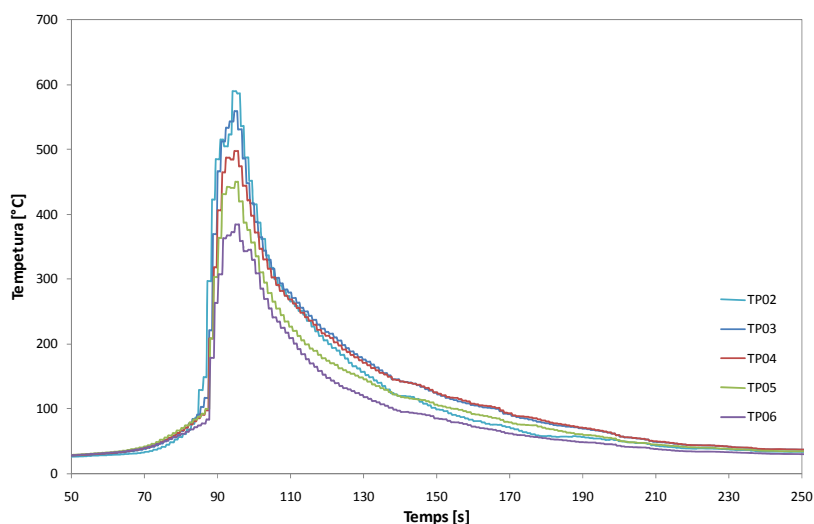


Figura 6.12 Evolució de la temperatura enregistrada pels termoparells en funció del temps.

De les corbes temperatura - temps es va definir la temperatura de la flama a les diferents altures com el valor màxim enregistrat per cadascun dels termoparells. En l'apartat 6.2.5 s'ha explicat el criteri per a determinar els instants en què la flama entra en contacte i perd aquest contacte amb el termoparell. Per tant, també s'hagués pogut determinar la temperatura de la flama a una determinada altura com la mitjana dels valors enregistrats en aquest interval de temps. Tanmateix, es preferí assimilar la temperatura de flama a la temperatura màxima enregistrada pel termoparell al considerar la inèrcia i el temps de resposta d'aquests sensors. A més, el fet de determinar una variable mitjançant la determinació d'una altra variable pot derivar en una indesitjable acumulació d'errors de mesura. A banda, el valor màxim de temperatura es pot relacionar amb la màxima calor alliberada i per tant amb una situació de major risc. A més a més, com es veurà més endavant, la temperatura dels gasos també es va definir com el valor màxim.

Per al càlcul de nombres adimensionals i la validació de les lleis d'escala va ser necessari definir encara un altre criteri per a establir un únic valor de temperatura de flama per a cada prova. Per a això es decidí utilitzar, per a cada escala, la temperatura de la flama mesurada a 8 cm de la superfície del lit de combustible. Com que l'altura d'aquest varia d'una escala a una altra, això fa que l'altura respecte de la superfície de la taula variï d'una escala a una altra. A la Taula 6.2 es descriu per a cada escala experimental l'altura de mesura respecte de la superfície de la taula, i el nom del corresponent termoparell situat en aquesta posició.

Taula 6.2 Altura a la que es va determinar la temperatura de la flama.

Altura dels termoparells respecte de la superfície de la taula [cm] / Número de termoparell		
W25	W50	W100
10 (TP3)	12 (TP4)	16 (TP2)

6.2.8. Flux de calor – poder emissiu de les flames

Tal i com s'ha detallat al capítol 5, en els diferents blocs experimentals es van col·locar diversos sensors de flux de calor, a excepció del bloc 4. No obstant, per a aquest treball només s'han analitzat les dades corresponents a les proves desenvolupades a la instal·lació del CERTEC, és a dir, al bloc experimental número 1. En aquestes proves, s'empraren 3 sensors per a mesurar respectivament el flux de calor rebut pel combustible situat per davant del front de flames, el flux de calor emès pel front de flames i el poder emissiu del front. La Figura 6.13, mostra un exemple de les mesures obtingudes amb aquests tres sensors durant el decurs d'una prova, de manera que es pot observar l'evolució en el temps dels diferents fluxos de calor mesurats i del poder emissiu.

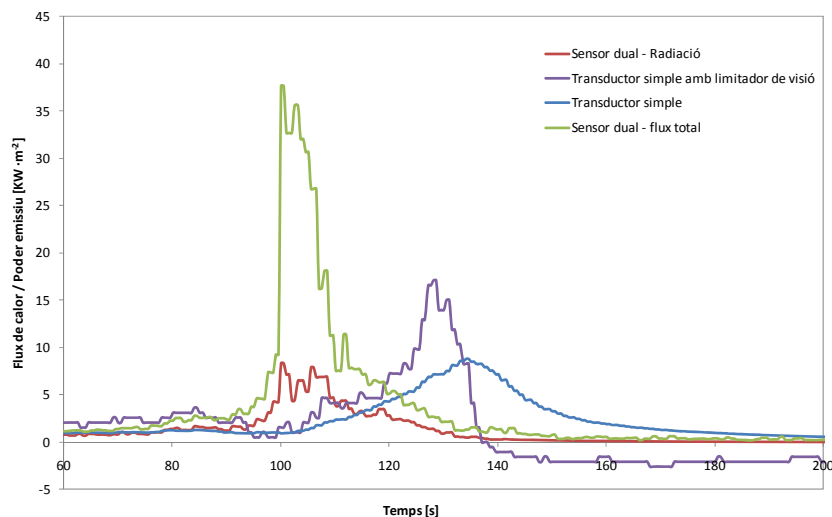


Figura 6.13 Evolució en funció del temps del flux de calor o poder emissiu enregistrat pels diferents sensors de flux de calor (prova W_100_R5).

L'anàlisi de la informació enregistrada per aquest tipus de sensors és certament complexa (Cruz, 2004). El flux de calor mesurat és el resultat dels processos químics i físics que determinen les característiques del foc com per exemple la velocitat de producció i quantitat de volàtils, com i quan aquests volàtils reaccionen amb l'oxigen, i eventualment de la mida de les flames. D'aquesta manera, les mesures realitzades són molt sensibles a petites variacions en el posicionament del sensor, que pot provocar canvis molt importants en el seu camp de visió. A banda, en el cas del sensor dual ubicat al llit de combustible les turbulències creades pel foc propiciaren l'acumulació de partícules a les finestres del sensor, fet que pot alterar la mesura realitzada pel sensor, en relació a la que es faria si la finestra estigués neta.

Per altra part, de les mesures realitzades, fou necessari determinar-ne un únic valor representatiu per a l'anàlisi dimensional. En aquest sentit, Cruz (2004) va dur a terme un estudi amb diferents valors característics obtinguts a partir de les mesures obtingudes amb sensors de flux de calor col·locats a diferents altures en diverses proves realitzades a camp, de manera que calculà el flux de calor màxim instantani, el flux de calor acumulat fins al pic màxim i el flux de calor total acumulat, entre d'altres. A partir d'una anàlisi estadística per a determinar la correlació entre aquests paràmetres i paràmetres relacionats amb el combustible i les condicions ambientals, no arribà a cap resultat concloent quant al paràmetre més representatiu, ja que en funció de la disposició del sensor variava la seva correlació amb els diferents paràmetres analitzats.

Així, per a l'anàlisi dimensional es decidí determinar el flux de calor emès per les flames a partir del valor màxim mesurat pel transductor simple 64-2-16, disposat perpendicularment al front de flames.

6.3. Variables característiques del llit de combustible

Les variables característiques del llit de combustible es poden dividir entre les que foren variables de disseny i que per tant foren fixades prèviament a les proves, i la resta de variables. Entre les variables de disseny s'hi troben la càrrega de combustible, l'altura del llit, la densitat aparent del llit i el pendent de la superfície per on propaga el foc. D'aquestes, l'altura del llit, tot i que estava fixada prèviament de forma teòrica, també fou mesurada per tal de determinar-ne la desviació respecte del seu valor teòric. El valor mesurat també s'utilitzà per recalculer el valor de la densitat aparent del llit. De la resta de variables característiques del llit de combustible, la humitat fou mesurada directament mitjançant un analitzador d'humitat. Pel que fa a la longitud de preescalfament, la temperatura del llit de combustible i el coeficient de convecció a la superfície del llit, només es varen determinar per a les proves realitzades al CERTEC -bloc 1. La metodologia d'obtenció d'aquestes variables es descriu a continuació, ja que requerí del tractament de les imatges termogràfiques en els dos primers casos, i en el darrer de l'aplicació d'una correlació extreta de la bibliografia.

6.3.1. Longitud de preescalfament del llit de combustible

La longitud de preescalfament del llit de combustible es va determinar a partir de les imatges captades amb la càmera termogràfica. Per fer-ho es formularen les següents hipòtesis:

- El llit de combustible és opac a la radiació.
- Les partícules que configuren el llit són cossos grisos amb una emissivitat de 0.9.
- En el camí òptic de la radiació emesa pel llit de combustible i captada per la càmera termogràfica, no es produeixen interferències per la presència de fum o flames.

Per a determinar la longitud de preescalfament es va utilitzar part de l'algoritme '*velocitat.m*' desenvolupat per a calcular la velocitat de propagació perquè el fonament dels càlculs a realitzar és el mateix. Aquest programa determina la posició del front de flames a partir d'un valor llindar de temperatura establert per l'usuari. D'aquesta manera, si s'introdueix un altre valor de temperatura es pot determinar la posició de la isolínia de punts que tenen aquesta temperatura. Per tant, fou necessari establir un criteri o valor llindar de temperatura per a definir el límit de la franja de llit de combustible preescalfada pel front de flames. Intuïtivament, una temperatura superior a la temperatura ambient estaria indicant l'inici de la franja de llit preescalfada, tanmateix, atès al mode d'operació de la càmera termogràfica en rangs de temperatura, no fou possible detectar temperatures a aquest nivell garantint la fiabilitat de la mesura. Així, es va realitzar una petita anàlisi a partir de diferents valors de temperatura llindar. Els valors utilitzats foren 0,1, 0,07, 0,03 i 0,01, expressats en forma normalitzada, que corresponen aproximadament a valors de temperatura de 393 K, 373 K, 338 K i 323 K, ja que cal recordar que la temperatura normalitzada depèn de la temperatura màxima i de la temperatura mínima de cada imatge (eq. [6.1]). La Figura 6.14 mostra un exemple de la distribució de les isolínies de temperatura normalitzada en la superfície del llit per a un determinat instant en el desenvolupament d'una prova en l'escala W100 (prova W_100_R1).

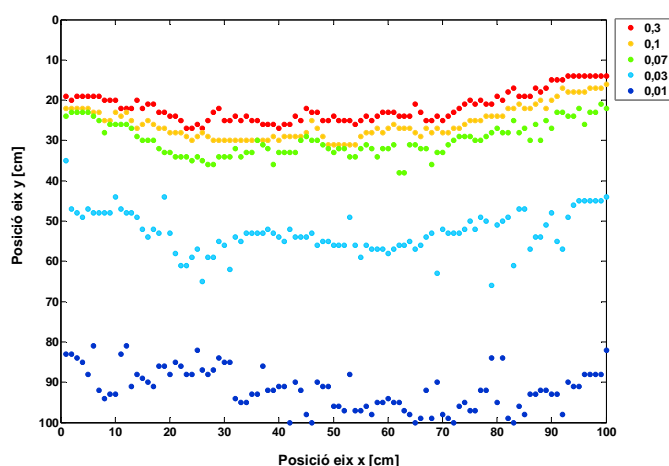


Figura 6.14 Representació de la posició de les diferents isoterms sobre la superfície del llit (prova W_100_R1).

Per a cada instant de temps s'enregistrà la posició més avançada del front de flames i de les isolínies de temperatura normalitzada estudiades. A partir d'aquestes dades es determinà la distància entre el front de flames i les diferents isoterms per a cada instant de temps (Figura 6.15). Finalment es calculà la distància mitjana entre el front de flames i les diferents isoterms en l'interval de temps en què aquesta es mantingué constant, és a dir, descartant els valors inicials i finals corresponents a estats transitoris de la propagació del front de flames.

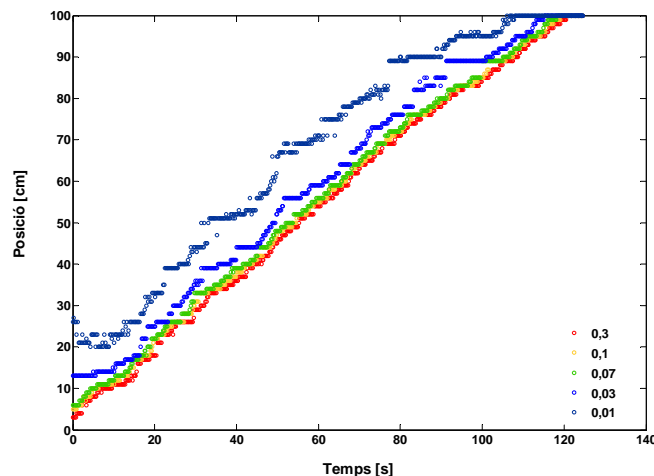


Figura 6.15. Posició del front de flames i les isoterms d'estudi en funció del temps (prova W_25_R1).

Aquest càlculs es realitzaren per a proves de diferents característiques, però que tingueren lloc en condicions ambientals semblants de manera que el combustible presentava valors d'humitat iguals a l'inici de l'assaig, 5,14% en base seca (vegeu Annex II). A la taula següent (Taula 6.3) es resumeixen les principals especificacions i condicions ambientals de les proves utilitzades per a dur a terme aquesta anàlisi.

Taula 6.3 Especificacions i condicions ambientals de les proves analitzades.

Nom prova	Amplada del llit [cm]	Càrrega de combustible [kg pes sec/m ²]	Altura llit combustible [cm]	Temperatura ambient [K]	Humitat relativa [%]
W_100_R1	100	0,60	8	293	55
W_50_R1_v2	50	0,30	4	294	57
W_25_R1	25	0,15	2	296	52

La Figura 6.16 recull els resultats de les proves analitzades, de manera que s'hi representa la distància del front de flames a les diferents isoterms. Per a les proves corresponents a les escales W50 i W100 – W_50_R1_v2 i W_100_R1 – no ha estat representat el punt corresponent a la temperatura normalitzada 0,01, ja que des de l'inici d'ambdues proves la isoterma associada a aquesta temperatura es trobava pràcticament al final del llit de combustible.

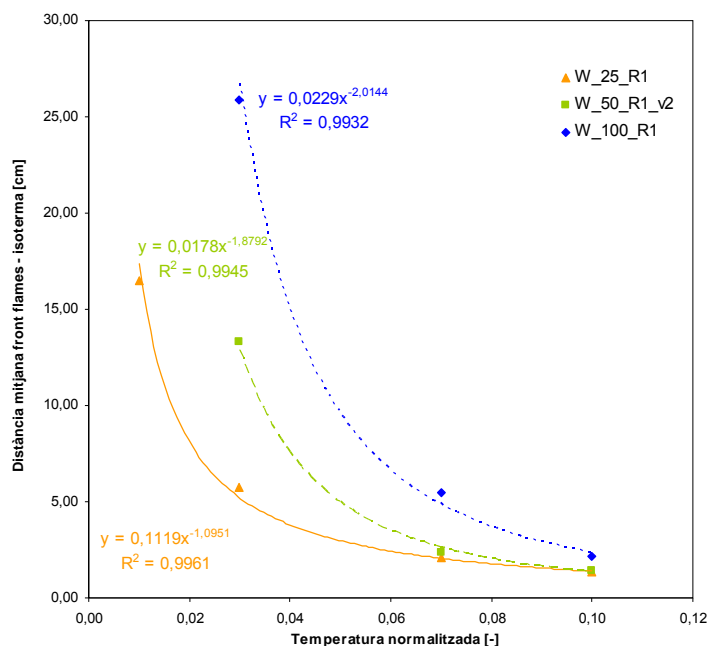


Figura 6.16. Distància mitjana entre el front de flames i les isoterms estudiades per als assaigs analitzats.

El gràfic anterior mostra com per a temperatures normalitzades de l'ordre de 0,1 la porció de llit escalfada pel front de flames és pràcticament igual per a totes les proves. No obstant, a mesura que s'analitza el comportament per a temperatures menors, la diferència entre les proves esdevé significativa. A partir d'aquests resultats es decidí determinar la longitud de preescalfament com la distància entre el front de flames i la isoterma de temperatura normalitzada igual a 0,03, uns 338 K, ja que permetia observar diferències entre les diferents escales experimentals.

6.3.2. Temperatura del llit del combustible

La temperatura del llit de combustible es va determinar a partir de les imatges termogràfiques. Per tant correspon a una temperatura superficial. Aquesta variable està lligada a l'anterior, perquè la temperatura del llit de combustible es va definir com la temperatura en la franja de llit preescalfada pel front de flames. Evidentment, la temperatura del llit en aquesta franja no té un valor constant, sinó que varia en cada punt, segons la distància al front de flames i el factor de vista. Atès que per al càlcul dels nombres adimensionals cal determinar un únic valor per a cada variable, es va calcular la temperatura mediana en aquesta franja. Es decidí calcular la mediana, perquè reflexa millor la distribució de temperatures en aquesta part del llit d'acord a les diferents proves i permet observar diferències segons les especificacions dels diferents assaigs.

Així, es va implementar un algoritme, '*temp_s.m*', per a realitzar aquest càlcul. Aquest programa determina per a cada instant de temps la temperatura mediana de la part de llit no cremada compresa

entre el front de flames i la isoterma corresponent a la temperatura llindar utilitzada en el càlcul de la longitud de preescalfament. A partir d'aquests valors, es torna a calcular la mediana per al interval de temps en què les temperatures es mantenen constants (Figura 6.17).

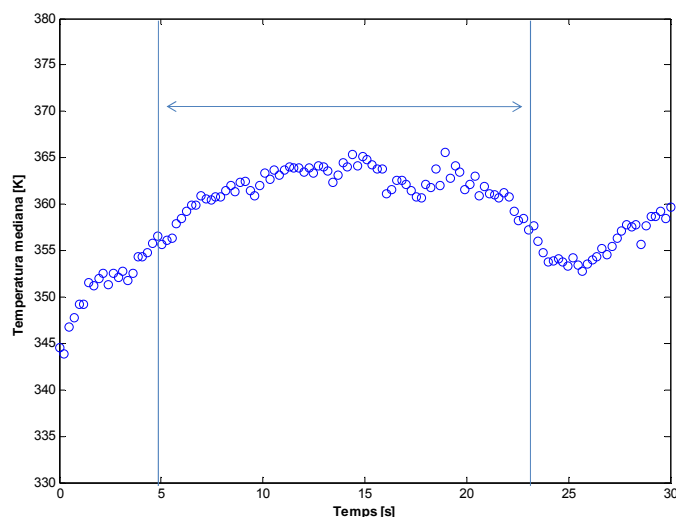


Figura 6.17 Evolució de la temperatura del llit de combustible (prova W_100_R5).

6.3.3. Coeficient de convecció a la superfície del llit

El coeficient de convecció s'obté generalment mitjançant la correlació de resultats experimentals obtinguts en diferents condicions emprant l'anàlisi dimensional (Brodkey i Hershey, 1988) per a obtenir models empírics que permetin calcular aquest coeficient. Aquests models empírics relacionen el nombre de Nusselt (Nu), que conté el coeficient de convecció, amb altres nombres adimensionals coneguts com el nombre de Reynolds (Re), Prandtl (Pr) o Grashof (Gr).

Els tipus de correlacions entre aquests nombres depenen de les condicions predominants a l'incendi. Això vol dir que en una situació de convecció lliure o natural, és a dir, un incendi on el vent predominant té una velocitat molt baixa o que pot considerar-se nul·la i que el moviment del fluid es deu a la diferència de temperatures, el nombre de Nu dependrà d'una forma molt important del nombre de Gr que és el que contempla la transferència de calor per l'empenta que tenen els gasos en tenir diferents densitats; mentre que, en una situació de convecció forçada, és a dir, d'elevada velocitat del vent, el nombre de Nu dependrà fortament del nombre de Re que és el que contempla els efectes de les forces de moviment o cinètiques.

L'interès en la determinació del coeficient de convecció en els incendis forestals es troba sovint lligada a la intervenció d'aquest coeficient en models de propagació. En funció de les hipòtesis de cada model i de les zones considerades en la transferència de calor -zona de combustió, flames, brases i/o

combustible no cremat-, es poden determinar diversos coeficients de convecció (a la superfície del llit no cremat, a l'interior del llit de combustible, etc.). A la bibliografia únicament s'ha trobat un treball en què es determini de forma experimental el coeficient de convecció, Mendes-Lopes *et al.*, 2002. D'aquest treball en deriva una relació empírica entre el nombre de Nu i el nombre de Re obtinguda en condicions de convecció forçada en matrius d'agulles de pi. En general, la majoria de models que incorporen aquest coeficient utilitzen correlacions establertes per a cilindres o esferes en llits empaquets, ja que sovint calculen el coeficient de convecció a l'interior del llit (Linn, 1997; Dupuy i Larini, 1999; Morvan i Dupuy, 2004).

Atès que per a condicions de convecció lliure -condicions en què tingueren lloc les proves del CERTEC, no es coneixen correlacions pròpies de llits de combustibles vegetals, aquest coeficient es determinarà a partir de les correlacions empíriques proposades a Incropera i DeWitt (2002) per a flux extern. De forma general, en condicions de convecció lliure, el nombre de Nu es calcula en funció del nombre de Rayleigh (Ra), que és equivalent al producte del nombre de Pr pel nombre de Gr (eq. [6.5] i eq. [6.6]).

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k_a} = C \cdot Ra^n \quad [6.5]$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_p - T_a) \cdot L^3}{\alpha_t \cdot \vartheta} \quad [6.6]$$

On:

h_c	Coeficient de convecció [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
k_a	Conductivitat tèrmica de l'aire [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
L	Longitud característica [m]
C	Constant que cal determinar experimentalment [-]
n	Constant que cal determinar experimentalment [-]
g	Acceleració de la gravetat [$m \cdot s^{-2}$]
β_a	Coeficient d'expansió tèrmica de l'aire [K^{-1}]
T_p	Temperatura de la paret o superfície [K]
T_a	Temperatura ambient [K]
α_t	Difusivitat tèrmica [$m^2 \cdot s^{-1}$]
ϑ	Viscositat cinemàtica [$m^2 \cdot s^{-1}$]

En les expressions anteriors les propietats termodinàmiques s'han d'avaluar a la temperatura de film (T_{film}) que es defineix com:

$$T_{film} = \frac{T_p + T_a}{2} \quad [6.7]$$

En el cas concret d'una placa plana en què la cara superior es troba a una temperatura més elevada que la de l'ambient, el nombre de Nu es calcula amb la següent equació (eq. [6.8]):

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad [6.8]$$

Per a realitzar aquest càlcul es va considerar com a temperatura de paret (T_p), la temperatura de la superfície del llit (T_s) i com a longitud característica del sistema (L), la longitud de preescalfament (l_s).

6.4. Variables característiques dels gasos o plomall

Les variables seleccionades per descriure el plomall foren la temperatura, la velocitat, la viscositat, la densitat, la conductivitat tèrmica i el coeficient d'expansió dels gasos de combustió. Les dues primeres variables es varen determinar segons les metodologies descrites a continuació en els apartats 6.4.1 i 6.4.2, respectivament. Pel què fa a la resta de variables, viscositat, densitat, conductivitat tèrmica i coeficient d'expansió, no es van poder mesurar directament, ja que en cap cas es disposà dels mitjans i equips necessaris per a realitzar aquestes mesures. Així es van estimar a partir de les taules de Incropera i DeWitt (2002) per a aire sec, utilitzant la temperatura dels gasos prèviament determinada. Es varen emprar les taules d'aire sec, perquè tal i com s'ha explicat als capítols 3 i 4, es va considerar que les reaccions exotèrmiques degudes a l'oxidació del combustible pirolitzat tenien lloc únicament a la flama.

6.4.1. Temperatura dels gasos

La temperatura dels gasos es va definir com la temperatura a l'inici del plomall, que es correspon amb la temperatura a la punta de la flama. Tal i com ja s'ha vist en l'apart 6.2.7, la mesura de temperatures a la flama és una tasca complexa, tenint en compte la naturalesa i l'evolució oscil·latòria de les flames difusives. Per tal de determinar la distribució de temperatures a la flama, es va col·locar tal com ja s'ha explicat anteriorment una malla vertical de termoparells (capítol 5). Evidentment, amb aquestes mesures no va ser possible determinar directament la temperatura a la punta de la flama, ja que la posició en què es col·locaren els termoparells i per tant l'altura a la que es realitzaren les mesures no necessàriament va coincidir amb la punta de la flama. Tanmateix, aquests valors es varen utilitzar per a modelitzar el comportament de la temperatura en funció de l'altura i poder estimar així la temperatura a la punta de la flama.

Existeixen diversos models que descriuen la variació de la temperatura de la flama i/o del plomall en funció de l'altura, com per exemple, Dupuy *et al.* (2003), Morandini *et al.* (2002a) o Weber *et al.* (1995). Els dos primers models, que es basen en el model de McCaffrey (1979), relacionen la temperatura amb l'altura normalitzada, essent aquesta l'altura de mesura entre una altura característica determinada a partir de la calor alliberada per les flames. D'altra banda, el model de Weber *et al.* (1995) és una aproximació més senzilla en què relaciona directament l'increment de temperatura màxima amb l'altura de mesura. Tots tres treballs es caracteritzen perquè la seva formulació és diferent segons la

zona de la flama en què es vulgui modelitzar la temperatura, de manera que distingeixen entre la flama persistent, la flama intermitent i el plomall.

D'entre aquests models es va escollir el model de Weber *et al.* (1995) per la seva simplicitat i per la facilitat per ajustar-lo a les dades disponibles. Tot seguit es descriu més en detall aquest model.

Weber *et al.* (1995) proposaren un model de tres regions per a descriure la temperatura màxima a la flama i el plomall en funció de l'altura (z). A partir de dades obtingudes experimentalment en proves realitzades en vegetació arbustiva de 0,5 a 2,0 metres d'altura, observaren que al representar gràficament l'increment de temperatura màxima respecte de la temperatura ambient segons l'altura a la que es duagué a terme la mesura, obtenien el mateix patró de comportament en tots els casos (Figura 6.18).

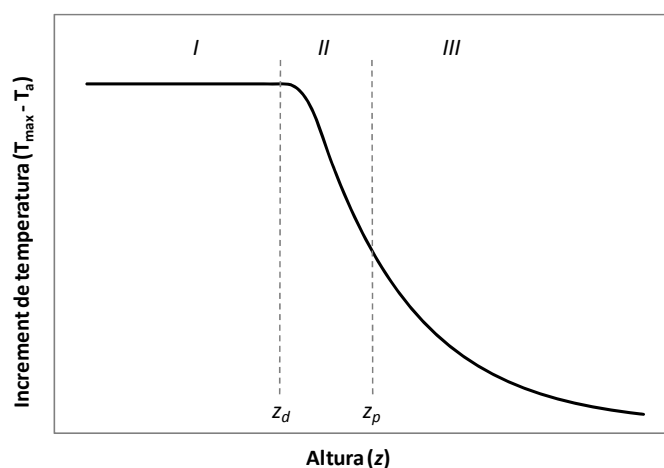


Figura 6.18 Corba típica de l'increment de temperatura en funció de l'altura (Weber *et al.*, 1995).

D'acord a la Figura 6.18, el comportament de l'increment de temperatura segons l'altura es pot dividir en tres regions (I, II i III). La regió I representa la zona on té lloc la combustió del material sòlid. En la regió II, la mescla de gasos es barreja amb l'aire i la temperatura decreix exponencialment seguint una distribució Gaussiana, característica d'un procés de reacció - difusió. Per últim, la regió III correspon al plomall. Les equacions del model de Weber *et al.* (1995) per a cada regió es presenten a continuació:

$$\Delta T^I = K_w \quad (0 \leq z \leq z_d) \quad [6.9]$$

$$\Delta T^{II} = K_w \cdot e^{-\alpha_w \cdot (z-z_d)^2} \quad (z_d \leq z \leq z_p) \quad [6.10]$$

$$\Delta T^{III} = C_w/z \quad (z \geq z_p) \quad [6.11]$$

On K_w , C_w , α_w , z_d , z_p són constants que cal determinar. Per tal de reduir el nombre de paràmetres a ajustar en el model, Weber *et al.* (1995) expressaren C_w i α_w en funció de K_w , z_d i z_p imposant que

l'increment de temperatura i el gradient de temperatura fossin continus en els límits entre dues regions (eq. [6.12] i eq. [6.13]).

$$C_w = K_w \cdot z_p \cdot e^{-\alpha \cdot (z - z_d)^2} \quad [6.12]$$

$$\alpha_w = \frac{1}{2 \cdot z_p \cdot (z_p - z_d)} \quad [6.13]$$

D'aquesta manera, el model de Weber *et al.* (1995) està subjecte a la determinació de les constants K_w , z_d i z_p . Els autors donaren pautes de com definir aquestes constants segons el seu possible significat físic, tot i que no foren massa concisos. Així, consideraren que la constant K_w corresponia a la màxima temperatura assolida, mentre que z_d i z_p probablement corresponien a l'altura del llit o zona de flama persistent, i a l'altura de les flames en la regió intermitent, respectivament.

Per tant, per tal d'ajustar aquest model a les dades disponibles de cada prova de la sèrie C0 i determinar posteriorment mitjançant el model la temperatura dels gasos, es varen haver de fixar els valors de K_w , z_d i z_p . Per a això, es segueixen les directrius proposades per Weber *et al.* (1995). En conseqüència la constant K es va definir com la temperatura màxima mesurada pel termoparell situat a l'interior del llit de combustible i z_d com l'altura del llit de combustible. Pel què fa a la constant z_p , aquesta es va fixar com la meitat de l'altura de la flama, mesurada aquesta des de la base del llit de combustible. Per tant, als valors d'altura de flama obtinguts mitjançant la metodologia descrita a l'apartat 6.2.3, se'ls va addicionar la corresponent altura del llit.

La Figura 6.19 i la Figura 6.20 mostren la bondat entre el model obtingut segons els criteris anteriors i les temperatures mesurades amb els termoparells per a proves realitzades a dues escales diferents, W100 i W25 respectivament.

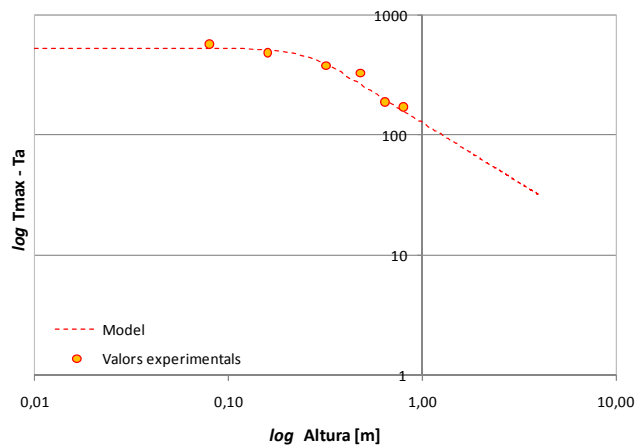


Figura 6.19 Increment de temperatura en funció de l'altura (prova W100_R3).

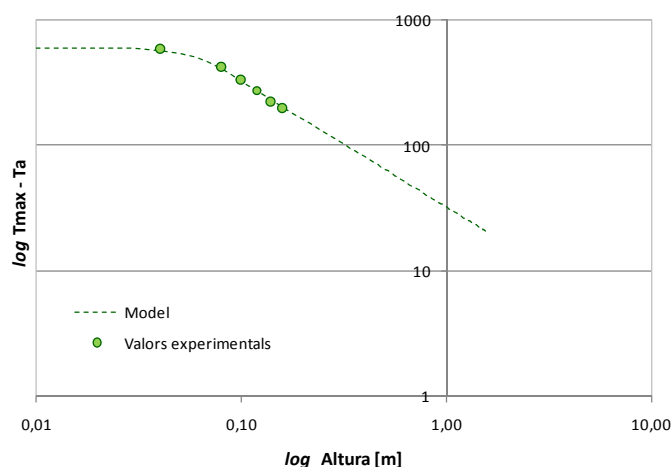


Figura 6.20 Increment de temperatura en funció de l'altura (prova W25_R3_2).

Una vegada obtingut el model experimental d'increment de temperatura en funció de l'altura per a cada prova, es va determinar la temperatura dels gasos com la temperatura a la punta de la flama d'acord a l'altura de flama mesurada en cada prova (apartat 6.2.3).

Els valors calculats de la temperatura dels gasos variaren entre 706 K i 797 K, essent els valors mitjans per a les escales W100, W50 i W25 iguals a 767 K, 750 K i 738 K, respectivament. Aquests valors concorden amb els valors experimentals de la bibliografia com 773 K (Thomas, 1963) o 723 K (Dupuy *et al.*, 2003).

6.4.2. Velocitat dels gasos

La velocitat dels gasos és una de les variables físiques que descriu el comportament fluidodinàmic d'un incendi. El flux en un incendi forestal es caracteritza per la seva turbulència, reactivitat i intermitència. És precisament la seva complexa naturalesa el que dificulta la mesura de la velocitat. Una de les tècniques més utilitzades per a determinar la velocitat dels gasos ha estat la correlació creuada de fluctuacions tèrmiques (Cox, 1977), ja que és una solució de compromís entre simplicitat i cost. Aquesta tècnica es basa en la mesura de la temperatura, normalment mitjançant termoparells, en dos punts del flux per tal d'establir el temps de trànsit d'una fluctuació tèrmica entre aquests punts. No obstant, en els darrers anys han sorgit altres tècniques no intrusives per a mesurar la velocitat dels gasos com la velocimetria làser Doppler (Dupuy *et al.*, 2006) o el processament d'imatges tèrmiques o *TPIV* (Zhou, *et al.*, 2003).

En el decurs de l'experimentació duta a terme en aquesta tesi, no es va poder disposar d'equips amb les especificacions necessàries per a poder determinar aquesta variable. Per exemple, per a la tècnica de la correlació creuada de fluctuacions tèrmiques és necessari utilitzar termoparells amb un diàmetre suficientment petit de manera que la seva inèrcia permeti detectar les fluctuacions de temperatura. A

més, és necessari també que la freqüència de mesura sigui prou elevada. Dupuy *et al.* (2003) varen utilitzar aquest mètode per a determinar la velocitat dels gasos en proves de laboratori de focs estàtics en llits circulars d'agulles de pi i també d'encenalls de pi (*Pinus pinaster*). Per a això, varen utilitzar termoparells amb un diàmetre de 50 μm i realitzaren mesures amb una freqüència de 200 Hz. En un treball posterior (Dupuy *et al.*, 2006), incrementaren la freqüència de mostreig del senyal enregistrat pels termoparells fins a 800 Hz. Aquests valors difereixen força de les especificacions dels termoparells disponibles (1 mm de diàmetre) durant l'experimentació d'aquesta tesi i amb la freqüència d'adquisició de les dades (5 Hz).

Així, es va decidir estimar la velocitat dels gasos en fronts de flama bàsics a partir de la correlació proposada a Raupach (1990) per a determinar la velocitat dels gasos en el plomall per a una font lineal (Eq. [6.14]):

$$u_g = 1,66 \cdot B^{1/3} \quad [6.14]$$

$$B = \frac{g \cdot l}{c_{pa} \cdot \rho_a \cdot T_a} \quad [6.15]$$

On:

u_g	Velocitat dels gasos [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
B	Empenyiment aerostàtic [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-3}$]
l	Intensitat del front de flames [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$]
g	Acceleració de la gravetat [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
c_{pa}	Capacitat calorífica de l'aire [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ρ_a	Densitat de l'aire [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
T_a	Temperatura ambient [K]

D'acord amb les equacions anteriors, en el cas d'una font lineal la velocitat no depèn de l'altura a la que es realitzi la mesura. Això en certa forma va facilitar la determinació de la velocitat dels gasos, ja que d'aquesta manera no fou necessari fixar a quina altura fer la mesura en cada escala experimental, fet que alhora hagués introduït una nova variable en l'anàlisi dimensional. A banda, és important ressaltar que Dupuy *et al.* (2006) arribaren també a la conclusió de que la velocitat mitjana del flux no variava amb l'altura en un ampli rang de mesura, a partir de dades experimentals extretes de focs en llits de combustible vegetal (agulles de pi, *Pinus pinaster*), en absència de vent i pendent. La coincidència en les conclusions de l'estudi de Dupuy *et al.* (2006) amb les derivades teòricament del treball de Raupach (1990) va refermar l'ús de l'equació [6.14] per a estimar la velocitat dels gasos en les proves de laboratori.

Tot i així, una vegada determinada la velocitat del flux per a les proves del bloc experimental C0, és a dir, per als assaigs realitzats al CERTEC, es va verificar que l'ordre de magnitud dels valors calculats fos

coherent amb els de Dupuy *et al.* (2006). La Taula 6.4 presenta el rang de velocitats obtingut en cada escala experimental.

Taula 6.4. Rang de valors de la velocitat dels gasos per les diferents escales (bloc C0).

Escala experimental	Càrrega de combustible [kg·m ⁻²]	u_g [m/s]
W25	0,15	0,39 - 0,57
W50	0,30	1,77 - 1,82
W100	0,60	2,54 - 2,83

Dupuy *et al.* (2006) determinaren per a focs estàtics en llits circulars d'agulles de pi (*Pinus pinaster*) amb una càrrega d'1 kg/m², una velocitat mitjana del flux de 3 m/s, amb una desviació estàndard d'1 m/s, tant en la zona persistent i intermitent de la flama, com en l'inici del plomall. A més, en un front propagant-se en un llit amb el mateix combustible i càrrega que els anteriors, obtingueren una velocitat mitjana de 2,2 m/s en la zona del plomall. Per altra banda, en el treball de modelització presentat a Morandini *et al.* (2001a) es proposa que per a cada tipus de combustible i càrrega li correspon un valor determinat de velocitat dels gasos. Per tant, es pot concloure que els valors calculats són coherents amb els valors numèrics i indicacions trobats a la bibliografia.

Com a resum doncs, d'acord a les equacions [6.14] i [6.15], únicament foren necessàries propietats termodinàmiques de l'aire ambient i la intensitat del foc per a determinar la velocitat del flux. La metodologia d'obtenció d'aquestes variables es descriu als apartats 6.5 i 6.2.4, respectivament.

6.5. Variables característiques de l'entorn

Les variables característiques de l'entorn fan referència a les propietats físiques i tèrmiques de l'aire ambient. De totes les variables que es varen seleccionar per a caracteritzar l'entorn, únicament es van mesurar directament la temperatura i la humitat relativa, mitjançant un termohigròmetre. Pel què fa a les variables capacitat calorífica, densitat, conductivitat tèrmica, coeficient d'expansió i viscositat, es van obtenir a partir de les taules per aire sec de Incropera i DeWitt (2002), utilitzant el valor de temperatura mesurat. Per últim, la velocitat d'arrossegament i la velocitat del vent requeriren un procés més laboriós per a la seva determinació, de manera que en els següents apartats es descriu la metodologia d'obtenció d'aquestes variables.

6.5.1. Velocitat de l'aire induïda pel foc

La velocitat de l'aire induïda pel foc és aquella que té lloc per l'efecte de succió del front de flames. Actualment s'utilitzen tècniques com la velocimetria làser Doppler o el processament d'imatges tèrmiques o *TPIV* per a la determinació d'aquesta variable, tot i que també es pot mesurar amb sondes tipus Pitot, Prandtl o anemòmetres de fil calent. No obstant, a la bibliografia no s'han trobat treballs en

aplicacions d'incendis forestals en què es mesuri experimentalment aquesta variable. Per contra, sí que es poden trobar diversos treballs en altres tipus d'aplicacions d'incendis (Tieszen, 2001).

Al llarg de l'experimentació de laboratori duta a terme en aquesta tesi no es va poder disposar dels sensors necessaris per a determinar aquesta variable, de manera que es va estimar a partir de l'equació que Nelson (2003) proposà per a determinar la velocitat d'arrossegament (eq. [6.16]).

$$u_a = \phi \cdot u_g + \beta \cdot u_w \quad [6.16]$$

On u_a és la velocitat d'arrossegament, u_g la velocitat dels gasos, u_w la velocitat del vent; i ϕ i β dos constants d'arrossegament. Cal esmentar que la notació utilitzada en aquesta equació ha estat modificada respecte a la notació original emprada per Nelson (2003) per tal de mantenir la coherència amb la notació de tota la tesi i evitar així confusions.

En absència de vent, l'equació [6.16] es redueix al supòsit d'arrossegament (Morton *et al.*, 1956), que especifica que la velocitat d'arrossegament és proporcional a la velocitat al centre del plomall. Així, per al càlcul d'aquesta variable en les proves del bloc experimental 1, es va determinar a partir de l'equació [6.16] reduïda per l'absència de vent i que per tant assolí l'expressió següent:

$$u_a = \phi \cdot u_g \quad [6.17]$$

El valor de la constant d'arrossegament ϕ es va considerar igual a 0,16 d'acord al treball de Lee i Emmons (1961). Aquest és l'únic treball trobat a la bibliografia en que es determina experimentalment aquesta constant. Així que es va decidir utilitzar aquest valor, tot i que les mesures es realitzaren en un front lineal de flames d'alcohol metílic.

6.5.2. Velocitat del vent

La velocitat del vent va ser una variable de disseny en el bloc experimental 3 (sèries, U1, U2 i U3), ja que els valors de velocitat del vent es van imposar segons el disseny experimental. Tanmateix, va ser necessari calibrar el túnel de combustió per tal de relacionar la freqüència de rotació dels ventiladors amb la velocitat del vent mesurada a la secció del túnel. En aquest apartat es detalla el procés de calibratge del túnel de combustió.


A banda, es descriu també en aquest apartat la metodologia de càlcul de l'anomenat *vent equivalent*. Aquest terme fa referència a la velocitat del vent que provocaria un efecte equivalent a un determinat valor de pendent. La determinació d'aquesta variable es dugué a terme amb l'objectiu de poder comparar els resultats de les sèries de vent –U1, U2 i U3– amb les sèries de pendent –P10, P20 i P30.

Calibratge del túnel de combustió

Per tal d'obtenir la corba de calibratge del túnel de combustió es realitzaren mesures per a les diferents freqüències de funcionament dels rotors, amb un anemòmetre de fil calent de la marca comercial *ALNOR M-9870* (Taula 6.5).

Taula 6.5. Especificacions tècniques de l'anemòmetre.

Anemòmetre de fil calent <i>ALNOR M-9870</i>	
Rang de mesura	0 - 20 m/s -17,8 - 93,3°C
Resolució	0,01 m/s 1°C
Precisió	±5% de la lectura o ±0,25 m/s ±1°C



Inicialment però, calgué determinar la posició –distància als ventiladors i altura– en què es col·locaria el sensor per a mesurar la velocitat de l'aire al túnel. Per a això es dugueren a terme diverses mesures a la secció del túnel variant la posició del sensor, per tal de caracteritzar el perfil longitudinal i vertical del flux generat al túnel de combustió.

Així, es mesurà la velocitat del flux d'aire al túnel de combustió per a diferents freqüències de rotació dels ventiladors, tant a l'eix central del túnel com a l'eix central d'una de les meitats de la superfície del túnel. Aquestes mesures es repetiren per a punts situats a diferents distàncies dels ventiladors (Figura 6.21). A més, el sensor de mesura es col·locà a una altura de 0,6 m respecte de la superfície del túnel, que es correspon aproximadament amb l'altura de l'eix de rotació dels ventiladors.

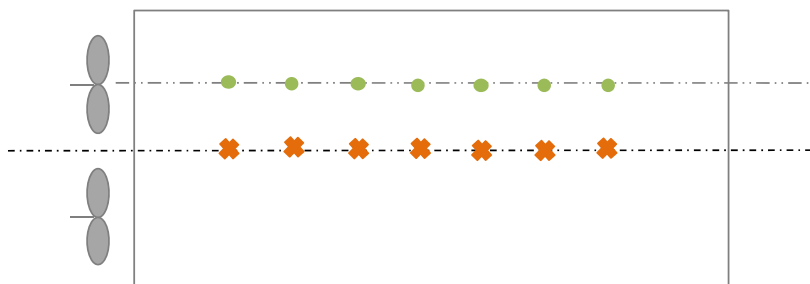


Figura 6.21 Esquema de les diferents posicions de l'anemòmetre de fil calent en el calibratge del túnel.

La Figura 6.22 i la Figura 6.23 mostren els resultats obtinguts a l'eix central del túnel i a l'eix central d'una de les meitats de la superfície del túnel, respectivament.

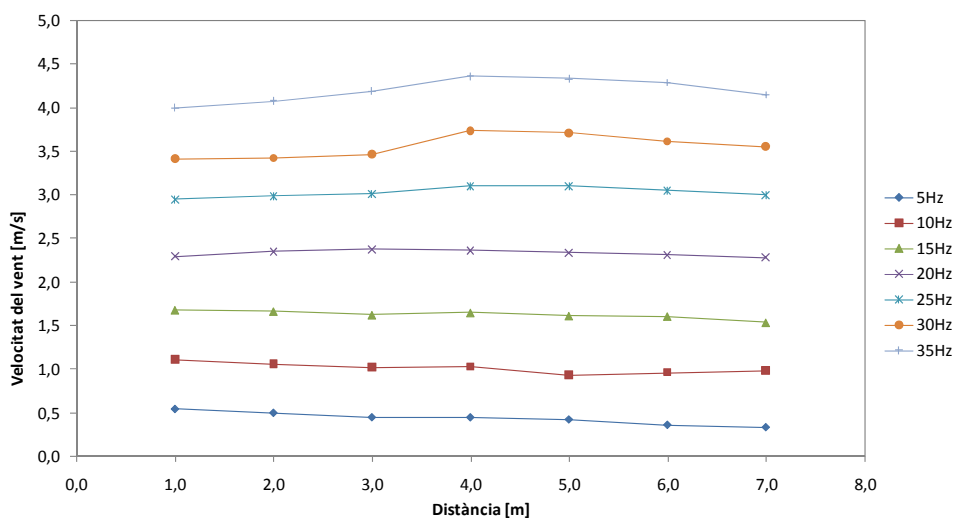


Figura 6.22 Relació entre la freqüència de rotació dels ventiladors i la velocitat mesurada a diferents distàncies al centre de la secció del túnel.

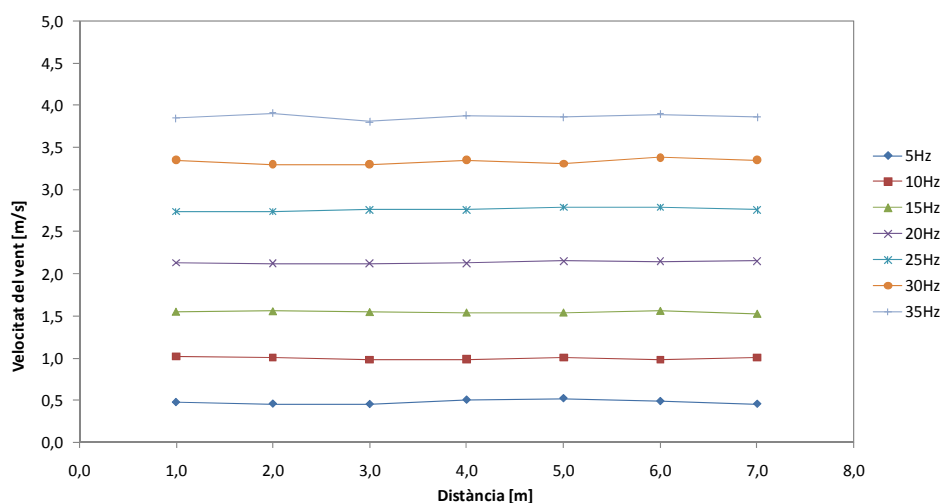


Figura 6.23 Relació entre la freqüència de rotació dels ventiladors i la velocitat mesurada a diferents distàncies al lateral de la secció del túnel (0,65 m respecte del centre de la secció).

A aquestes figures es pot observar com la velocitat és més constant al lateral del túnel, fet que no és d'estranyar, ja que per la configuració del túnel, compost per dos ventiladors, aquest punt de mesura es troba alineat amb el centre del rotor dels ventiladors. Pel que fa a les mesures al centre del túnel es pot observar que per a freqüències baixes, la velocitat mesurada amb l'anemòmetre disminueix a mesura que augmenta la distància als ventiladors. En canvi, per a freqüències de rotació elevades el comportament és invers, de manera que la velocitat mesurada tendeix a incrementar amb la distància.

Aquest fet es fa més evident a per a freqüències superiors a 25 Hz. A més, a partir d'aquestes figures també es pot concloure que per a una mateixa freqüència de rotació dels ventiladors, en general la velocitat mesurada al centre de la secció és superior a la mesurada al lateral (centre d'una meitat de la superfície del túnel).

A partir d'aquestes primeres mesures es decidí obtenir la corba de calibratge al centre de la secció del túnel, tot i el comportament més irregular del flux en aquest punt, atès que tots els llits de combustible es col·locarien centrats en relació a la secció del túnel. A més, es decidí també treballar en un rang de freqüències de rotació comprès entre valors superiors a 5 Hz i inferiors a 30 Hz, precisament per a evitar les freqüències que provoquen fluxos més irregulars.

Posteriorment es realitzaren mesures variant, a més, de la distància del sensor als ventiladors, l'altura respecte la superfície del túnel, per a dues freqüències de rotació -10 Hz i 35 Hz-, en l'eix central de la superfície del túnel. D'aquesta manera es dugueren a terme mesures a tres altures distintes; 0,3 m, 0,6 m i 0,9 m. Pel què fa a les mesures al llarg de l'eix longitudinal del túnel, es decidí reduir-ne el nombre, tenint en compte on es posicionaria el llit de combustible. Així, es realitzaren mesures a 1,0 m, 2,0 m, 3,7 m i 5,0 m dels ventiladors. El valor de 3,7 m correspon a la distància entre els ventiladors i el centre de la franja de llit de combustible a partir de la qual es posaven en funcionament els ventiladors, és a dir, sense considerar el primer metre del llit de combustible (capítol 5).

A la Figura 6.24 han estat representats els resultats obtinguts, i s'ha indicat amb línies de tendència discontinues el perfil logarítmic característic de la variació de la velocitat del vent amb l'altura. Les dades mostren com per a les mesures realitzades a 0,9 m d'altura, existeix una major dispersió de valors, causada principalment pels punts corresponents a les distàncies de 1,0 m i 2,0 m.

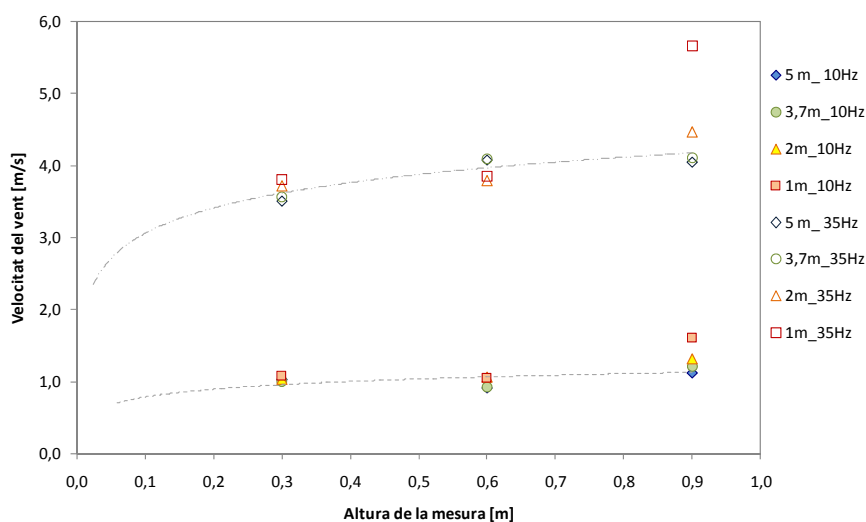


Figura 6.24 Velocitat del vent mesurada a diferents altures per a freqüències de 10 Hz i 35 Hz.

A banda, per tal d'avaluar l'efecte del llit en el perfil del vent, es repetí la sèrie de mesures anteriors, però amb un llit corresponent a l'escala W125 col·locat a la superfície del túnel. La Figura 6.25 en presenta els resultats, on s'hi pot observar com canvia la línia de tendència del perfil de vent, alhora que s'incrementa la dispersió en les mesures realitzades no només a 0,9 m d'altura sinó que també en les mesures dutes a terme a 0,3 m d'altura. Com en el cas anterior, la major dispersió té lloc en els punts de mesura més propers als ventiladors. A partir d'aquestes dades es decidí obtenir la corba de calibratge al centre del túnel, realitzant les mesures a una distància de 3,7 m i a una altura de 0,6 m. El valor de 3,7 s'escollí perquè es cregué que les mesures realitzades en aquest punt serien representatives del vent que afectaria a la propagació del foc durant les proves. El valor de 0,6 s'escollí perquè les mesures realitzades a aquesta altura presentaren en tots els casos una menor dispersió. A més, com es pot observar a la Figura 6.26 on es representen els punts corresponents a les mesures realitzades a una distància de 3,7 m amb el llit col·locat i sense, és precisament a aquesta altura on la diferència entre ambdós mesures és mínima. Aquest fet permeté realitzar les mesures finals per al calibratge sense col·locar el llit de combustible.

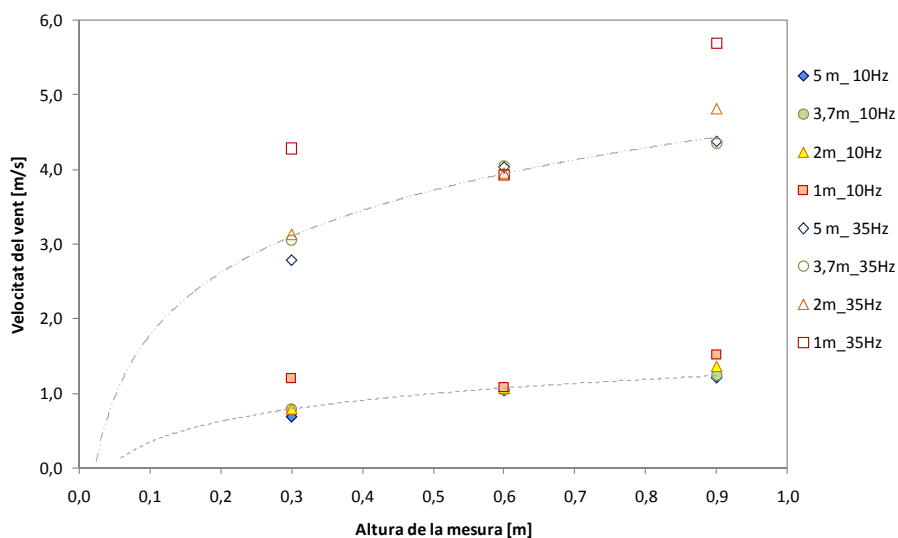


Figura 6.25 Velocitat del vent mesurada a diferents altures per a freqüències de 10 Hz i 35 Hz amb un llit de combustible de les característiques de l'escala W125 col·locat a la superfície del túnel.

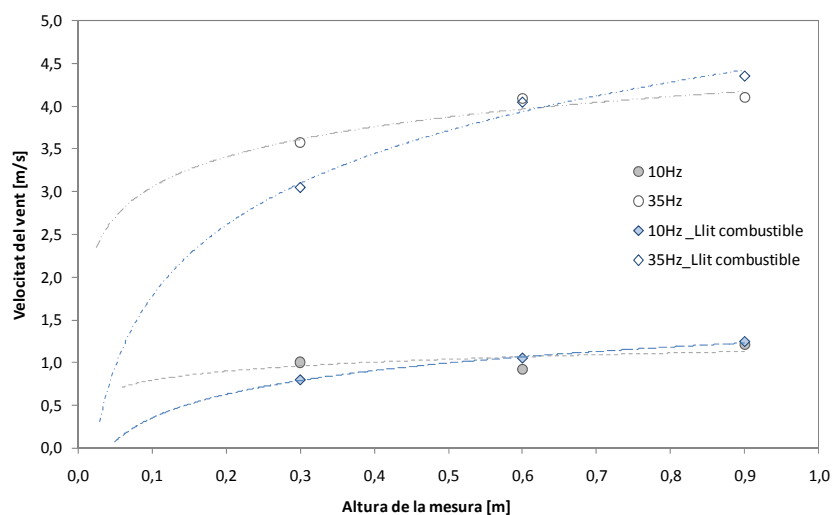


Figura 6.26 Comparació de la velocitat del vent mesurada a 3,7 m de distància dels ventiladors per a freqüències de 10 Hz i 35 Hz amb un lit de combustible col·locat i sense lit.

La Figura 6.27 mostra la corba de calibratge que es va utilitzar per a les proves de les sèries U1, U2 i U3. Aquesta corba de calibratge és vàlida en el rang de freqüències de rotació comprès entre 5 Hz i 35 Hz.

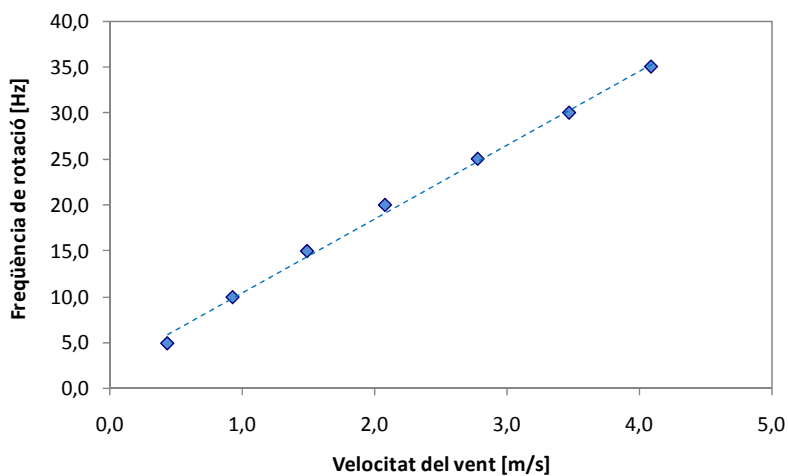


Figura 6.27 Corba de calibratge del túnel de combustió.

Vent equivalent a pendent

Són diversos els estudis que consideren que vent i pendent tenen efectes similars en la propagació del foc, com per exemple Rothermel (1972), Cheney (1981) o Weber (1989). En termes generals, quan el vent impulsa l'avanç de l'incendi, provoca l'allargament i inclinació de les flames vers al combustible no cremat, incrementant així el factor de vista del combustible no cremat i per tant afectant als processos radiatius. De forma equivalent, quan un incendi avança pendent amunt, les flames també es troben més

properes al combustible no cremat, de manera que es veuen igualment afectats els processos de transferència de calor per radiació.

Per tal de comparar l'efecte d'aquests dos elements –vent i pendent– en la propagació del foc, diversos autors han proposat el càlcul d'un factor de correcció o del que es coneix com a *vent equivalent*, és a dir, la velocitat del vent que provocaria un efecte similar al que provoca una determinada inclinació de la superfície per on avança el foc. A Sharples (2008) es pot trobar un ampli recull de les diverses metodologies utilitzades per diferents autors per a determinar les correccions de l'efecte provocat pel vent i/o pendent en la velocitat de propagació. Aquestes es poden classificar a grans trets entre les metodologies escalars (Rothermel, 1972; McRae, 2004) i vectorials (Finney, 1998; McAlpine *et al.*, 1991; Morandini *et al.*, 2002b; Nelson, 2002), que alhora es poden subdividir segons si són additives o multiplicatives. Aquestes metodologies es basen o bé en raonaments purament empírics partint del coneixement experimental que es té de la resposta de la velocitat de propagació davant del vent i/o del pendent, en raonaments geomètrics, o combinen ambdós tipus de raonaments.

D'acord a l'estudi de Sharples (2008) les metodologies vectorials additives són les que tendeixen a representar millor la naturalesa vectorial dels efectes del vent i del pendent, de manera que s'obtenen resultats més realistes i intuïtivament més raonables. Un exemple d'aquest tipus de models és el presentat a Nelson (2002). Aquest model captura alguns dels processos que tenen lloc en la modulació del foc a causa del pendent i té l'avantatge de poder-se utilitzar en diferents configuracions de vent i pendent. Tanmateix, presenta el desavantatge que el procediment de càlcul de la velocitat de vent equivalent depèn de la velocitat de propagació de manera que no es pot utilitzar com un model predictiu. No obstant això, atès que aquest no és l'objectiu d'aquest estudi, es va utilitzar el model de Nelson (2002) per a determinar el vent equivalent per a les proves de les sèries P10, P20 i P30. A continuació es presenten les equacions del model de Nelson (2002) per a determinar el vent equivalent en el cas de presència únicament de pendent.

$$u_{we} = u_b \cdot \sin\alpha \quad [6.18]$$

$$u_b = \left(\frac{2 \cdot g \cdot I}{c_{pa} \cdot \rho_a \cdot T_a} \right)^{1/3} \quad [6.19]$$

On u_{we} és la velocitat del vent equivalent al pendent, u_b és la velocitat deguda a l'empenyiment aerostàtic, α és la inclinació del terreny, g és l'acceleració de la gravetat, I la intensitat del front de flames, i c_{pa} , ρ_a i T_a són respectivament la capacitat calorífica, la densitat i la temperatura de l'aire. Novament, esmentar que la notació emprada en les expressions [6.18] i [6.19] no es correspon amb la original utilitzada a Nelson (2002), per motius de coherència en la nomenclatura.

Cal notar que u_b és equivalent a la velocitat dels gasos. De fet, si es comparen les equacions [6.14] i [6.15] amb l'equació [6.19] es pot observar que la única diferència es troba en el coeficient numèric que

acompanya al terme independent de l'equació, en el primer cas igual a 1,66 i en el segon cas igual a $2^{3/4}$ o 1,26.

Així, la velocitat equivalent al pendent es va calcular d'acord a les equacions [6.18] i [6.19], emprant el valor de la intensitat del front determinat segons la metodologia de l'apartat 6.2.4 i els valors de capacitat calorífica, densitat i temperatura de l'aire segons la metodologia descrita a l'apartat 6.5.

7. ANÀLISI DE RESULTATS

En aquest capítol es descriuen els resultats obtinguts en l'experimentació de laboratori, fent inicialment una anàlisi per separat de les proves realitzades al CERTEC i de les proves realitzades al LEIF. Pel què fa a l'experimentació desenvolupada a la instal·lació del CERTEC va permetre obtenir un major nombre de variables i per tant es dedicarà un apartat íntegre d'aquest capítol a l'anàlisi de la validació de les lleis d'escala per aquestes proves. En el cas de l'experimentació duta a terme al LEIF, es presenten els resultats en tres apartats, un primer on s'estudia el comportament dels assaigs de control, tant els duts a terme a la taula de pendent com al túnel de combustió, i dos més on s'analitzen respectivament l'efecte del pendent i del vent. A més, atesa la importància de la humitat del combustible en els resultats, i de la impossibilitat per a controlar aquesta variable a les proves del LEIF, es fa també un estudi detallat de l'efecte d'aquesta variable en la propagació així com també de l'efecte de la temperatura ambient i de la humitat relativa.

7.1. Descripció dels resultats de l'experimentació a la instal·lació del CERTEC

Al capítol 4, s'han descrit les lleis d'escala aplicables a l'estudi de la propagació d'un front de flames, mentre que al capítol 5 s'han adaptat a les condicions pròpies de l'experimentació duta a terme en aquesta tesi. Així, en aquest apartat es presenta l'anàlisi desenvolupada per a determinar la validesa d'aquestes lleis a partir de les dades obtingudes en el bloc experimental número 1, desenvolupat a la instal·lació del CERTEC.

En primer lloc es presenta un breu estudi sobre les dispersió que presenten les variables de disseny, les condicions ambientals i la humitat del combustible. Tot seguit, es presenta l'anàlisi de les lleis d'escala per a la velocitat de propagació i la geometria de la flama, que posteriorment també s'analitzaran a partir de les dades obtingudes a les instal·lacions del LEIF (apartat 7.2). La darrera part d'aquest apartat es dedica a l'anàlisi de les altres lleis d'escala que s'han pogut validar amb les dades obtingudes a la instal·lació del CERTEC però que no s'han pogut comprovar amb les del laboratori del LEIF perquè no es disposava de prou informació.

7.1.1. Estudi de la dispersió de les variables de disseny i condicions ambientals

Les especificacions de les proves quedaren determinades pels valors teòrics de l'amplada, l'altura i la densitat aparent del llit de combustible. Tanmateix, els valors mesurats d'altura i densitat aparent del llit distaren dels teòrics. Per tal d'analitzar l'efecte d'aquesta diferència en la validació de les lleis d'escala, es quantificà aquesta diferència d'acord a diferents estadístics (Taula 7.1).

Taula 7.1. Anàlisi univariable de les variables de disseny.

Variable	Valor teòric	Mitjana	Desviació Estàndard	Mínim	Màxim	Coefficient de variació ¹ [%]
W100						
Altura del llit [$\times 10^{-2}$ m]	8,00	8,10	0,125	7,90	8,30	1,54
Densitat aparent [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7,50	7,31	0,146	7,06	7,48	2,00
W50						
Altura del llit [$\times 10^{-2}$ m]	4,00	3,94	0,125	3,80	4,00	3,17
Densitat aparent [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7,50	7,58	0,298	7,33	7,99	3,94
W25						
Altura del llit [$\times 10^{-2}$]	2,00	2,10	0,204	1,80	2,30	9,68
Densitat aparent [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7,50	7,41	0,999	6,46	8,72	13,48

¹ **Coefficient de variació:** Mesura de dispersió adimensional que resulta de dividir la desviació estàndard per la mitjana aritmètica.

A partir de les dades de la Taula 7.1 s'observa que la major dispersió, expressada segons el coeficient de variació, quan a altura i densitat aparent del llit tingueren lloc en les proves de menor amplada del llit ($W = 25$ cm). Per tant, és d'esperar que s'observin dispersions majors en els valors de les variables que depenguin en gran mesura de l'altura o de la densitat aparent del llit en les proves dutes a terme en els llits de menors dimensions. Cal dir que foren precisament aquests llits els més difícils de preparar, ateses les seves reduïdes dimensions, per assegurar la correcta distribució del combustible.

Tot i que el combustible es va assecar a l'estufa prèviament a les proves, aquest recuperava certa humitat. Precisament per això, la Taula 7.2 presenta una anàlisi estadística per a la temperatura ambient, la humitat relativa i la humitat del combustible.

Taula 7.2. Anàlisi univariable de les condicions ambientals.

Variable	Mitjana	Desviació estàndard	Mínim	Màxim	Coefficient de variació [%]
W100					
Temperatura ambient [K]	298,62	2,504	293,00	301,00	0,80
Humitat relativa [%]	55,06	4,330	49,00	61,00	7,90
Humitat del combustible [% base seca]	6,12	0,631	5,14	6,94	10,31
W50					
Temperatura ambient [K]	295,00	0,816	294,00	296,00	0,30
Humitat relativa [%]	51,50	4,795	47,00	57,00	9,30
Humitat del combustible [% base seca]	5,04	0,515	4,45	5,68	10,24
W25					
Temperatura ambient [K]	294,80	0,758	294,00	295,50	0,30
Humitat relativa [%]	53,60	5,225	46,00	59,00	9,70
Humitat del combustible [% base seca]	5,87	1,450	3,71	7,26	24,70

Com es pot observar a partir de les dades de la taula anterior, el coeficient de variació pel què fa a la temperatura no supera en cap escala l'1 %, i en el cas de la humitat relativa no supera el 10 %. En el cas de la humitat del combustible, tant per l'escala W100 com W50 el coeficient de variació és de l'ordre del 10 %. No obstant, el temps de preparació dels llits estava directament relacionat amb les dimensions del llit, quan major era aquest més temps era necessari per a preparar un assaig. Això es reflecteix en el fet que el valor mitjà de la humitat del combustible és de l'ordre d'un punt superior en les proves de l'escala W100 en relació a la de les proves W50. En el cas de les proves corresponents a l'escala W25, s'observa un coeficient de variació molt més elevat, proper al 25 %. Això és degut a la presència de dos valors extrems, corresponents al mínim i al màxim, molt allunyats de la resta de valors. De fet si es torna a calcular el coeficient de variació sense considerar aquests dos punts el valor que s'obté no arriba al 15 %. Així, tot i que inferior, segueix essent superior a la resta de casos, indicant que aquest tipus de llits foren molt més sensibles a la recuperació d'humitat. La causa d'aquest fet es

que aquest tipus de llits tenen una profunditat o altura menor i la difusió de la humitat a l'interior del llit es produeix de manera més eficient que en la resta de llits. A més, si es considera el valor mitjà de la humitat del combustible en les proves realitzades en l'escala W25 és superior a la de les proves dutes a terme en l'escala W50. Si a més a més no es tenen en compte els punts extrems, s'obté un valor mitjà de la humitat del combustible del 6,13 %, pràcticament idèntic al de les proves de l'escala W100. Tot i la presència d'aquests dos valors extrems pel què fa a humitat del combustible en les proves de l'escala W25 es van incloure en la posterior anàlisi de validació de les lleis d'escala.

Un altre aspecte que cal destacar, és que les proves en què es produí una major dispersió pel què fa a la densitat aparent del llit i l'altura de combustible, no coincideixen necessàriament amb aquelles proves en què es mesuraren els valors màxims i mínims d'humitat del combustible. Per tant, per a validar les lleis d'escala caldrà tenir en compte l'efecte que tenen aquestes variables –altura del llit, densitat aparent de llit i humitat del combustible– en la resta de variables, d'acord a l'anàlisi desenvolupada al capítol 3.

7.1.2. Validació de la llei d'escala de la velocitat de propagació

A la Figura 7.1 s'hi ha representat els valors de la velocitat de propagació (R) per a totes les proves del bloc experimental 1 en funció de l'arrel quadrada de la longitud del front de flames (W), d'acord amb la llei d'escala de l'equació [4.25] (vegeu el Capítol 4) o equivalentment a l'equació [5.2] (vegeu el Capítol 5).

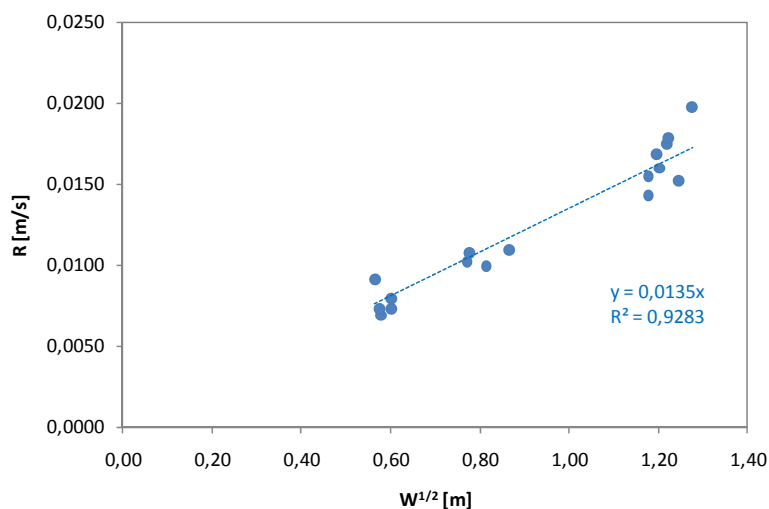


Figura 7.1 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames per les proves realitzades a la instal·lació del CERTEC.

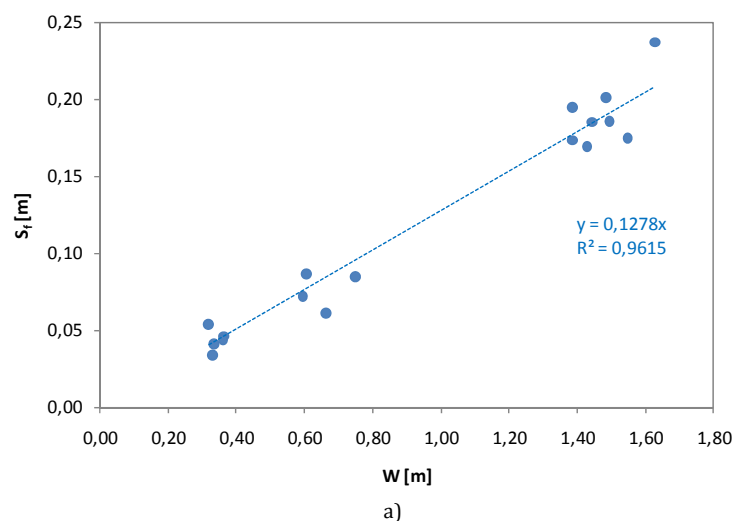
Tal com es pot observar els punts s'ajusten molt clarament a una recta ($R^2 = 0,93$), fet que permet validar el compliment d'aquesta llei d'escala per a les condicions en què es dugueren a terme les proves de la instal·lació del CERTEC. A més, si es determina el coeficient de variació per a la velocitat de

propagació en cada escala, s'obtenen valors de 10,5 %, 4,4 % i 11,3 % per a les escales W100, W50 i W25 respectivament. D'aquesta manera, atès el coeficient de variació en les variables de disseny i en la humitat, més l'error experimental es pot considerar que la dispersió que presenten els resultats és causada per aquests factors.

7.1.3. Validació de la llei d'escala corresponent a les variables lineals del sistema

D'acord a l'equació [4.20] del Capítol 4 (o equivalentment l'equació [5.1] del Capítol 5), qualsevol variable lineal del sistema ha d'escalar linealment amb la longitud del front de flames. De les variables lineals seleccionades per a fer l'anàlisi dimensional, l'altura del llit de combustible i el diàmetre de les partícules no s'anitzaran aquí ja que la primera va ser una variable de disseny dels experiments i la segona era constant i per tant no va intervenir en l'anàlisi (vegeu capítol 5). La resta de variables lineals corresponen a les dimensions característiques del front de flames i a la longitud de preescalfament del llit de combustible.

Pel què fa a les dimensions característiques del front de flames: gruix del front (S_f), altura de la flama (H) i longitud de la flama (L_f), a la Figura 7.2 es pot veure com aquesta llei es verifica en tots els casos amb coeficients de regressió propers a la unitat ($R^2 > 0,96$). És interessant observar aquí que, tot i les diferències en els mètodes utilitzats per a l'obtenció d'aquestes tres variables la correlació obtinguda en tots els casos és molt semblant. Així mentre la longitud i l'altura de la flama foren mesurades directament a partir dels enregistraments de la càmera de vídeo lateral, el gruix del front de flames va ser obtingut indirectament a partir de la velocitat de propagació i el temps de residència de la flama. Això però no s'ha traduït en una pitjor correlació de les dades tal com s'hagués pogut esperar.



a)

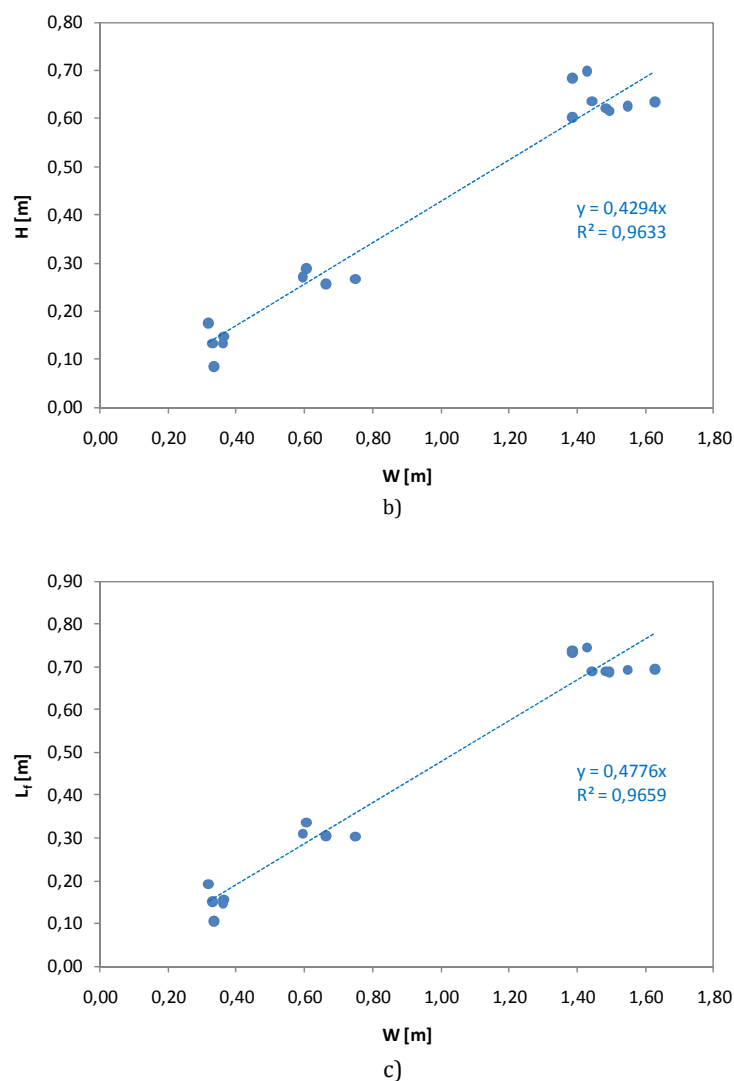


Figura 7.2 Paràmetres geomètrics segons la longitud del front de flames. a) Gruix. b) Altura. c) Longitud.

En totes tres variables geomètriques, la major dispersió determinada a partir del coeficient de variació es produeix en les proves de menors dimensions (escala W25). Pel que fa a l'altura i la longitud de la flama, aquestes dues variables, d'acord al capítol 3, es veuen afectades per l'altura del llit de combustible i per la humitat del combustible. Aquest fet es reflecteix clarament en les dades obtingudes, ja que el coeficient de variació en les escales W50 i W100 tant per l'altura com per la longitud de la flama és inferior al 5,3 %. Mentre que aquest mateix coeficient per a l'escala W25, en la que tingueren lloc una major dispersió pel que fa a les variables de disseny i a la humitat del combustible, és de l'ordre del 20 %. Això també es pot observar gràficament a la Figura 7.2 b) i c) en que els punts corresponents a les escales W50 i W100 presenten una dispersió molt petita pel que fa

als valors mesurats tant d'altura com de longitud de flama –dispersió en l'eix vertical a la Figura 7.2 b) i c)–, però en el cas dels punts corresponents a les escales W25, la dispersió de les dades és molt superior.

Pel què fa a la longitud de preescalfament (I_s), la Figura 7.3 mostra els resultats obtinguts en la validació de la llei d'escala. Tot i que el coeficient de correlació és lleugerament inferior als corresponents als paràmetres geomètrics del front ($R^2 = 0,87$) la llei d'escala també es compleix en aquest cas. En les proves de majors dimensions, s'observa una dispersió en els valors determinats de longitud del front de flames força elevada –amb un coeficient de variació del 13,2 %. Aquest fet pot ser causat perquè a mesura que augmenten les dimensions del model experimental, el front de flames presenta majors dimensions i per tant la longitud de llit preescalfada per aquest és més gran, de manera que es disposa de menys valors per a determinar la longitud de preescalfament.

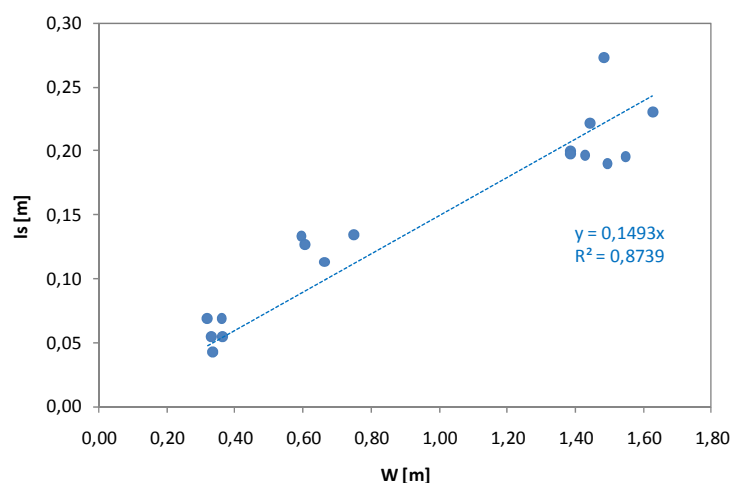


Figura 7.3 Longitud de preescalfament segons la longitud del front de flames.

Aquesta variable és interessant perquè d'alguna manera engloba tant l'efecte de la radiació sobre la superfície del combustible que s'està preescalfant com l'efecte de la convecció de l'aire ambient que és succionat per les flames. Per tant, que es compleixi la llei d'escala és un resultat significatiu perquè tan la definició com el mètode d'obtenció d'aquesta variable són completament nous.

7.1.4. Validació de les altres lleis d'escala

En aquest apartat s'analitza la validació de les lleis d'escala corresponents a: la intensitat del front de flames (I), que ha d'escalar directament amb la longitud del front (W) d'acord amb l'equació [4.20]; a les velocitats dels gasos (u_g) i d'arrossegament de l'aire (u_a) així com el temps de residència de la flama (t_r) i la velocitat de combustió (V), que han d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front (equació [4.25]) i finalment a la del poder emissiu de la flama (E) que ha d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front al cub.

Pel què fa als gradients de temperatura, la llei ens diu que són independents de la longitud del front però que han de ser proporcionals entre ells, de manera que al final d'aquest apartat es comprova si això es compleix o no per aquestes proves.

A la Figura 7.4 es mostra la relació entre la intensitat lineal del front i la longitud del front de flames. Es pot comprovar que efectivament la llei es compleix essent el coeficient de regressió proper a la unitat ($R^2 = 0,94$). Tal com s'ha explicat al capítol 6, la intensitat del front depèn de la velocitat de propagació, que ja s'ha vist que també complia la llei d'escala, però també hi intervé la quantitat de combustible consumit, que es va determinar experimentalment, i la calor alliberada (HY). Aquest darrer paràmetre depèn d'una banda del poder calorífic inferior (PCI , constant en aquest cas) i de la humitat del combustible (H_s). Aquest darrer paràmetre és el que pot tenir una influència més gran en la dispersió de les dades –sobretot en la sèrie W100– ja que tot i que el combustible era sec, durant el temps de preparació del llit aquest podia recuperar humitat. Aquest temps era major pels llits més grans ja que la preparació era més difícil.

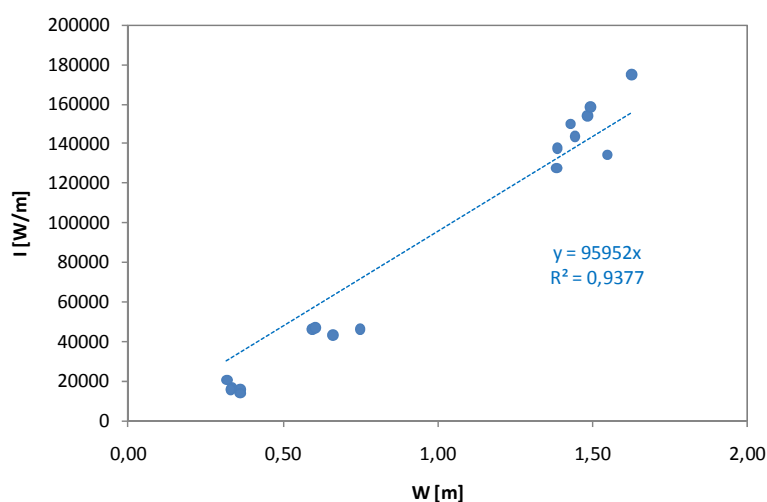
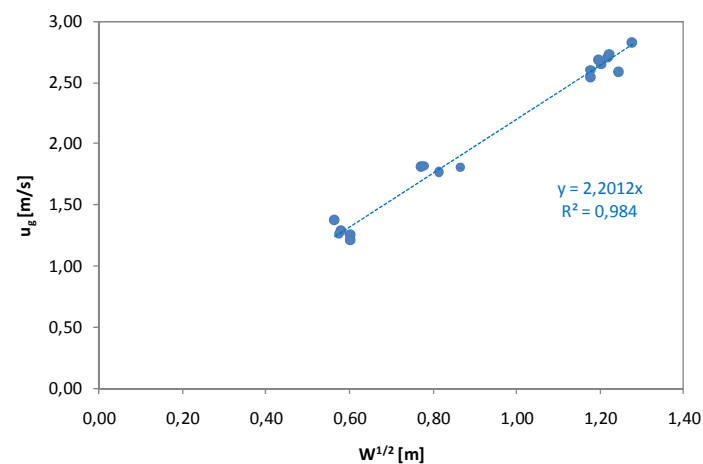
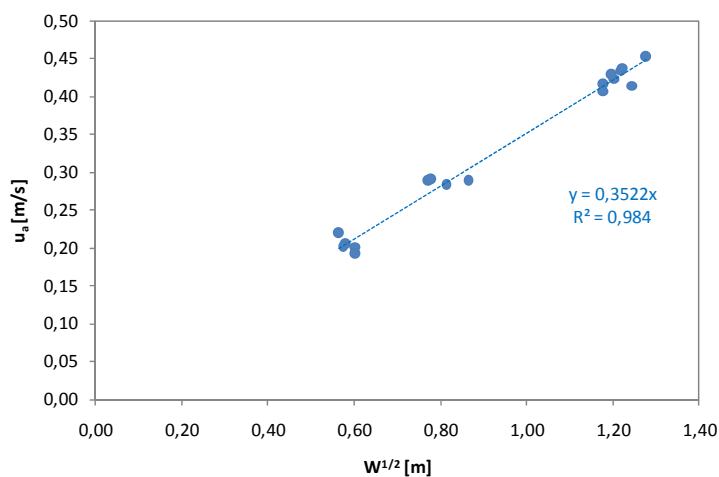


Figura 7.4 Intensitat del front de flames segons la longitud del front de flames.

La Figura 7.5 mostra la relació entre les velocitats dels gasos i induïda de l'aire segons l'arrel quadrada de la longitud del front. Com es pot comprovar en aquest cas els coeficients de correlació són molt propers a la unitat ($R^2 > 0,98$). Atès que la velocitat induïda s'ha determinat a partir de la velocitat dels gasos (vegeu el Capítol 6), si aquesta compleix la llei d'escala és obvi que l'altra també ho farà. Pel què fa a la velocitat dels gasos, com que no es va poder mesurar directament sinó que es va estimar a partir de l'equació [6.14], que depèn de la intensitat lineal del front, doncs també era d'esperar que es complís.



a)



b)

Figura 7.5 Velocitats segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. a) velocitat dels gasos, b) velocitat induïda de l'aire.

Pel que fa al temps de residència de la flama, aquest paràmetre es determinà a partir de les mesures realitzades amb el termoparell situat al llit de combustible, per tant està subjecte tant a la pròpia inèrcia del termoparell com als possibles errors inherents al mètode d'obtenció d'aquest temps a partir de les temperatures enregistrades pel termoparell tal com s'ha explicat al Capítol 6. La Figura 7.6, mostra els resultats obtinguts pel que fa a la validació d'aquesta llei d'escala. Tot i que la dispersió de les dades és més gran i el coeficient de correlació lleugerament inferior als casos anteriors ($R^2 = 0,89$), es pot afirmar que en aquest cas la llei d'escala també es compleix.

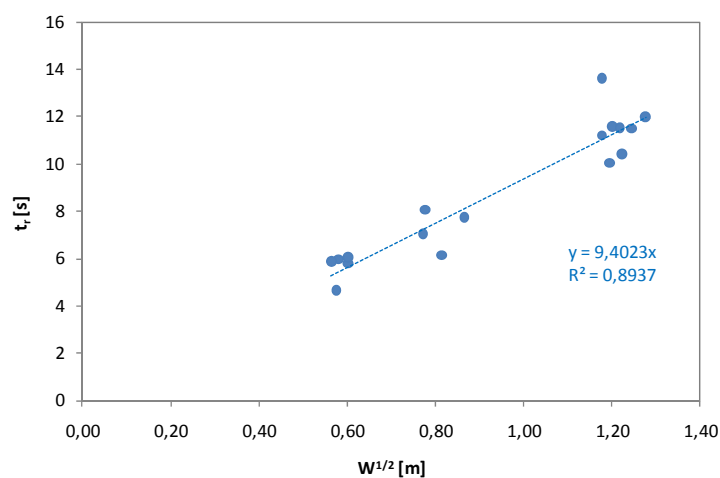


Figura 7.6 Temps de residència segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

La Figura 7.7 mostra la relació entre la velocitat de combustió i l'arrel quadrada de la longitud del front de flames, d'acord amb la llei d'escala corresponent, tal i com apareix al capítol 5, ateses les simplificacions realitzades pel fet d'utilitzar el mateix tipus de combustible en tots els assaigs.

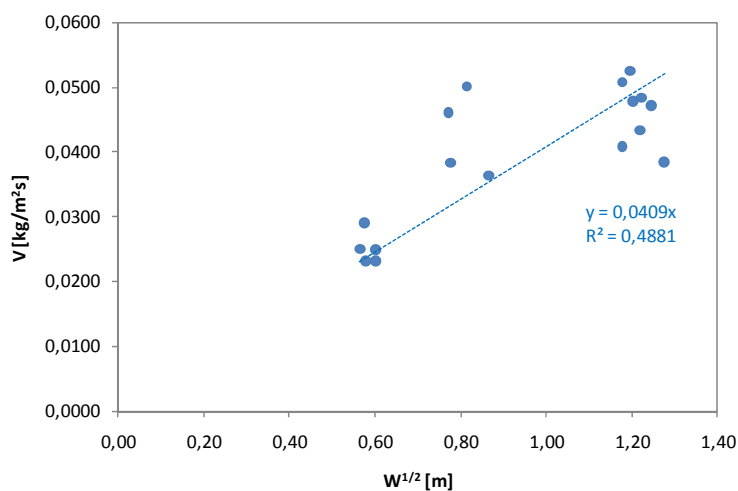


Figura 7.7 Velocitat de combustió segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

En aquest cas, es pot observar una dispersió molt més gran que en tots els altres casos analitzats – sobretot per les proves de W50 i W100– així com un coeficient de correlació relativament petit ($R^2 = 0,49$). Aquesta major dispersió pot ser deguda a la metodologia de càlcul d'aquesta variable que es decidí expressar per unitat d'àrea de la zona en combustió. Aquesta zona es determinà com l'amplada del llit pel gruix de flama (vegeu Capítol 6). Si s'hagués expressat la velocitat de combustió en [kg/m·s],

llavors s'hagués obtingut al aplicar l'anàlisi dimensional que la velocitat de combustió hauria d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front elevat al cub tal i com es pot observar a l'expressió [7.1]. Per a arribar a aquesta llei d'escala, ha estat considerada la relació que existeix entre la càrrega, la densitat aparent i l'altura del llit (1). En el darrer pas (2), s'ha menystingut la densitat aparent ja que es va mantenir constant durant els experiments i s'ha substituït l'altura del llit i la velocitat de propagació per les seves corresponents lleis d'escala (eq. [4.6] i [4.12]).

$$\pi_{12}'' = \frac{V}{C \cdot R} \quad \Rightarrow \quad V \sim C \cdot R \quad \stackrel{(1)}{\Rightarrow} \quad V \sim \rho_{ap} \cdot h \cdot R \quad \stackrel{(2)}{\Rightarrow} \quad V \sim W^{3/2} \quad [7.1]$$

La Figura 7.8 presenta els resultats d'acord a la llei d'escala de l'equació [7.1]. En aquesta figura es pot observar com es compleix la llei d'escala ($R^2 > 0,96$), fet que indica que és més adient expressar la velocitat de combustió en [kg/m·s].

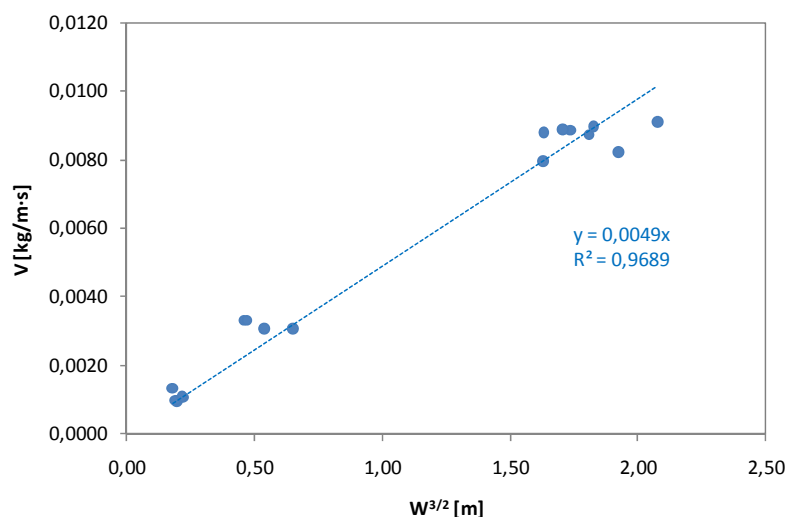


Figura 7.8 Velocitat de combustió lineal segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames al cub.

En el cas del poder emissiu de les flames es va determinar directament a partir dels radiòmetres. La Figura 7.9 mostra com en aquest cas es compleix perfectament ($R^2 = 0,96$) la llei d'escala segons la qual aquest paràmetre ha d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front al cub. S'observa també per aquesta variable una tendència a una major dispersió de les dades a mesura que augmenta l'escala. Aquest fet es pot atribuir com ja s'ha comentat anteriorment a la major dificultat existent per a controlar la humitat del combustible en les proves més grans.

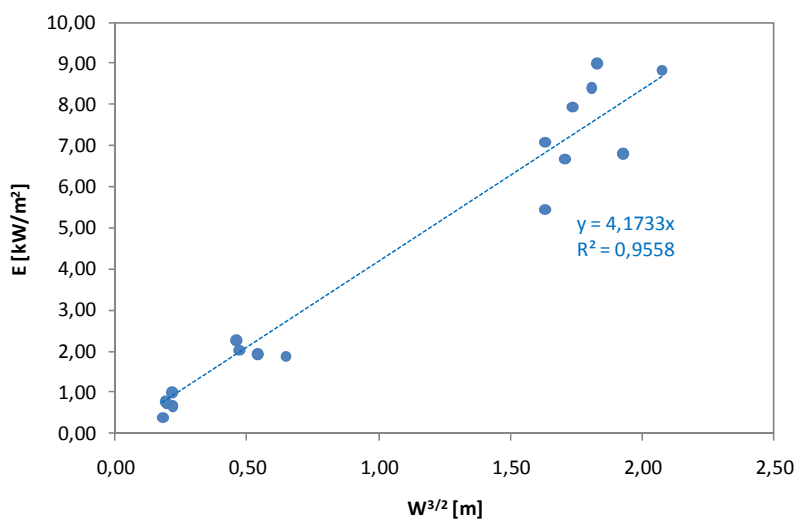


Figura 7.9 Poder emissiu de les flames segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames al cub.

Finalment, la Figura 7.10 mostra la relació existent entre els diferents gradients de temperatura determinats durant l'experimentació. Segons la llei d'escala tots aquests gradients haurien de ser proporcionals. Tal com es pot observar, tot i que els coeficients de correlació no són gaire elevats ($R^2 \approx 0,5$), sí que hi ha una tendència a la linealitat

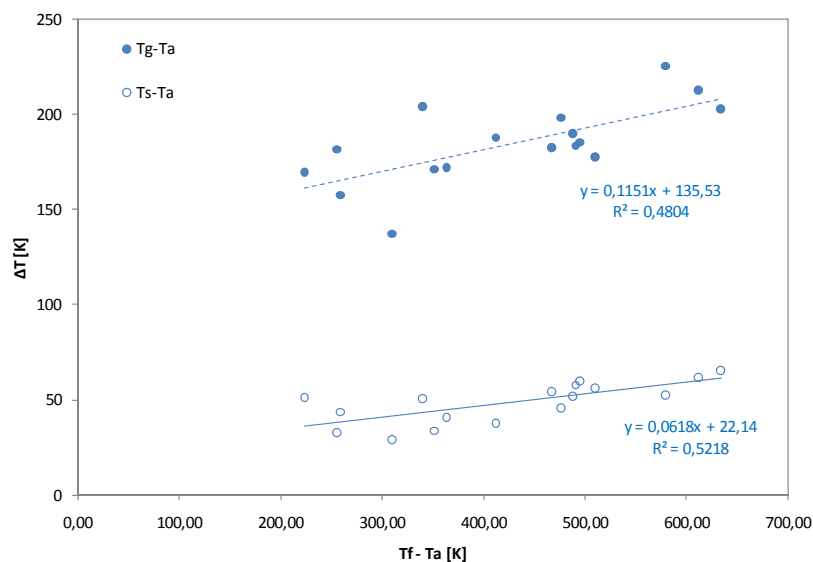


Figura 7.10 Relació entre els gradients de temperatura del sistema considerat.

Com a conclusió general es pot dir doncs que per a les proves realitzades a la instal·lació del CERTEC, sense vent ni pendent i assecant el combustible, es compleixen totes i cada una de les lleis d'escala derivades de l'estudi teòric realitzat al Capítol 4; en el rang d'escales treballat que va dels 25 cm als 160 cm de longitud del front efectiu, tot i la dispersió inicial en les variables de disseny, pròpia de l'experimentació. D'aquesta manera, es pot assumir doncs que la dispersió en les variables no afecta significativament al compliment de les lleis d'escala i per tant no s'analitzarà per a les proves dutes a terme al LEIF.

7.2. Descripció dels resultats de l'experimentació a les instal·lacions del LEIF

En les proves realitzades a les instal·lacions del LEIF, no es pogueren mesurar les variables necessàries per a validar totes les lleis d'escala derivades de l'anàlisi teòric. Per tant, en aquest apartat s'analitzarà únicament la validesa de les lleis de velocitat de propagació i geometria de la flama corresponents a les equacions [4.20] i [4.25] del Capítol 4. Nogensmenys, cal dir que en el cas de la geometria de flama només s'ha pogut determinar l'altura i la longitud de la flama però no el seu gruix.

Abans d'entrar en l'anàlisi de les lleis d'escala, tal com ja s'ha comentat a l'inici d'aquest capítol, s'ha fet un estudi de l'efecte de les condicions ambientals sobre els paràmetres que es volen analitzar, ja que en aquestes proves no es va poder assecar el combustible. Tot seguit, es descriuran els resultats obtinguts de les lleis d'escala per a les proves de control, les proves amb pendent i les proves amb vent.

7.2.1. Resultats de les proves de control

Les proves de control –sèries P0 i U0–, es dugueren a terme amb l'objectiu d'estudiar l'efecte de la humitat del combustible en la propagació del foc. Tanmateix, permeteren també analitzar la validesa de les lleis d'escala de propagació i geometria en fronts de flama bàsics.

El contingut d'humitat del combustible és un factor molt important a tenir en compte en l'experimentació en incendis forestals. D'acord amb l'anàlisi dimensional efectuat (vegeu el capítol 4), l'equació [4.23] imposa que cal mantenir constant aquesta variable en les proves realitzades a diferents escales. Tanmateix, durant les proves dutes a terme al LEIF no es va poder controlar la humitat del combustible. Així, en aquest apartat es presenta una breu anàlisi sobre l'efecte de les condicions ambientals i l'espècie vegetal en la humitat del combustible, així com de l'efecte de la humitat del combustible i de l'espècie vegetal en la velocitat de propagació, la longitud de flama i la longitud del front de flames. No és objecte d'aquest estudi analitzar de forma genèrica el comportament de la humitat del combustible sinó analitzar aquest comportament en les condicions en les quals es realitzaren les proves experimentals. És molt important conèixer aquest comportament per a interpretar correctament els resultats quan s'incorporen altres factors com el pendent i el vent, ja que l'efecte d'aquests podria quedar emmascarat per l'efecte de la humitat del combustible i les condicions ambientals.

Després d'aquest estudi es presenten els resultats de validació de les lleis d'escala de velocitat de propagació i geometria de la flama per a fronts de flama bàsics. Així com l'estudi comparatiu amb els resultats corresponents a l'ampliació de l'escala experimental –sèrie AE– i a les proves del CERTEC –sèrie C0.

Estudi de l'efecte de les condicions ambientals i de l'espècie vegetal en la humitat del combustible

En les proves dutes a terme al LEIF no es van poder controlar ni les condicions ambientals –temperatura ambient i humitat relativa– ni la humitat del combustible. A més, tampoc es va poder utilitzar un únic tipus de combustible durant tota l'experimentació, sinó que es va restar subjecte a la disponibilitat del subministrador.

La humitat del combustible al laboratori depèn bàsicament del tipus de combustible –composició química, estructura interna i propietats físiques– i de les condicions ambientals. A més, en el cas de llits compactats depèn també de les característiques d'aquest com per exemple la porositat (Nelson, 2001).

La humitat relativa no forma part de l'anàlisi dimensional desenvolupat a l'apartat 4.2.2 i la temperatura ambient apareix de forma combinada amb la temperatura de la flama, la temperatura de la superfície del llit i la temperatura dels gasos de combustió. No obstant, cap d'aquestes últimes variables es va poder determinar en aquestes proves. Tot i això, atès que les condicions ambientals poden afectar al comportament del foc a laboratori (Dupuy *et al.*, 2002), per cada prova es registraren els valors de temperatura ambient i humitat relativa. Els sensors de mesura es trobaven situats a l'interior del laboratori però allunyats de les instal·lacions experimentals. D'aquesta manera, les dades obtingudes són relatives a les condicions ambientals generals al laboratori, que com s'observà durant l'experimentació diferiren en alguns casos de les condicions ambientals en l'entorn immediat del llit de combustible, especialment en les proves realitzades al túnel de combustió. Aquest fet es podia notar a l'hora de preparar els assaigs, però no es va mesurar de forma quantitativa.

En el cas de les partícules que configuren el llit, en l'anàlisi dimensional desenvolupat (apartat 4.2.2), aquestes es van caracteritzar a partir de la relació superfície - volum, el diàmetre, la densitat i el poder calorífic inferior. Tanmateix, per tal de simplificar les lleis d'escala a aplicar al laboratori es va assumir que s'utilitzaria un únic tipus de combustible. Tot i que en les proves dutes a terme al LEIF es van utilitzar combustibles de la mateixa família, i per tant amb característiques similars, les principals diferències foren en termes de la relació superfície - volum.

Pel que fa a la humitat del combustible, d'acord a l'equació [4.9] cal mantenir constant el valor d'aquesta variable en les proves realitzades a diferents escales. Les mostres per a la mesura de la humitat del combustible es prengueren de la superfície del llit. Per a aquestes partícules de combustible el paràmetre responsable de la dinàmica dels processos d'adsorció - desorció d'aigua de l'ambient, la difusivitat, ve controlat essencialment per la relació superfície - volum de les partícules

(Nelson, 2001). En l'interior del llit, el contingut d'humitat de les diferents capes de partícules depèn també de la difusivitat, però en aquest cas a banda de dependre de la relació superfície - volum depèn també de la porositat i altura del llit. Així, a major compactació i altura del llit, per a una mateixa relació superfície - volum, disminueix la difusivitat i s'incrementa el temps de resposta del combustible (Anderson, 1990). El fet d'utilitzar les partícules de la superfície del llit per a realitzar les mesures d'humitat, no permet detectar gradients d'humitat en altura en el llit de combustible. Tanmateix això no significa que no puguin ser-hi presents.

Així doncs, l'objectiu d'aquest apartat és estudiar la interacció entre les condicions ambientals, el tipus de combustible i el contingut humitat d'aquest en les condicions en què tingueren lloc les proves de control –sèries P0 i U0– al LEIF. Tot i que les condicions ambientals poden tenir un efecte en la propagació (Dupuy *et al.*, 2002), no es disposa de dades que permetin determinar de forma separada l'efecte de les condicions ambientals i l'efecte de la humitat del combustible en la propagació del foc. Per tant, es considerarà que l'efecte principal de les condicions ambientals fou en la dinàmica dels processos d'adsorció d'aigua pel combustible.

Les condicions en què tingueren lloc les proves de control diferiren segons la sèrie experimental, especialment pel què fa a la temperatura ambient. Les proves al LEIF es realitzaren entre els mesos de maig i juliol de 2006. Al llarg d'aquests mesos les condicions ambientals anaren canviant, d'acord als canvis propis de l'estació de l'any. Les proves al túnel de combustió –sèrie U0– s'efectuaren en darrer lloc, i per tant en general, la temperatura ambient enregistrada fou superior a la de les proves de la taula de pendent –sèrie P0– en condicions semblants d'humitat relativa (Figura 7.11). La temperatura ambient mitjana enregistrada en el decurs de les proves de control realitzades a la taula de pendent fou de 299 K, mentre que a les proves de control del túnel de combustió aquesta temperatura fou de 305 K.

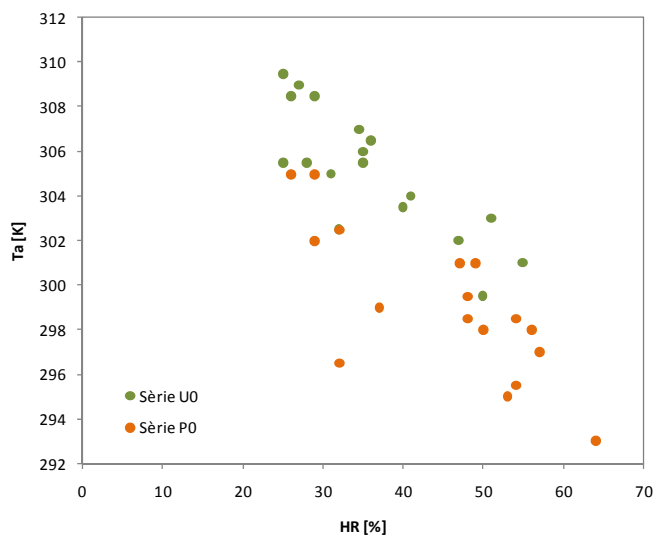


Figura 7.11 Variació de la temperatura ambient en funció de la humitat relativa.

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 varia àmpliament amb la humitat relativa per a una determinada temperatura ambient. Aquesta variació es pot representar com una funció polinòmica de tercer ordre, els valors de la qual queden compresos entre zero i el punt de saturació de la fibra. 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. Tanmateix, generalment les condicions ambientals fluctuen de forma continua, de manera que no s'arriba mai a assolir un estat d'equilibri. Per tant, les mesures d'humitat no han de correspondre necessàriament a estats d'equilibri.

A la Figura 7.12 s'han representat els valors d'humitat del combustible mesurats en les proves de control en funció de la humitat relativa. Per a dibuixar la corba de regressió s'ha considerat el punt de saturació de la fibra igual a 29% corresponent al punt de saturació de la fusta a 293 K, ja que no es disposa de dades per al combustible utilitzat.

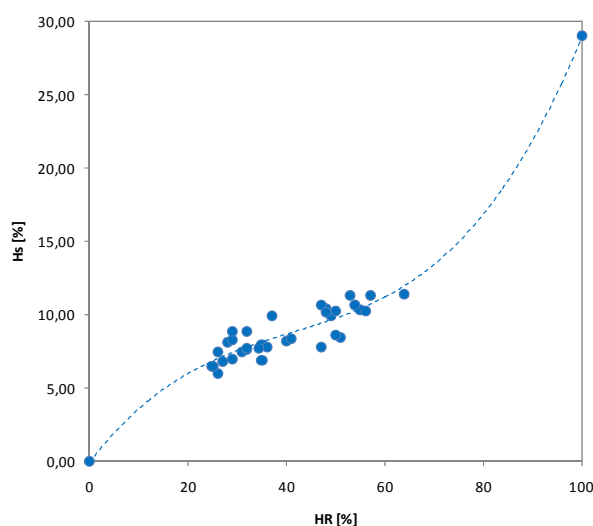


Figura 7.12 Evolució de la humitat del combustible amb la humitat relativa.

Si es representa novament la humitat del combustible en funció de la humitat relativa per sèrie experimental per tal de considerar la variació en la temperatura ambient (Figura 7.13 a), es pot observar com per als mateixos valors d'humitat relativa, les proves efectuades al túnel de combustió presenten valors d'humitat del combustible inferiors a les proves de la taula de pendent. A més, si es distingeix per espècie (Figura 7.13 b), es detecta com en general el blat comú presenta continguts d'humitat superiors al blat dur per a les mateixes condicions ambientals. Aquesta diferència en els valors d'humitat és deguda a les diferents característiques d'ambdós combustibles. El blat comú té una relació superfície - volum major que el blat dur, de manera que té una major facilitat per a perdre o guanyar humitat.

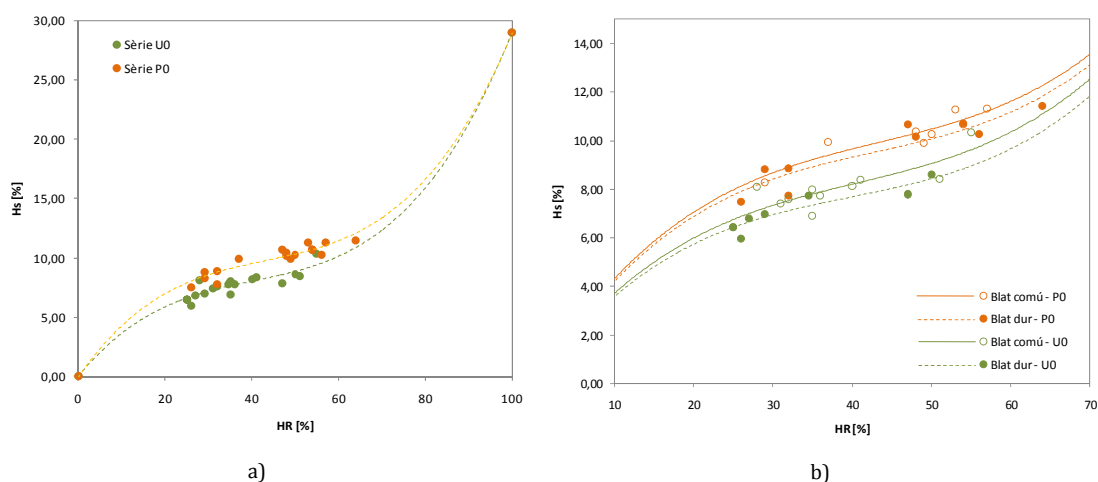


Figura 7.13 Evolució de la humitat del combustible amb la humitat relativa. a) Representació per sèries. b) Representació per sèries experimentals i tipus de combustible.

Tal i com es pot observar a la figura anterior (Figura 7.13), l'efecte de la temperatura en el procés d'adsorció de vapor d'aigua dels combustibles forestals és la reducció del valor de la humitat d'equilibri a mesura que la temperatura augmenta. Aquesta reducció es deu a la forta dependència de la pressió de saturació del vapor d'aigua a l'aire que disminueix amb la temperatura, fet que provoca un augment en el nombre de molècules d'aigua que abandonen el combustible a mesura que la temperatura s'incrementa però la humitat relativa es manté constant (Nelson, 2001).

Tenint en compte els valors mitjans de temperatura ambient i humitat del combustible per a cada sèrie experimental, es pot concloure que diferències de temperatura inferiors a 6 graus provoquen diferències en la humitat del combustible de dos punts. Si es comparen aquests valors amb els trobats a la bibliografia, en aquest cas són lleugerament superiors, tenint en compte que l'increment de temperatura ambient considerat és inferior. Per exemple, Kelsey (1957) observà en agulles de *Araucaria hunsteini* –una varietat australiana de pi– una disminució de la humitat de 1,4 punts quan per a una humitat relativa del 50%, la temperatura passava de 298 K a 313 K, és a dir, per a un augment de la temperatura de 15 graus. Mentre que, Anderson *et al.* (1978) detectaren una disminució d'un punt en la humitat d'agulles de *Pinus ponderosa* per un increment de temperatura de 10 graus. D'altra banda, Van Wagner (1972) va reportar una disminució en la humitat d'equilibri mitjana de 2,4 punts per a un increment de 10 graus en fullaraca composta d'agulles de pi i fulles de pollancre.

La diferència entre els valors trobats a la bibliografia i els valors determinats en aquest estudi pot ser causada per diversos factors, entre els que cal destacar en primer lloc, el fet que s'estan comparant dades de diferents tipus de combustibles, ja que a la bibliografia no s'han trobat estudis similars realitzats en llits de gramínies. I en segon lloc, el fet que les condicions ambientals mesurades foren les condicions del laboratori, i que com ja s'ha comentat, diferiren en alguns casos de les condicions

ambientals en l'entorn immediat del llit de combustible, de manera que el combustible es trobava subjecte a unes condicions ambientals diferents de les enregistrades.

D'aquest estudi es desprèn que si es volen conèixer les condicions ambientals reals que afecten a la humitat del combustible i al comportament del foc al laboratori, cal dur a terme les mesures en l'entorn immediat del llit ja que la pròpia instal·lació experimental i la prèvia realització de proves poden modificar les condicions ambientals locals en aquest espai. A més, aquest estudi ha posat de manifest que tot i que s'utilitzaren combustibles pertanyents a la mateixa família (les gramínies), les diferents característiques físiques d'ambdós influeixen en la velocitat en què tenen lloc els processos de pèrdua – guany d'humitat i en els valors d'humitat assolits. Cal veure doncs com això influirà també en el comportament del foc.

Efecte de la humitat del combustible i de l'espècie vegetal en la velocitat de propagació i la geometria de flama

L'efecte del contingut d'humitat del combustible en la propagació del foc és conegut i ha estat àmpliament estudiat (Byram, 1959). Per exemple, Anderson (1969) determinà al laboratori que a mesura que la humitat del combustible augmenta, la temperatura de la flama, la velocitat de propagació i de combustió; i la longitud i gruix de la flama, tendeixen a disminuir.

La velocitat de propagació es veu afectada, a més de pel contingut hídric del combustible, per altres factors com per exemple la quantitat de combustible disponible i les propietats –intrínseques i extrínseques– d'aquest. A la Figura 7.14 ha estat representada gràficament la variació de la velocitat de propagació en funció de la humitat del combustible, diferenciant per espècie vegetal.

De la Figura 7.14 es dedueix que un front de flames que propaga en un llit de blat comú ho fa més ràpidament del que ho faria en un llit de blat dur, si ambdós combustibles presentessin el mateix contingut d'humitat. Si s'analitza com varia la velocitat de propagació en el rang d'humitats del combustible que comprèn valors del 6 % al 11 %, que és on estan distribuïts la majoria dels valors experimentals, s'obté que el blat dur presenta per a una humitat del 11 % una velocitat de propagació un 65 % inferior al valor que presenta quan la humitat és del 6 %. En el cas del blat comú aquesta diferència és del 62 %. Expressat d'una altra forma, un increment d'un punt percentual en la humitat del combustible provoca una disminució en la velocitat de propagació d'un 13,0 % en el cas del blat dur i d'un 12,4 % en el cas del blat comú, en el rang d'humitats comprès entre el 6% i el 11 %. Per tant, la resposta de la velocitat de propagació davant del contingut d'humitat del combustible per ambdues espècies és molt semblant. Aquesta tendència es pot intuir també en el gràfic de la figura anterior ja que les corbes de regressió corresponents als dos combustibles són pràcticament paral·leles. Tot i això, el blat dur presenta una major dispersió d'acord al coeficient de correlació de les dades $-R^2_{B.Dur}=0,73$ enfront $R^2_{B.Comú}=0,82$.

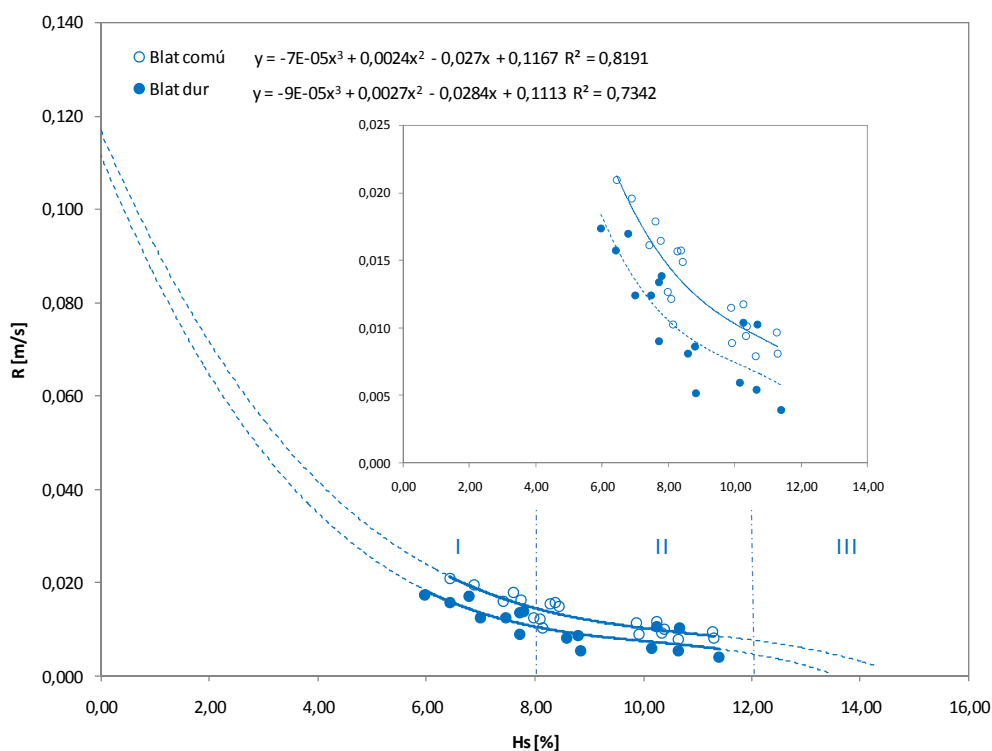


Figura 7.14 Velocitat de propagació en funció de la humitat del combustible per espècies.

A la Figura 7.14 es pot notar també com en la resposta de la velocitat de propagació es poden distingir tres zones amb comportaments diferents. Aquestes zones han estat numerades (I, II i III) i assenyalades mitjançant línies discontinües en el gràfic. En la zona I s'observa una disminució ràpida de la velocitat de propagació quan la humitat del combustible s'incrementa dins l'interval aproximat [0 % - 8 %]. El comportament en la zona III és molt similar al comportament en la zona I, en canvi, en la zona II, corresponent a l'interval d'humitats aproximat [8 % - 12 %], la reducció en la velocitat de propagació es produeix de forma més suau.

Això es pot distingir també si es calcula la reducció en la velocitat de propagació d'acord a les zones proposades, ajustant els intervals a les dades disponibles. Així, en el rang d'humitats [6 % - 8 %] la velocitat es redueix en un 21,5 % pel blat dur i un 19,5 % pel blat comú, per cada punt que augmenta la humitat del combustible. Mentre que en el rang d'humitats [8 % - 11 %] aquests percentatges es redueixen, essent del 12,8 % pel blat dur i del 12,6 % pel blat comú.

Els valors experimentals representats a la Figura 7.14 s'ajusten força bé a la corba característica típica que relaciona velocitat de propagació i humitat del combustible (Anderson, 1969). Tanmateix, cal tenir en compte que els assaigs realitzats en cada escala van involucrar quantitats de combustible diferents. Així, en la Figura 7.15 i en la Figura 7.16 s'ha representat la variació de la velocitat de propagació

segons la humitat del combustible per al blat comú i per al blat dur, respectivament, en les diferents escales experimentals.

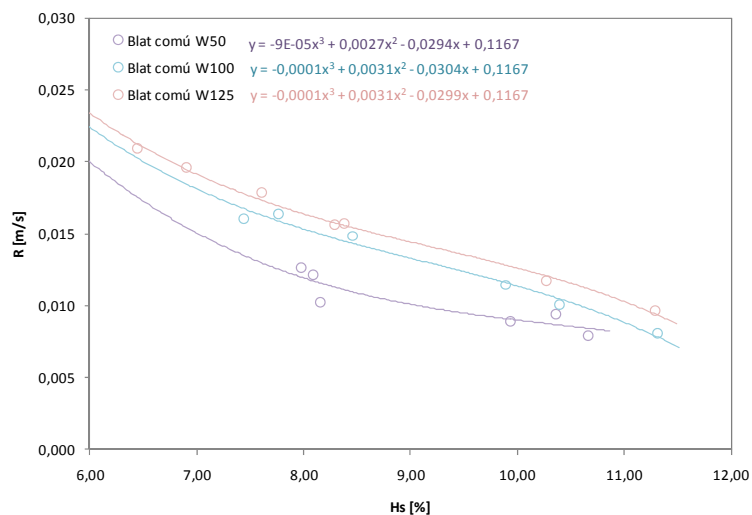


Figura 7.15 Velocitat de propagació segons el contingut d'humitat del combustible per escala experimental en llits de blat comú.

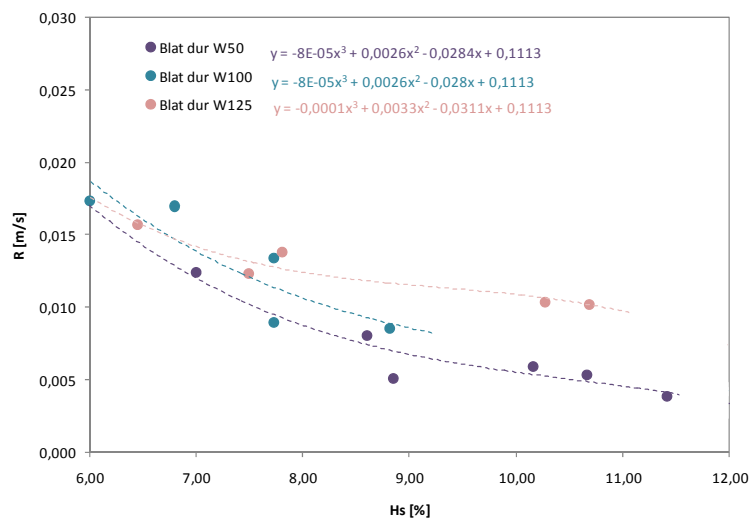


Figura 7.16 Velocitat de propagació segons la humitat del combustible per escala experimental en llits de blat dur.

En el cas del blat comú, la Figura 7.15 mostra com l'efecte de la humitat en la velocitat de propagació varia segons l'escala. Probablement perquè, tal i com s'intueix en la gràfica, els límits de les regions de comportament de la velocitat de propagació en funció de la humitat del combustible, identificades en la Figura 7.14, canvien segons l'escala. Així, mentre que les dades corresponents a les escales W100 i

W125 segueixen tendències molt similars, les dades corresponents a l'escala menor (W50) segueixen una tendència lleugerament diferent. D'aquesta manera, la reducció de velocitat en aquesta darrera escala al augmentar la humitat del combustible a partir del 8 % és més suau que en les altres escales. Això es pot observar numèricament si es compara la reducció de velocitat de propagació en les escales major i menor. En el rang d'humitats [6 % - 8 %] la velocitat de propagació es redueix un 14,9 % i un 20,13 % respectivament per a les escales W125 i W50 per cada punt que augmenta la humitat del combustible. En el rang d'humitats [8 % - 11 %] aquests valors de reducció de la velocitat són del 12,5 % i del 10,6%, per a les escales W125 i W50 respectivament.

En el cas del blat dur (Figura 7.16), la velocitat de propagació presenta un comportament més irregular en relació als canvis en la humitat del combustible. Aquest comportament més irregular és en part una manifestació de la diferent relació superfície - volum que tenen ambdós combustibles, que provoca que l'intercanvi de massa d'aigua amb l'ambient es produeixi més lentament en el blat dur. Per tant, això pot afectar per exemple als mecanismes de preescalfament del combustible i per tant a la velocitat de propagació.

Amb les dades disponibles sembla que el comportament per escales del blat dur sigui invers al del blat comú. És a dir, que les dades corresponents a les escales W50 i W100 segueixen tendències similars i l'escala superior, W125, es comporta diferent. Tanmateix cal anar amb compte, ja que per l'escala W100 les dades disponibles cobreixen un rang molt petit d'humitats, i no es tenen dades per humitats del combustible superiors al 9 %. Això pot provocar que la corba de regressió de les dades no s'ajusti a la tendència real. D'altra banda, aquest comportament invers pot també estar causat perquè els límits de les regions de comportament de la velocitat de propagació en funció de la humitat del combustible, identificades en la Figura 7.14, potser no canvien únicament amb l'escala com ja s'ha intuït en el cas del blat comú, sinó que també varien en funció de l'espècie.

Si s'analitza també en aquest cas com varia la velocitat de propagació per escala experimental, s'obté que en el rang d'humitats del combustible [6 % - 8%] la velocitat es redueix respectivament per a les escales major i menor, un 13,1 % i un 24,9 %, per cada punt que incrementa la humitat. En el rang d'humitats del combustible [8% - 11 %] aquests valors es redueixen fins al 8,8 % i el 15,4 %, respectivament.

De tot això es pot concloure que caldrà tenir en compte la humitat del combustible a l'hora de validar la llei d'escala de la velocitat de propagació, atesa la variació que pot produir aquest paràmetre en els resultats obtinguts. Això serà especialment important en el rang d'humitats del combustible en què s'observen majors variacions de la velocitat de propagació, que per a les dades disponibles correspon a l'interval [6 % - 8 %]. A més, caldrà tenir en compte que en aquest rang l'efecte de la humitat del combustible sobre la velocitat de propagació esdevé més notori en l'escala menor (W50).

Pel què fa a la geometria de la flama en les proves realitzades al LEIF només es pogueren determinar l'altura i la longitud de la flama, però no així el gruix. Atesa la relació lineal que existeix entre l'altura i la longitud de la flama, i que no s'observen diferències significatives entre sèries experimentals (Figura 7.17 a) o per tipus de combustible (Figura 7.17 b), l'anàlisi de l'efecte de la humitat del combustible i l'espècie vegetal en la geometria de la flama, únicament es durà a terme per la longitud de la flama. Se sobreentén doncs, que l'efecte d'aquestes variables en l'altura de la flama és equivalent.

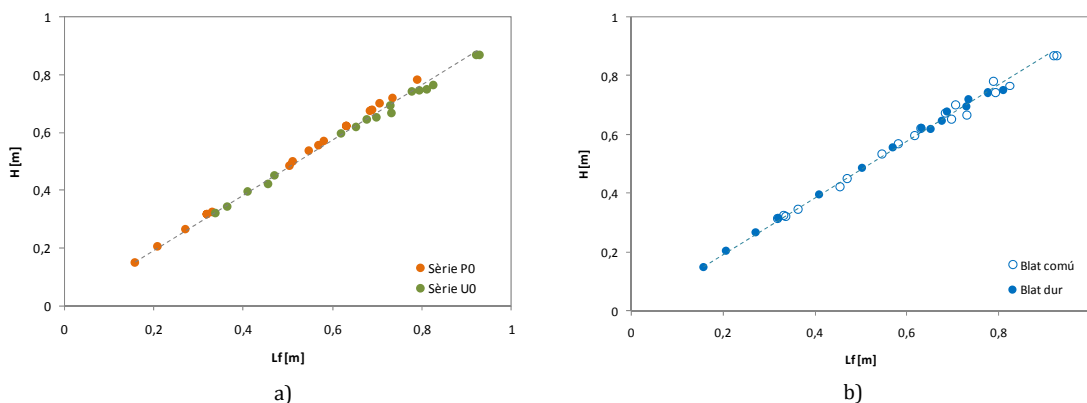


Figura 7.17 Longitud de la flama segons l'altura de la flama. a) Representació per sèrie experimental. b) Representació per tipus de combustible.

Si es representa gràficament la longitud de la flama en funció de la humitat del combustible segons l'espècie vegetal (Figura 7.18) es pot observar que existeix una gran dispersió en les dades, que deixa entreveure que la diferència per escales és considerable, i major que en la velocitat de propagació. Això és degut a que la càrrega de combustible augmenta a mesura que augmenta l'escala, i la longitud de la flama depèn en gran mesura de la quantitat de combustible consumit. Tot i això, s'intueix una tendència decreixent de la longitud de la flama a mesura que augmenta la humitat del combustible. S'observa també com en general, per a valors iguals d'humitat del combustible, la combustió del blat comú genera flames de majors dimensions que la del blat dur.

Si es distingeix per escala experimental i tipus de combustible (Figura 7.19), es fa palès que el comportament per espècies i escala segueix la mateixa tendència com mostren les línies de regressió. A més, si es comparen les dades per escales, s'observen majors diferències entre les escales W50 i W100, que entre les escales W100 i W125. Això és lògic, ja que la relació entre les quantitats de combustible involucrades en cada escala és major al comparar les proves de les escales W50 i W100, que les proves de les escales W100 i W125. D'altra banda, de la mateixa manera que per la velocitat de propagació, s'observa que el comportament del blat comú és més regular enfront als canvis d'humitat, fet que es mostra numèricament en els coeficients de regressió, sempre més elevats pel blat comú.

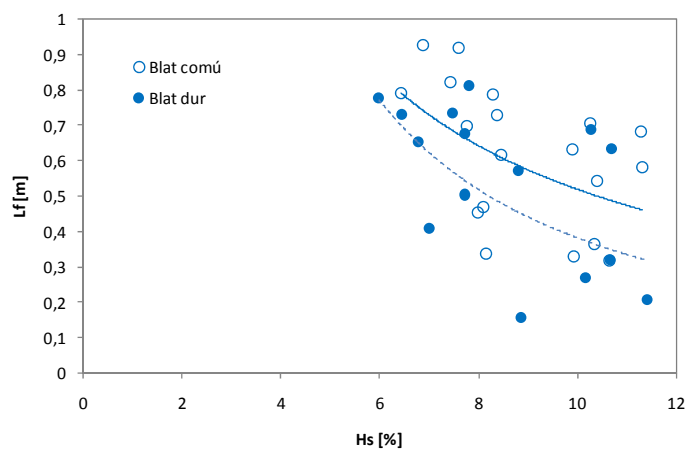


Figura 7.18 Longitud de la flama en funció de la humitat i tipus de combustible.

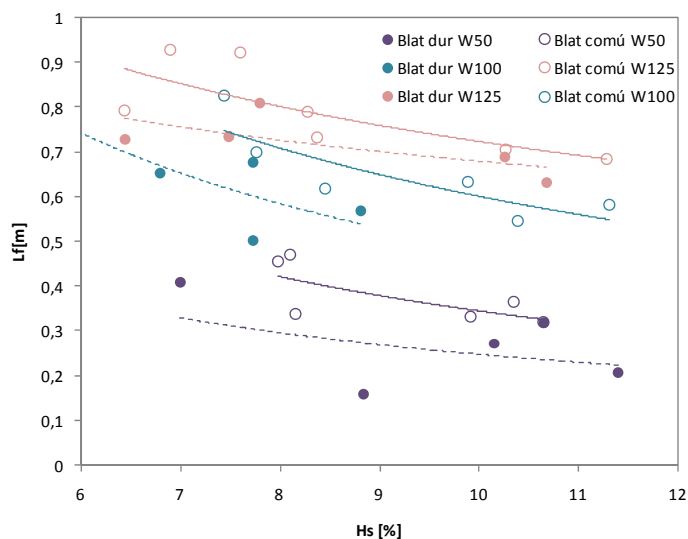


Figura 7.19 Longitud de la flama en funció de la humitat del combustible per escala d'experimentació i tipus de combustible.

La disminució de la longitud de la flama en el cas del blat comú per cada punt que augmenta la humitat del combustible en el rang [6 % - 11 %] és en terme mig del 4,9 % i 8,2 % per a les escales W125 i W50, respectivament. En el cas del blat dur, aquestes variacions són del 3,3 % i 7,6 %. Si es comparen aquests valors amb els equivalents per a la velocitat de propagació, que en aquest rang d'humitat del combustible són del 11,2 % i 11,8 % pel blat comú i del 9,1 % i 14,6 % per al blat dur, respectivament per a les escales W125 i W50, es pot afirmar que l'efecte de la humitat del combustible és més important en la velocitat de propagació que no pas en la longitud de la flama, independentment del

tipus de combustible. A banda, si s'analitzen les diferències per espècie, s'observa que aquestes són menors per a la longitud de flama que per a la velocitat de propagació.

D'aquest estudi es desprèn que la humitat del combustible és un paràmetre essencial a tenir en compte en l'estudi del comportament del foc, i que caldrà tenir-lo en compte a l'hora de validar les lleis d'escala, especialment en el cas de la velocitat de propagació. A més, amb aquest estudi s'ha quantificat l'efecte de la humitat en la velocitat de propagació i en la longitud de la flama per ambdós tipus de combustibles. Això ha permès també analitzar el comportament del blat comú i del blat dur. D'aquesta manera s'ha pogut observar que el blat comú té un comportament més regular pel què fa a la velocitat de propagació i longitud de flama davant dels canvis en la humitat del combustible, possiblement perquè el seu temps de resposta, a causa del valor de relació superfície - volum, és menor que pel blat dur. Per tant, serà important també distingir per espècie vegetal a l'hora d'analitzar els resultats. Per tot això, per validar les lleis d'escala s'analitzaran per separat les sèries de control P0 i U0. No obstant, abans d'això es farà una breu anàlisi de l'efecte de la humitat del combustible i el tipus de combustible en la longitud del front de flames.

Efecte de la humitat del combustible i de l'espècie vegetal en la longitud del front de flames

La longitud del front de flames és la variable característica a partir de la qual s'ha dut a terme l'escalat. És doncs important conèixer també si el contingut d'humitat o tipus de combustible té alguna influència sobre aquesta variable. A la bibliografia no s'han trobat referències on s'estudiï la longitud del front de flames entesa tal i com ha estat definida en aquest treball (vegeu l'apartat 6.2.2). Tanmateix, es poden trobar estudis on s'analitzen altres variables que d'alguna forma estan lligades a la longitud del front de flames, com la curvatura del front (Weber, 1989) o l'anomenada longitud efectiva del front definida a Cheney *et al.* (1993). Tot i la diversitat d'aquests estudis, tant pel què fa a la metodologia com a l'escala d'experimentació en què foren duts a terme, la majoria d'ells té com a objectiu principal avaluar la influència de la longitud del front de flames, d'acord a les definicions pròpies de cada treball o de la corresponent variable homòloga, sobre la velocitat de propagació. Únicament a Cheney *et al.* (1993) assumeixen que la longitud efectiva del front és independent del contingut d'humitat del combustible. No obstant, cal tenir en compte que aquest estudi es va desenvolupar a partir de dades de proves realitzades a camp, i per tant en un escenari experimental completament diferent a l'escenari en què tingueren lloc les proves que s'estan analitzant.

A la Figura 7.20 ha estat representada gràficament la longitud del front de flames en funció de la humitat del combustible, per escala experimental i tipus de combustible. En aquesta figura s'observa que la humitat del combustible no té un efecte significatiu en la longitud del front de flames, en les condicions en què tingueren lloc les proves. A més, tampoc es detecten diferències entre els dos tipus de combustibles. La variació entre els valors màxims i mínims per a les escales W50, W100 i W125 és del 11,84 %, 16,95 % i 11,05 %, respectivament. Aquesta dispersió en les dades es pot considerar part de l'error experimental, ja que les dades presenten una tendència pràcticament constant. El fet que la humitat del combustible no tingui un efecte significatiu en la longitud del front de flames era previsible

d'acord a l'anàlisi estadístic realitzat. Per exemple, el coeficient de variació percentual per escala experimental de la longitud del front de flames il·lustra aquest fet, ja que els valors determinats d'aquest paràmetre estadístic són, ordenats de menor a major escala, 3,98 %, 5,34 % i 4,40 % respectivament.

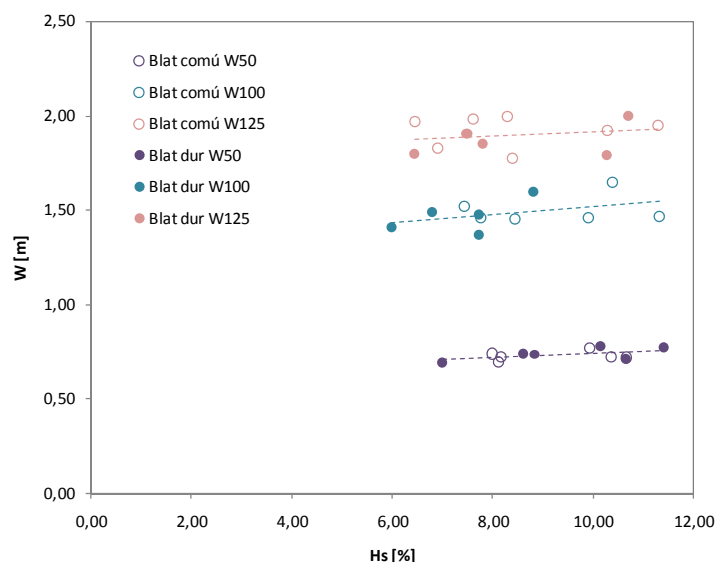


Figura 7.20 Longitud del front de flames en funció de la humitat del combustible, segons tipus de combustible i escala experimental.

Validació de la llei d'escala de la velocitat de propagació

D'acord amb l'equació [4.25], la velocitat de propagació ha d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud característica del sistema, és a dir, amb la longitud del front de flames. A la Figura 7.21 s'han representat gràficament els dos termes d'aquesta llei per a les proves de control dutes a terme a la taula de pendent -sèrie P0-. En la Figura 7.21 a) es pot intuir, tot i la dispersió de punts, una clara tendència lineal. El coeficient de correlació de la recta de regressió és prou elevat $-R^2=0,61-$, però l'ajust dels punts millora al diferenciar per espècies i incloure únicament els punts corresponents a les proves en què el combustible presentà humitats d'entre el 8 % i l'11 % (Figura 7.21 b). En aquest interval d'humitats queden incloses la majoria de proves d'aquesta sèrie. A més, com ja s'ha vist anteriorment, per a aquest rang d'humitats del combustible, les variacions en la velocitat de propagació provocades precisament per canvis en la humitat del combustible són menors.

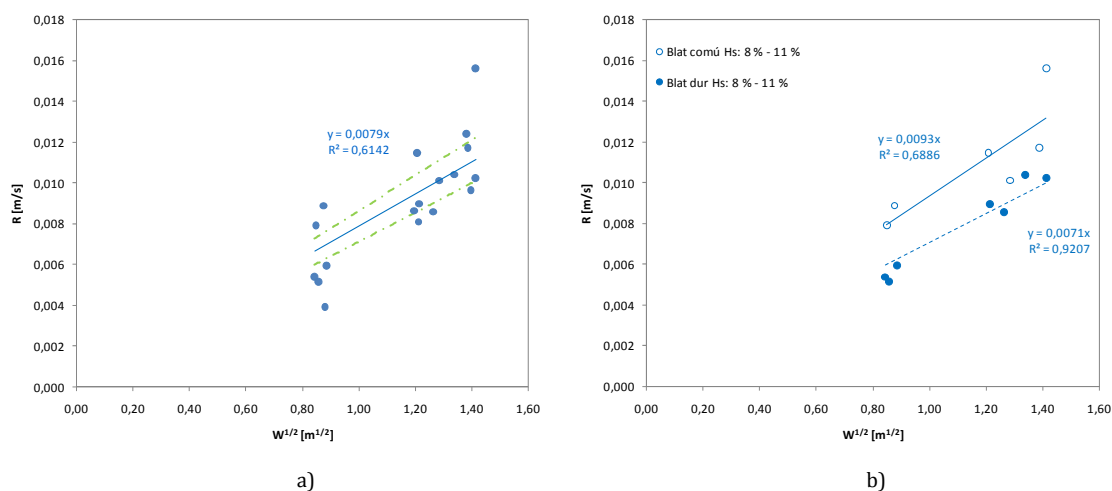


Figura 7.21 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. a) Sèrie P0. b) Proves sèrie P0 amb Hs entre 8 % i 11%.

Si s'analitza el comportament per espècies, el blat dur presenta un coeficient de correlació més alt que el blat comú $-R^2_{B.Dur}=0,92$ enfront a $R^2_{B.Comú}=0,69$. Al revisar més en detall els punts representats per a cada espècie, en el cas del blat dur, per a les diferents escales experimentals el combustible presentà humitats molt semblants amb variacions inferiors a un punt. En canvi, en el cas del blat comú, per exemple entre els punts corresponents a les proves de major dimensió $-W125-$, existeix una diferència de 2 punts en la humitat del combustible que en termes de velocitat de propagació es tradueix en una diferència del 25 %.

La Figura 7.22 a), mostra les dades relatives a les proves de control realitzades al túnel de combustió $-sèrie U0-$. De la mateixa manera que en les proves de la taula de pendent, s'evidencia una tendència clarament lineal entre la velocitat de propagació i l'arrel quadrada de la longitud del front de flames $-R^2=0,70-$. En la Figura 7.22 b) s'ha distingit per espècie i s'ha reduït el nombre de valors representats als corresponents a les proves en què el combustible presentà humitats en el rang de 6,5 % a 8,5 %. Com ja s'ha comentat en apartats anteriors, en les proves realitzades al túnel de combustió, degut a les condicions ambientals, el combustible presentà humitats inferiors que en les proves realitzades a la taula de pendent. Aquest interval d'humitats ha estat seleccionat per tal d'incloure el major nombre possible d'assaigs, ahora que s'ajustés al màxim a les regions de variació de la velocitat de propagació en funció de la humitat del combustible (Figura 7.14). Al reduir el nombre de punts representats, s'observa com succeeix el contrari que en les proves de la taula de pendent, de manera que el blat comú presenta una correlació molt més alta que el blat dur. Els punts representats pel blat dur, presenten variacions d'humitat del combustible per a una mateixa escala de entre un punt i 1,6 punts. La variació màxima d'humitat del combustible tingué lloc en les proves en l'escala menor (W50). En aquesta escala

i rang d'humitats, l'increment d'un punt en la humitat del combustible provoca reduccions en la velocitat de propagació del 24,9 %.

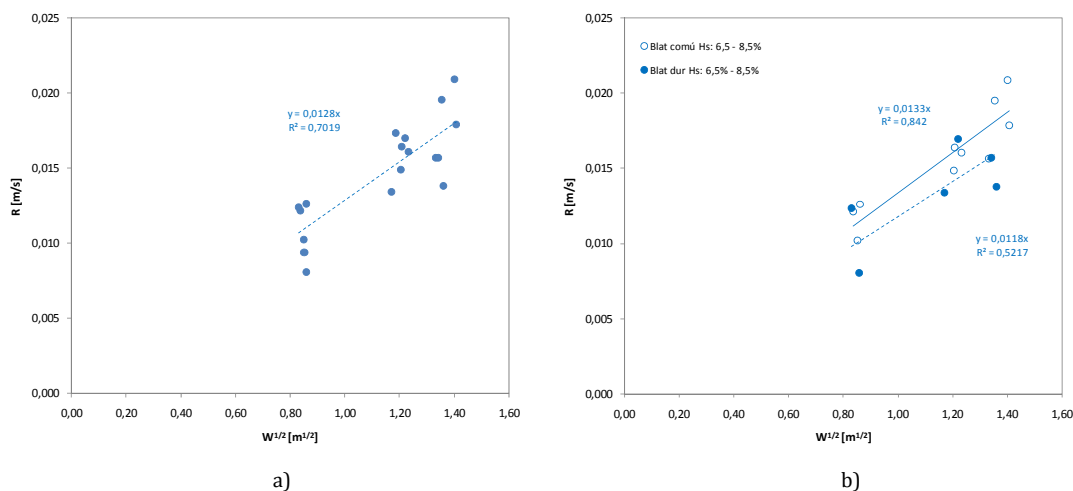


Figura 7.22 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. a) Sèrie U0. b) Proves sèrie U0 amb Hs entre 6,5 % i 8,5%.

La Figura 7.23 presenta de forma conjunta els resultats de les sèries P0 i U0, acotant el rang d'humitat del combustible. En aquesta figura s'il·lustra que l'efecte provocat per la humitat del combustible en la validació de la llei d'escala de la velocitat és un canvi de pendent en la recta de regressió que relaciona la velocitat de propagació amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames, de manera que a mesura que disminueix la humitat del combustible augmenta el pendent d'aquesta recta. D'altra banda, el fet d'utilitzar blat comú o blat dur en els experiments, també provoca un canvi de pendent en la recta de regressió que relaciona la velocitat de propagació i l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

De l'anàlisi de resultats es desprèn que és possible escalar la velocitat de propagació amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames, en les condicions en què tingueren lloc les proves. A més, tot i que es van realitzar les proves amb diferents espècies vegetals, atès que aquestes presentaren característiques molt semblants, la regressió de les dades sense fer distincions per espècies és acceptable.

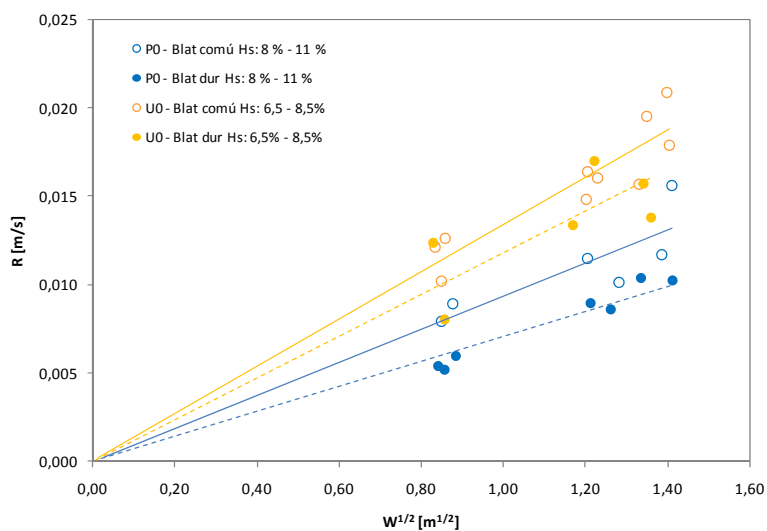


Figura 7.23 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

Validació de la llei d'escala de la geometria de la flama

Tant la longitud, com l'altura de la flama han d'escalar linealment amb la longitud del front de flames (equació [4.20]). Tal i com s'ha vist amb anterioritat, existeix una relació lineal entre l'altura i la longitud de la flama, de manera que només s'analitzarà aquesta darrera variable en la validació de la llei d'escala corresponent a la geometria de la flama. A continuació, en la Figura 7.24 es presenten els resultats obtinguts per a les sèries PO i UO.

Els resultats posen de manifest que existeix una correlació lineal entre la longitud de la flama i la longitud del front de flames. Tot i que el blat comú tendeix a generar flames més altes que el blat dur (Figura 7.24 b i d), les diferències entre ambdós combustibles són mínimes com ja s'havia evidenciat en apartats anteriors. De manera que el fet de separar per combustibles i reduir les proves representades segons un determinat rang d'humitat, no provoca una millora substancial en les coeficients de correlació.

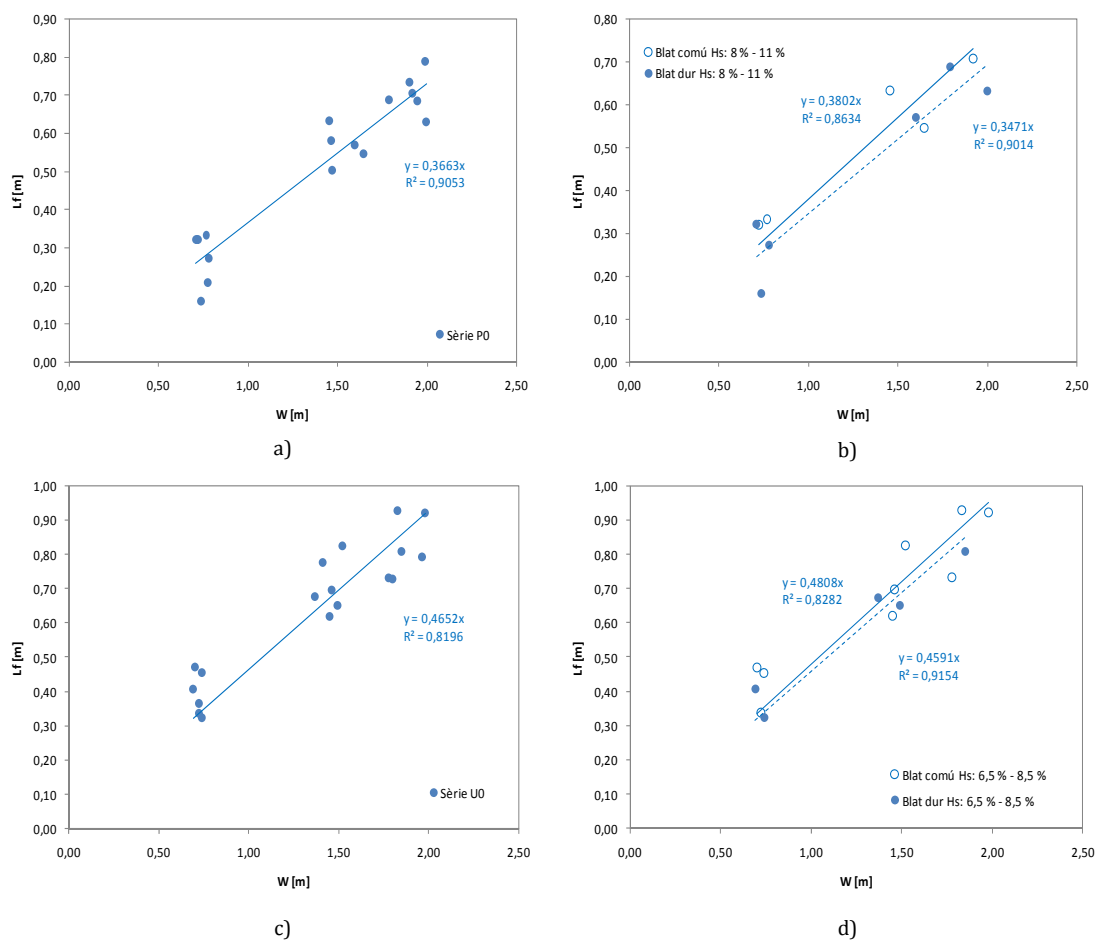


Figura 7.24 Longitud de la flama en funció de la longitud del front de flames. a) Sèrie P0. b) Proves sèrie P0 amb Hs entre 8 % i 11 %. c) Sèrie U0. d) Proves sèrie U0 amb Hs entre 6,5% i 8,5%.

Igual que per a la llei d'escala de la velocitat de propagació, els canvis en la humitat del combustible provoquen canvis en el pendent de la recta que relaciona els termes de la llei d'escala de geometria, de manera que aquest és més pronunciat quan menor és la humitat del combustible (Figura 7.25).

Així, les dades presentades permeten validar la llei d'escala de geometria, en el rang i condicions que tingueren lloc les proves experimentals.

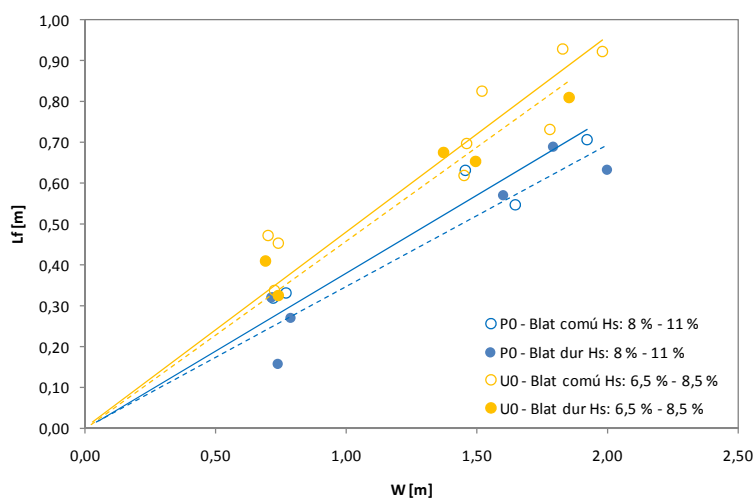


Figura 7.25 Longitud de la flama segons la longitud del front de flames.

Ampliació de l'escala experimental

A banda de les proves dutes a terme a la taula de pendent i al túnel de combustió, al LEIF es realitzaren també dues proves més –sèrie AE–, en una altra instal·lació experimental, la taula d'assaigs en congostos (DE4). Tot i que aquesta taula fou dissenyada per a dur a terme estudis replicant orografies del terreny complexes com congostos, tal i com s'ha detallat al capítol 5, en aquestes proves simplement es va utilitzar la instal·lació sense modificar la seva configuració bàsica de manera que es poguessin realitzar proves de control. L'objectiu d'aquestes proves fou analitzar la validesa de les lleis d'escala al ampliar l'escala de treball, però en el mateix escenari experimental, el laboratori. El combustible disponible per a realitzar els dos assaigs que composaren aquesta sèrie experimental fou el blat comú. Per a més detalls sobre aquestes proves i la instal·lació experimental on es dugueren a terme vegeu l'apartat 5.2.3.

La Figura 7.26 presenta els resultats, quan a la llei d'escala de la velocitat, de les proves de control –sèries P0 i U0– i de les proves de la sèrie AE, agrupades per sèries, rangs d'humitat del combustible i espècie vegetal. Els símbols de color verd corresponen a les dues proves de la sèrie AE. En la figura s'observa com el punt d'aquesta sèrie corresponent a l'escala W100 queda situat en la mateixa zona que ho fan les proves de la sèrie U0 realitzades amb blat comú, en què el combustible presentà humitats dintre el mateix rang de valors que en les proves de la sèrie AE.

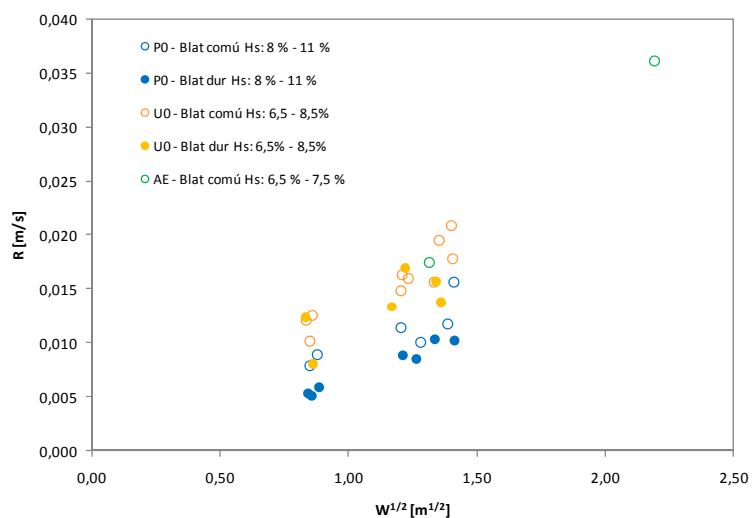


Figura 7.26 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

A la Figura 7.27 han estat representades les proves amb blat comú de la sèrie U0 i les proves de la sèrie AE, així com també la recta de regressió de tots aquests punts.

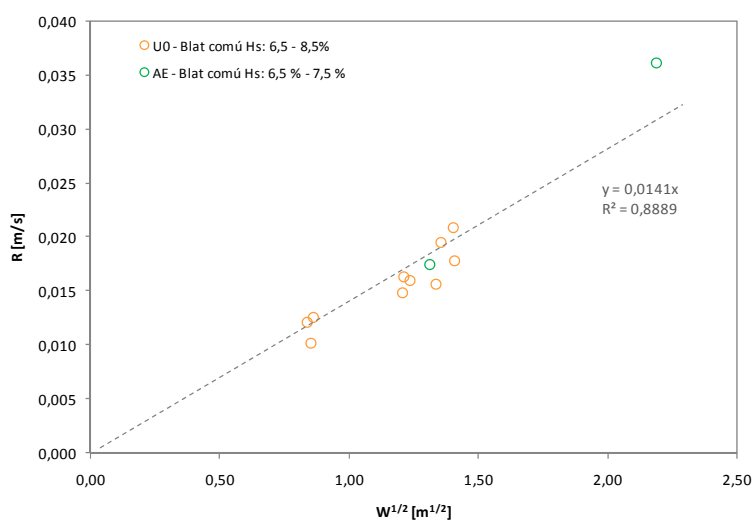


Figura 7.27 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames, sèries U0 pel blat comú i sèrie AE.

Tot i que el coeficient de correlació és prou elevat, pot semblar visualment que el punt corresponent a l'escala major (W250) s'allunya de la recta de regressió més del que ho fan la resta de punts. Si es determina la diferència entre la velocitat de propagació mesurada en aquesta prova i la que hauria de

tenir segons l'equació de la recta de regressió, en resulta que la primera és un 17 % superior a la teòrica.

Malgrat que aquesta diferència pugui semblar significativa, cal tenir en compte que la humitat del combustible mitjana dels punts representats és del 7,6 % mentre que la humitat del combustible en la prova de l'escala W250 és del 6,5 %. Tal i com s'ha vist anteriorment, en aquest rang de valors d'humitat del combustible, petites variacions d'humitat provoquen importants canvis en la velocitat de propagació. Per tal de copsar la magnitud de l'efecte de la humitat del combustible en la velocitat de propagació en aquestes condicions, s'ha utilitzat la corba de regressió que relaciona la velocitat de propagació amb la humitat del combustible pel blat comú en l'escala W125 (Figura 7.15). Segons aquesta equació, la velocitat de propagació que s'assoleix quan el combustible té una humitat del 6,5 % és un 21,2 % superior que quan el combustible té una humitat del 7,6 %. Aquesta dada és prou significativa com per a considerar admissible una diferència del 17 % entre el valor teòric i el valor real de la velocitat de propagació del punt corresponent a l'escala W250 al representar la llei d'escala de la velocitat de propagació, evidentment en aquestes condicions d'humitat del combustible.

Amb tot això es pot afirmar que la prova que es va realitzar per ampliar l'escala d'experimentació (W250) compleix amb la llei d'escala de velocitat. Tanmateix, el fet de tenir únicament una observació no permet extrapolar aquesta conclusió de forma global a aquesta escala experimental, per a fer-ho caldria realitzar més proves.

Pel què fa a la llei d'escala de geometria de flama, la Figura 7.28 mostra la relació entre la longitud de la flama i la longitud del front de flames. Com passava amb la velocitat de propagació, els punts corresponents a la sèrie AE s'ajusten millor a la tendència presentada pels punts corresponents a la sèrie U0 del blat comú.

Si es representen únicament els punts de la sèrie U0 corresponents al blat comú i els punts de la sèrie AE en una nova figura (Figura 7.29) i es traça la recta de regressió s'observa com tots els punts s'ajusten a aquesta. A més, el coeficient de correlació que s'obté és particularment alt. Aquests resultats confirmen les conclusions derivades de l'estudi de l'efecte de la humitat del combustible en la geometria de la flama, on s'ha vist que aquest efecte disminueix a mesura que augmenta l'escala i és molt menor que per a la velocitat de propagació.

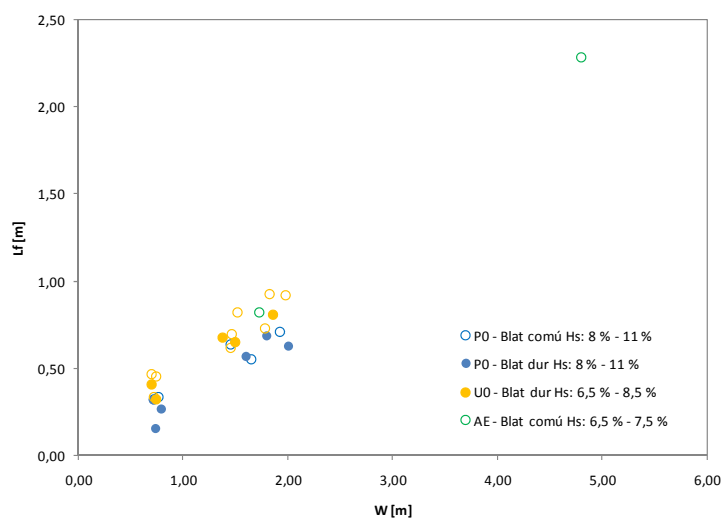


Figura 7.28 Longitud de la flama segons la longitud del front de flames.

Els resultats obtinguts permeten afirmar que per a la prova que es realitzà per ampliar l'escala d'experimentació, es compleix la llei d'escala de geometria. No obstant, com en el cas de la llei de velocitat de propagació, el fet de tenir un únic punt no permet generalitzar aquests resultats a l'escala experimental. Per a això, caldria realitzar més proves.

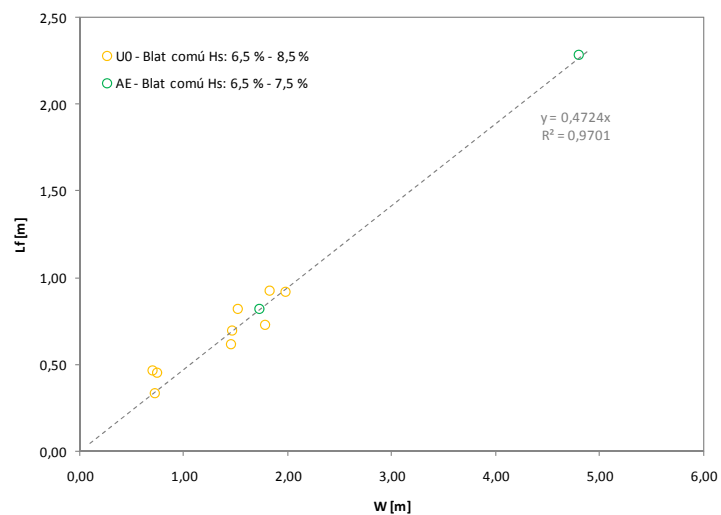


Figura 7.29 Longitud de la flama segons la longitud del front de flames, sèries U0 pel blat comú i sèrie AE.

Comparació amb els resultats del CERTEC

En aquest apartat s'analitzen de forma conjunta els resultats de les proves realitzades al LEIF amb fronts de flama bàsics (sèries P0, U0 i AE) amb les proves realitzades al CERTEC (sèrie C0). L'objectiu d'aquesta anàlisi és estudiar l'efecte provocat per les diferències entre espècies vegetals, metodologies i instal·lacions experimentals en el compliment de les lleis d'escala. La Figura 7.30 i la Figura 7.31 presenten respectivament els resultats de les lleis d'escala de velocitat de propagació i geometria.

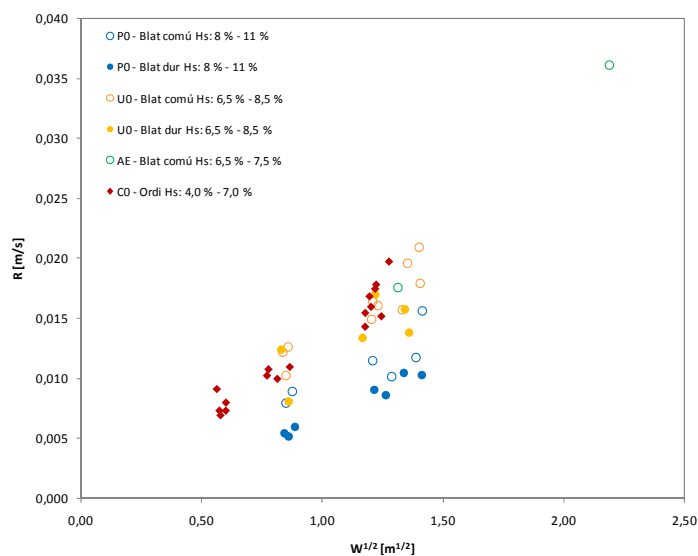


Figura 7.30 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

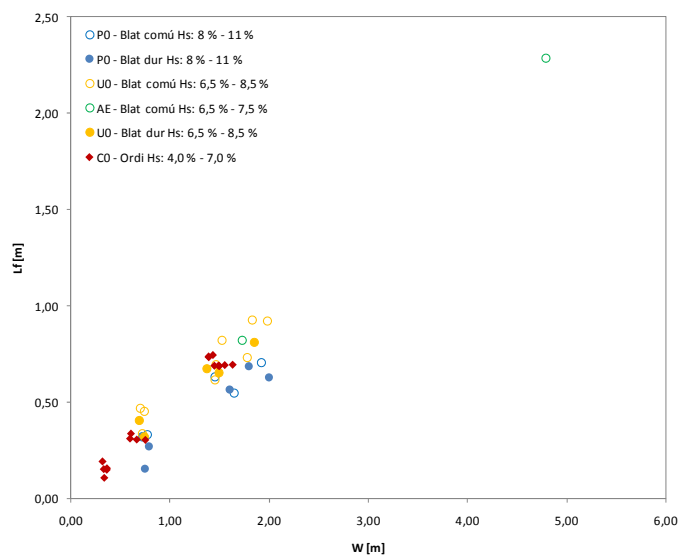


Figura 7.31 Longitud de la flama segons la longitud del front de flames.

Com es pot observar en les figures anteriors, tant pel què fa a la velocitat de propagació com a la longitud de flama, els punts de la sèrie C0 queden alineats amb els punts de les sèries U0 i AE. Si es para atenció únicament a la humitat del combustible, aquest fet pot sobtar ja que la humitat mitjana de les proves de la sèrie C0 fou del 5,8 % mentre que per a les proves de la sèrie U0 i AE fou del 7,6 %. D'aquesta manera, s'esperaria que en les mateixes escales experimentals s'assolissin velocitats de propagació i valors de longitud de flama majors en les proves de la sèrie C0. No obstant, cal tenir en compte que les proves de la sèrie C0 es dugueren a terme amb palla d'ordi. Aquesta espècie presenta unes característiques diferents a la palla de blat dur i la palla de blat comú (Taula 5.4 i Taula 5.9). La palla d'ordi té una relació superfície - volum major que la palla de blat, fet que li confereix una major facilitat per a guanyar i perdre aigua de manera que s'afavoreixen els processos de preescalfament del combustible. Tanmateix, també té una densitat de partícula major, aproximadament el doble, que la de la palla de blat. Aquest paràmetre afecta a la velocitat de propagació, de manera que a major densitat de partícula, menor velocitat d'avanç (Catchpole *et al.*, 1998). Així, un factor contraresta l'efecte de l'altre.

D'aquesta anàlisi es pot concloure que en la propagació de fronts de flama bàsics, les instal·lacions i metodologies experimentals emprades no tingueren un efecte directe en la validació de les lleis d'escala de propagació i geometria de flama. Tanmateix, s'ha observat que sí que afectaren a l'estat del combustible i les condicions ambientals, i per tant incidiren en els valors absoluts obtinguts de velocitat de propagació i longitud de flama. No s'observà influència d'aquests factors en la longitud del front de flames. Pel què fa a l'efecte de l'espècie vegetal, l'ús de distintes espècies suposa l'incompliment de les hipòtesis sota les quals es formularen les lleis d'escala aplicables als blocs experimentals de laboratori i això pot comprometre la validació d'aquestes, especialment la llei de velocitat. Per altra banda, l'ús d'una o altra espècie provoca l'obtenció de diferents equacions d'escala, és a dir, el coeficient que acompanya al terme independent de la llei d'escala és diferent segons el tipus de combustible i la seva humitat.

7.2.2. Resultats de les proves amb pendent

L'efecte del pendent en la propagació del foc ha estat poc estudiada en comparació amb l'efecte d'altres factors com és el cas del vent. Per tal d'avaluar l'efecte del pendent en la propagació, es dugueren a terme tres sèries experimentals amb pendent -P10, P20 i P30-, més una sèrie de control -P0- a la taula de pendent. En aquest apartat s'analitza la validesa de les lleis d'escala de velocitat de propagació i geometria per a aquestes sèries.

Validació de la llei d'escala de la velocitat de propagació

La Figura 7.32 recull els resultats obtinguts per a totes les sèries de pendent. A més, han estat inclosos també en aquest gràfic els resultats de les proves de control -sèrie P0- per a disposar d'una referència del comportament presentat pel foc en absència de pendent.

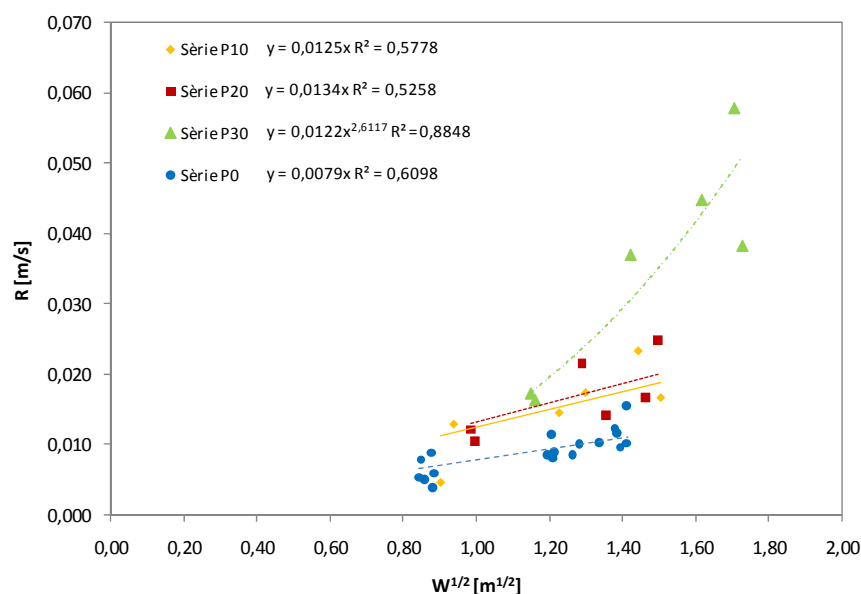


Figura 7.32 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames.

En primera instància, una anàlisi bàsica dels resultats apunta que el comportament per a les sèries P0, P10 i P20 segueix una tendència lineal, mentre que la sèrie P30 presenta un comportament no lineal, que s'ajusta a una tendència potencial. Tanmateix, hi ha un parell de punts de la sèrie P30 que es podrien considerar part del núvol central de punts format per les dades de les sèries P10 i P20. Un altre fet que es pot detectar a partir de la gràfica de la Figura 7.32 és el canvi en la longitud del front a causa del pendent. A mesura que augmenta el pendent el front va adquirint una major curvatura i conseqüentment té una major longitud.

A partir de la gràfica de la Figura 7.32 no es detecten pràcticament diferències entre les sèries P10 i P20. Així mateix, la distància entre els punts de la sèrie P0 amb alguns punts de les sèries P10 i P20 és mínima, arribant fins i tot a alinear-se en alguns casos. D'aquesta manera, semblaria que l'efecte del pendent no és significatiu en fronts propagant-se en superfícies inclinades fins a 20° , i que en termes de l'escalat no s'observarien diferències. No obstant, si s'analitzen més en detall les dades d'aquestes tres sèries distingint per espècie vegetal (Figura 7.33) es detecta com per a cada combustible la velocitat de propagació augmenta amb el pendent.

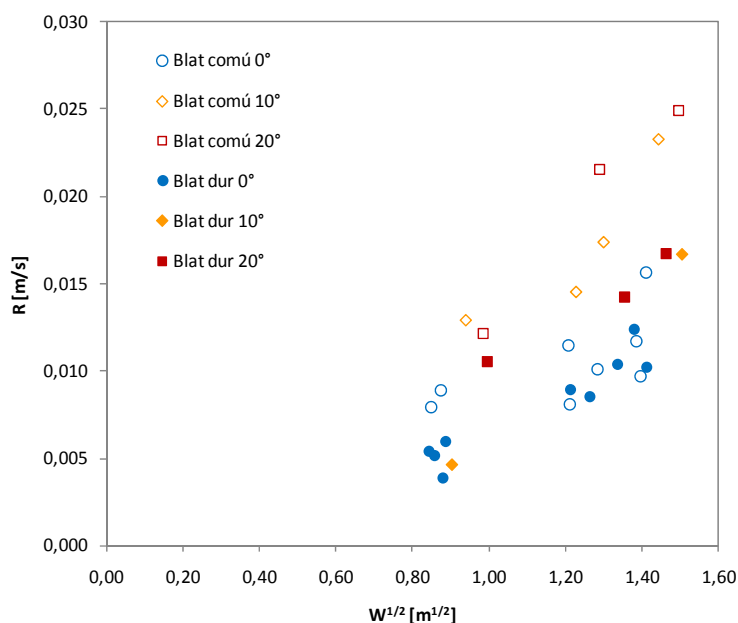


Figura 7.33 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames per a les sèries P0, P10 i P20.

Per això, a continuació s'analitzen per separat els resultats corresponents a cada tipus de combustible per a aquestes sèries experimentals, entrant en detall en les condicions específiques en què tingueren lloc les proves.

En el cas del blat comú, a la Figura 7.34 han estat representades les sèries P0, P10 i P20, eliminant aquells punts corresponents a les proves amb valors d'humitat del combustible més distanciat de la mitjana de la sèrie. Així, els valors mitjans d'humitat del combustible per als punts representats de les sèries P0, P10 i P20 són respectivament 9,9 %, 8,9 % i 10,6 %. Si es compara la velocitat de propagació de les sèries P0 i P10 a partir de les respectives rectes de regressió, s'observa que aquesta és en terme mig un 58 % superior quan el pendent de la superfície per on avança el foc és de 10°. De la mateixa forma, si es comparen les dades de les sèries P10 i P20, es troba que la velocitat de propagació és un 10 % superior quan el pendent és de 20°. Per últim, si s'analitzen les sèries P0 i P20, s'obté que la velocitat de propagació de la sèrie P20 és un 70 % superior a la de la sèrie P0. D'aquestes observacions es pot concloure, tenint en compte les diferències d'humitat entre sèries i agafant com a referència la humitat del combustible que presenta la sèrie de control (9,9 %), que per a fronts propagant-se en llits de palla de blat comú quan el pendent del terreny és de 10° o 20°, les velocitats d'avanç que s'assoliran en relació a la velocitat que tindria un front de flames bàsic, seran superiors al 58 % i al 70 %, respectivament. Tot això, mantenint les condicions ambientals i l'escala experimental en els rangs en què tingueren lloc les diferents sèries experimentals de pendent.

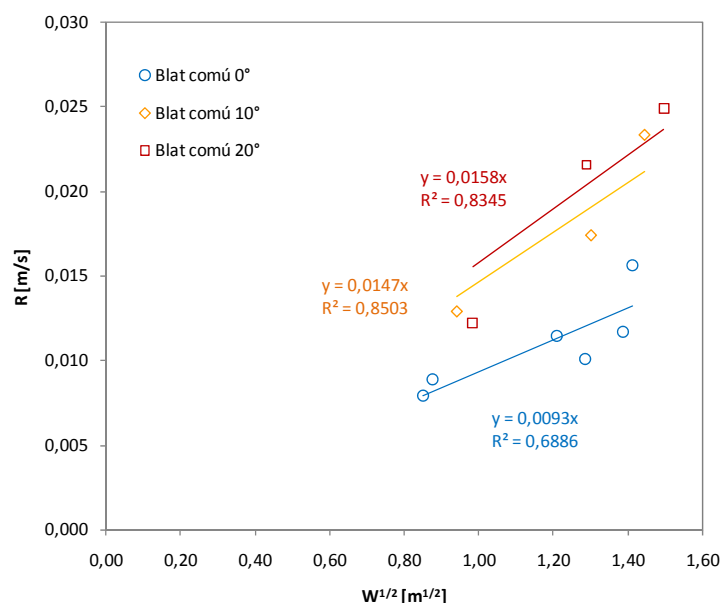


Figura 7.34 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames pel blat comú.

A la Figura 7.34 s'observa com per a les sèries P10 i P20 hi ha dues parelles de punts que es troben molt pròximes. Els punts corresponents a l'escala d'experimentació superior, que equivalen a les proves W125_p10_10 i W125_p20_20, estan pràcticament alineats de manera que el punt corresponent a la sèrie P10 es situa sobre la línia de regressió dels punts de la sèrie P20. Per tant, els canvis en les condicions en què tingueren lloc les proves (Taula 7.3) provocaren que no s'observin diferències a causa del pendent en la velocitat de propagació.

Atès que es considera que les condicions ambientals afecten únicament a la humitat d'equilibri del combustible ja que no és possible analitzar el seu efecte en la propagació independentment dels canvis provocats en la humitat, llavors en base a això es pot afirmar que una reducció de dos punts en la humitat del combustible té un efecte equivalent a augmentar el pendent de la superfície per on avança el foc de 10° a 20°. Evidentment, cal anar en compte a l'hora d'extrapolar aquesta conclusió a situacions distintes, especialment pel què fa als valors d'humitat del combustible, condicions ambientals, tipus de combustible i escala experimental. Com a referència, aquest increment de dos punts en la humitat del combustible –del 8,4 % al 10,4 %– provocaria en proves de control dutes a terme en aquesta escala (W125) i amb palla de blat comú una disminució de la velocitat de propagació del 24,3 % d'acord a les equacions de la Figura 7.15. Així, es pot suposar que l'efecte que tindrà en la velocitat de propagació el fet d'incrementar el pendent de 10° a 20° per a aquest combustible i en aquesta escala serà com a mínim igual a un increment del 24,3 %.

Taula 7.3. Recull de dades de diverses proves de les sèries P10 i P20.

Prova	Ta [K]	HR [%]	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
Sèrie P20 - W125_p20_20	297	49	10,4	0,025	2,140
Sèrie P10 - W125_p10_10	306	28	8,4	0,023	2,083

Pel què fa als punts corresponents a l'escala d'experimentació inferior –proves W50_p10_10 i W_50_p20_20–, té lloc el fenomen contrari al cas anterior, de manera que el punt corresponent a la sèrie P20 avança pràcticament a la mateixa velocitat que els punts de la sèrie P10. En la Taula 7.4 es resumeixen les condicions en què tingueren lloc aquestes proves i també els resultats obtinguts per a la velocitat de propagació i la longitud del front de flames. Al igual que en el cas anterior, si es considera que les condicions ambientals únicament incideixen en la humitat d'equilibri del combustible, es pot considerar per aquest exemple concret que un front propagant-se per una superfície inclinada 20° ho farà a la mateixa velocitat que un front propagant-se per una superfície inclinada 10° en què la humitat del combustible sigui 1,7 punts inferior. En fronts de flames bàsics propagant en llits de blat comú en aquesta escala experimental, aquesta diferència en la humitat del combustible provocaria una reducció en la velocitat de propagació del 16,2 %. D'aquesta manera, com en el cas anterior es podria considerar que l'efecte que tindria sobre la velocitat de propagació el fet d'incrementar el pendent de 10° a 20° pel blat comú en l'escala W50, serà un increment en la velocitat de propagació de com a mínim un 16,2 %.

Taula 7.4. Recull de dades de diverses proves de les sèries P10 i P20.

Prova	Ta [K]	HR [%]	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
Sèrie P20 - W50_p20_20_2	297	57	11,1	0,012	0,968
Sèrie P10 - W50_p10_10	301	34	9,4	0,013	0,883

Si es comparen els resultats per a les dues escales estudiades, semblaria que l'efecte del pendent és menor en l'escala W50. Tanmateix, amb les dades disponibles no és possible distingir si aquesta diferència és causada pel pendent, o per la humitat del combustible, que com s'ha vist anteriorment té diferents repercussions en la velocitat de propagació segons l'escala.

A la Figura 7.35 es presenten els resultats pel blat dur. Cal notar que per aquest combustible es disposa de menys dades per a la sèrie P10, fet que no permetrà realitzar una anàlisi tan detallada. Pel què fa als valors mitjans de la humitat del combustible per a les sèries P0 i P20, són 9,6 % i 9,5 % respectivament. En el cas de la sèrie P10, els dos punts representats presenten humitats del 11,5 % i 9,6 %. A efectes pràctics, es pot considerar que les sèries P20 i P0 tenen el mateix valor d'humitat del combustible, ja que la disminució de 0,1 punts en la humitat del combustible provoca una reducció en la velocitat de propagació del 1,5 % d'acord a la relació general entre la velocitat de propagació i la humitat del combustible, és a dir, sense fer distincions per escala, trobada per a les proves de control amb blat dur (Figura 7.14).

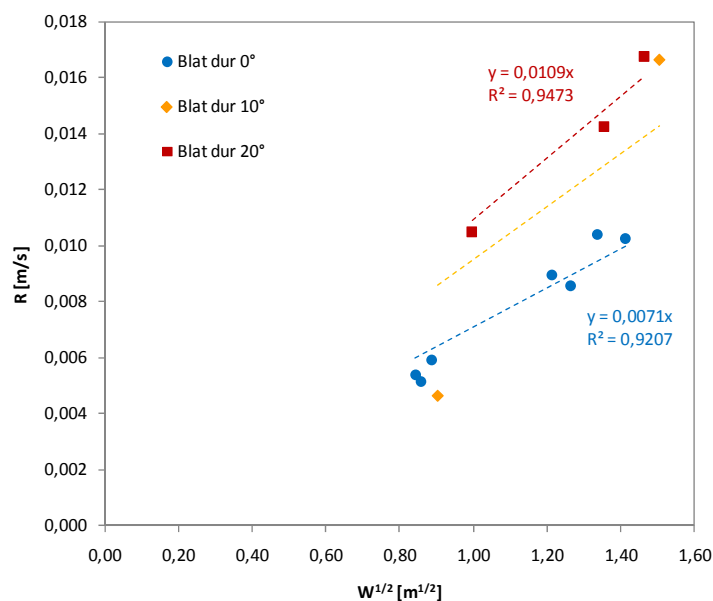


Figura 7.35 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames pel blat dur.

Si es consideren les velocitats de propagació en terme mig d'ambdues sèries, s'obté que si la superfície per on avança el foc té un pendent de 20° la velocitat de propagació és un 54 % més elevada que quan la superfície no està inclinada. D'acord a això, si es compara aquest valor amb l'obtingut per al blat comú, superior al 70 % en referència a humitats del combustible del 9,9 %, es detecta que el fet que la superfície per on avança el foc estigui inclinada 20° té un efecte més acusat en aquesta darrera espècie, de manera que l'increment de la velocitat de propagació provocat pel pendent és més elevat. Això pot estar relacionat novament amb les característiques que presenten ambdós combustibles de relació superfície - volum. Al incrementar el pendent de la superfície per on avança el foc, el factor de vista del combustible adjacent al que s'està cremant augmenta de manera que s'afavoreixen els processos de preescalfament del combustible. Durant el preescalfament del combustible aquest allibera la humitat, de manera que si la relació superfície - volum és major, aquesta fase del procés de combustió tindrà lloc més ràpidament. Dupuy (1995) observà també diferències segons espècies vegetals, en fronts propagant en superfícies igualment inclinades.

Com en el cas del blat comú, a la Figura 7.35 s'observa com els dos punts corresponents a la sèrie P10 queden alineats o bé amb les dades de la sèrie P20 o P0. Així, s'estudiaran més en detall aquests dos casos. La Taula 7.5 recull les dades corresponents a les proves dutes a terme amb blat dur en l'escala W125 amb inclinacions de la superfície d'avanç de 10° i 20°. En aquest cas, una diferència de 0,7 punts en la humitat del combustible és suficient per a què el front de flames propagant-se en una superfície inclinada 10° ho faci a la mateixa velocitat que si la superfície estigués inclinada 20°. Per al blat dur, en l'escala W125, el fet que el combustible presenti una humitat del 10,3 % o del 9,6 % implica que un

front de flames bàsic avançaria un 7,45 % més ràpid en el darrer cas en relació a la velocitat amb que ho faria en un combustible d'humitat igual a 10,3 %.

Taula 7.5. Dades corresponents a proves de les sèries P10 i P20.

Prova	Ta [K]	HR [%]	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
Sèrie P20 - W125_p20_20	295	65	10,3	0,017	2,140
Sèrie P10 - W125_p10_10_2	299	48	9,6	0,017	2,264

Pel què fa a les proves realitzades en l'escala menor, W50, la Taula 7.6 presenta els resultats que s'obtingueren i les condicions en què tingueren lloc la prova corresponent a la sèrie P10 i el punt més proper de la sèrie P0 representats en la Figura 7.35. D'acord a les dades presentades en aquesta taula el fet que el combustible presenti una humitat del 11,5 % provoca que quedi emmascarat l'efecte de la inclinació de la superfície per on avança el foc (10°), de manera que aquest avança aproximadament a la mateixa velocitat que ho fa en una superfície plana quan la humitat del combustible és del 10,2 %. Pel què fa a l'ordre de magnitud que tindria l'efecte de l'increment del pendent de 0° a 10° en la velocitat de propagació, en aquest rang d'humitats, es pot considerar com a mínim igual, en percentatge, al que s'observa en les proves de control. En aquest cas, la velocitat de propagació és un 20,7 % superior per quan la humitat del combustible és igual al 10,2 % en comptes del 11,5 %.

Taula 7.6. Recull de dades de proves de les sèries P0 i P10.

Prova	Ta [K]	HR [%]	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
Sèrie P0 - W50_p0_30_2	299	48	10,2	0,006	0,783
Sèrie P10 - W50_p10_10_2	294	60	11,5	0,005	0,817

Com en el cas del blat comú, si es comparen els resultats en les diferents escales, s'observen diferents tendències. Tanmateix, amb les dades disponibles no és possible determinar si aquestes diferències són causades pel efecte del pendent o de la humitat del combustible.

A continuació, s'analitza més detingudament l'efecte del pendent segons l'espècie atès que amb aquest estudi i també d'acord a la bibliografia s'ha observat que l'efecte del pendent en la velocitat de propagació pot ser distint segons les característiques de l'espècie vegetal emprada en l'experimentació. Per això, a la Figura 7.36 a) i b) s'han representat les dades per ambdós tipus de combustible per als pendents de 10° i 20°, respectivament.

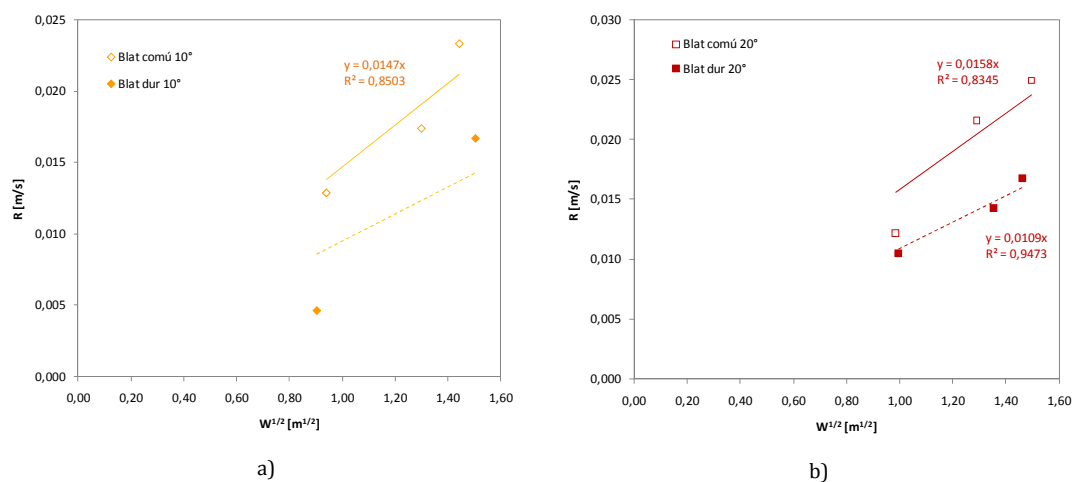


Figura 7.36 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames diferenciant per espècie vegetal. a) Sèrie P10. b) Sèrie P20.

Si es compara la resposta de cada tipus de combustible quan el pendent presenta el mateix valor cal també tenir en compte les condicions en què tingueren lloc les proves. Quan el pendent presenta un valor de 10° la humitat mitjana de les dades representades és de 8,9 % pel blat comú i de 10,5 % pel blat dur. Tot i que com ja s'ha observat, en el cas del blat comú únicament es disposa de dades per a les escales W50 i W125, on les humitats del combustible foren certament distintes, amb valors de 11,5 % i 9,6 % respectivament en cada escala. D'aquesta manera, si es comparen els pendents de les rectes de regressió d'ambdues sèries s'obté que en el cas del blat comú, el foc avança un 54,7 % més ràpid. Tanmateix, tenint en compte la diferència d'humitat d'ambdós tipus de combustibles, és d'esperar que en iguals condicions d'humitat, per exemple prenent com a referència la humitat del blat comú, la diferència en la velocitat de propagació d'ambdós espècies sigui menor.

Pel què fa a les dades corresponents a quan el foc avança per una superfície inclinada 20°, les proves dutes a terme amb blat comú presentaren una humitat mitjana del 10,6 % mentre que en les proves realitzades amb blat dur fou del 9,5 %. Per a aquestes condicions, el foc propaga un 45 % més ràpid en els llits de blat comú que en els llits de blat dur. Com en el cas anterior, si es pren un valor d'humitat del combustible com a referència, per exemple la del blat dur que és la menor, llavors és d'esperar que aquesta la diferència observada entre les dues espècies sigui superior. Per tant, aquí se que es poden observar diferències causades pel pendent.

Pel què fa a les dades corresponents als focs que propagaren en pendents de 30°, tal i com s'ha comentat inicialment no segueixen una tendència lineal, sinó que s'ajusten millor a una tendència potencial. Tot seguit s'analitzaran més en detall les possibles causes d'aquest fet, que deriva en que la llei d'escala de velocitat no es pugui validar amb les dades corresponents a pendents de 30°. Per a això, la Taula 7.7 recull les dades corresponents a les condicions en què tingueren lloc les proves de la sèrie

P30, així com els resultats que s'obtingueren quan a velocitat de propagació i longitud del front de flames.

Taula 7.7. Dades de proves de les sèries P30.

Prova	Espècie vegetal	Ta [K]	HR [%]	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
W50_p30_30	Blat dur	302	43	8,4	0,016	1,346
W50_p30_30_2	Blat dur	300	44	9,1	0,017	1,319
W100_p30_30	Blat dur	301	30	8,0	0,037	2,024
W125_p30_30	Blat dur	306	23	7,5	0,058	2,915
W100_p30_30_2	Blat comú	302	47	9,8	0,045	2,618
W125_p30_30_2	Blat comú	296	51	10,7	0,038	2,992

A partir d'aquestes dades es pot observar que les proves corresponents a les escales majors –W100 i W125–, presentaren humitats considerablement inferiors, de manera que es pot arribar a pensar que això pot ser una de les causes per les quals no es verifica la llei d'escala. A més, cal destacar que a l'hora de calcular la velocitat de propagació i la longitud del front de flames en l'escala W125 s'observà que l'estat estacionari no s'assolia, de manera que els valors representats a les figures anteriors no corresponen a estats estacionaris. La següents figures il·lustren aquest fet (Figura 7.37 i Figura 7.38)

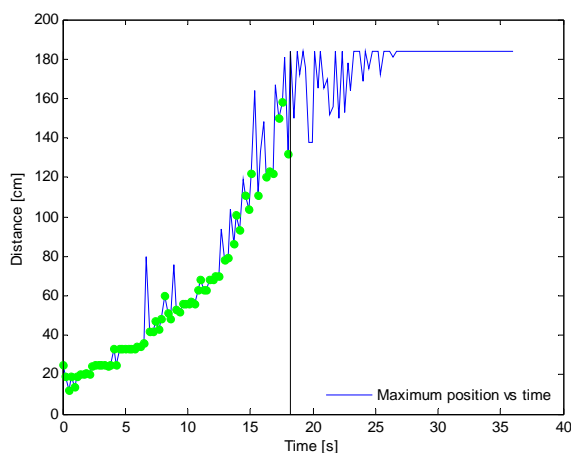


Figura 7.37 Posició del front de flames en funció del temps per a la prova W125_p30_30.

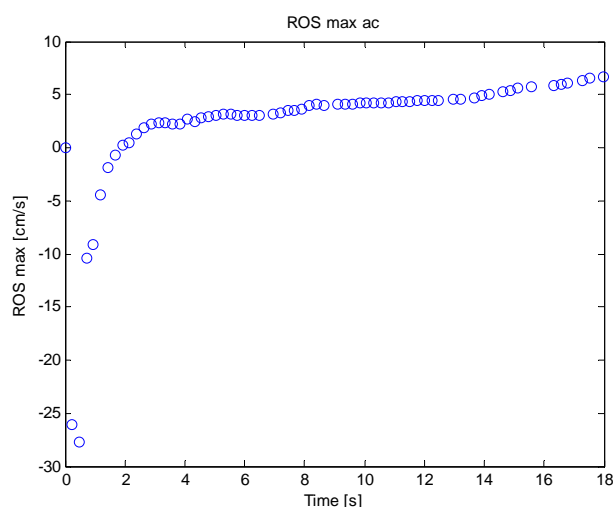


Figura 7.38 Velocitat de propagació en funció del temps per a la prova W125_p30_30.

Diversos són els autors que han observat comportaments no estacionaris en fronts propagant en superfícies inclinades. Existeixen diferents idees al respecte d'aquest comportament en la comunitat científica. D'una banda els autors que relacionen aquest tipus de comportament amb llits de combustible amb una longitud insuficient per a permetre que el front assoleixi un estat estacionari de propagació (Byram *et al.*, 1964, Weise, 1993), i per altra banda, els autors que proposen que el comportament del foc en superfícies inclinades, especialment quan aquesta inclinació esdevé pronunciada, és de naturalesa no estacionària, de manera que es poden arribar a observar fenòmens de ràpida acceleració, detallats en la bibliografia com a *comportaments eruptius o explosius* segons la referència consultada.

Amb les dades disponibles en aquest treball no és possible discernir sobre aquesta dualitat d'idees, però és cert que la tendència de les dades fa pensar que per als tipus de combustibles utilitzats i les especificacions dels llits de combustible, si els llits haguessin estat més llargs s'haguessin assolits probablementment valors estacionaris.

Validació de la llei d'escala de la geometria de la flama

La Figura 7.39 i la Figura 7.40, mostren la relació existent entre la longitud de la flama i la longitud del front de flames de les proves amb pendent pels dos combustibles utilitzats, blat comú i blat dur respectivament. Tot i que en ambdós casos es mostra quins punts corresponen a cada sèrie, és a dir a cada pendent, es pot observar com la llei d'escala es compleix en tots els casos, independentment del pendent utilitzat.

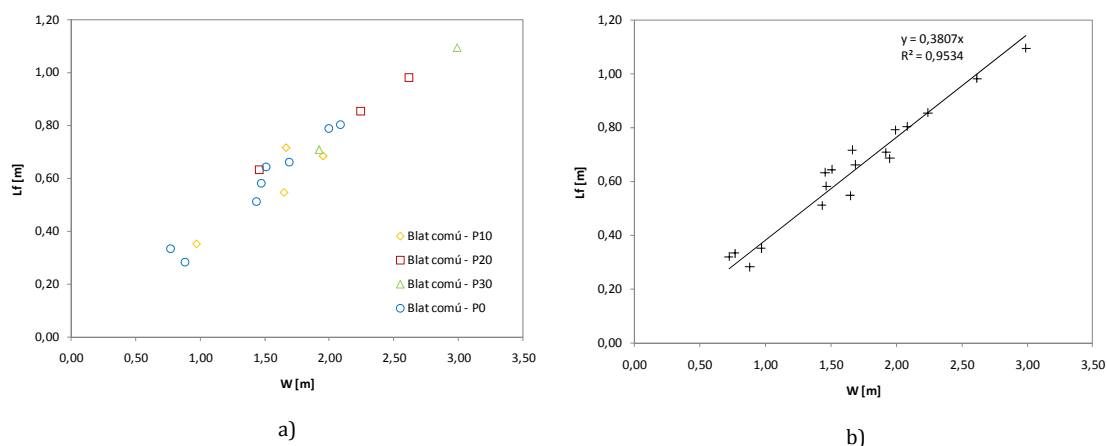


Figura 7.39 Longitud de flama segons la longitud del front de flames pel blat comú. a) Diferenciació per sèrie. b) Representació de totes les proves.

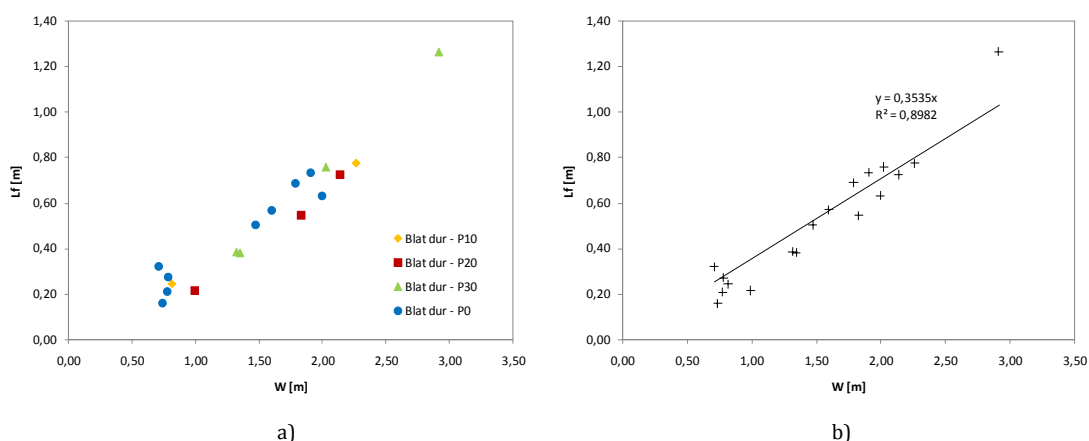


Figura 7.40 Longitud de flama segons la longitud del front de flames pel blat dur. a) Diferenciació per sèrie. b) Representació de totes les proves.

La Figura 7.41 mostra l'anàlisi conjunta de les dades corresponents a totes les sèries de pendent sense distingir per espècie vegetal, de forma que es pot observar que les dades s'ajusten a una recta i que el coeficient de correlació que s'obté és molt alt ($R^2=0,92$). Aquest fet implica que l'error que es comet al agrupar les dades d'ambdós tipus de combustibles per a validar la lleis d'escala corresponent a la longitud de flama es pot considerar negligible. Això es deu a que els tipus de combustibles estudiats generen flames similars quant a geometria, contràriament al que succeeix amb la velocitat de propagació.

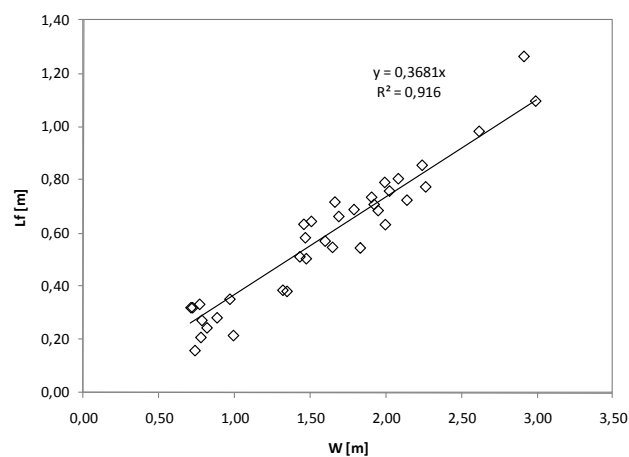


Figura 7.41 Longitud de flama segons la longitud del front de flames per a les sèries P0, P10, P20 i P30.

D'altra banda, pel que fa a l'altura de la flama, la Figura 7.42 i la Figura 7.43 mostren com també l'altura de la flama compleix la llei d'escala per ambdós combustibles i tots els pendents utilitzats. A l'analitzar totes les dades conjuntament sense distingir ni per espècie ni per sèrie experimental (Figura 7.44), s'observa com s'obté una correlació de les dades prou bona ($R^2=0,89$) tal i com succeeix amb la longitud de la flama.

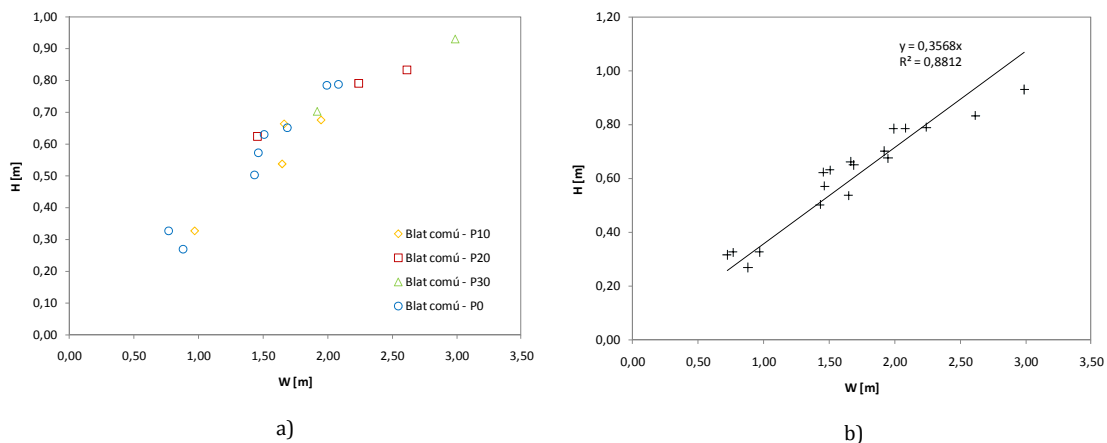


Figura 7.42 Altura de flama segons la longitud del front de flames pel blat comú. a) Diferenciació per sèrie. b) Representació de totes les proves.

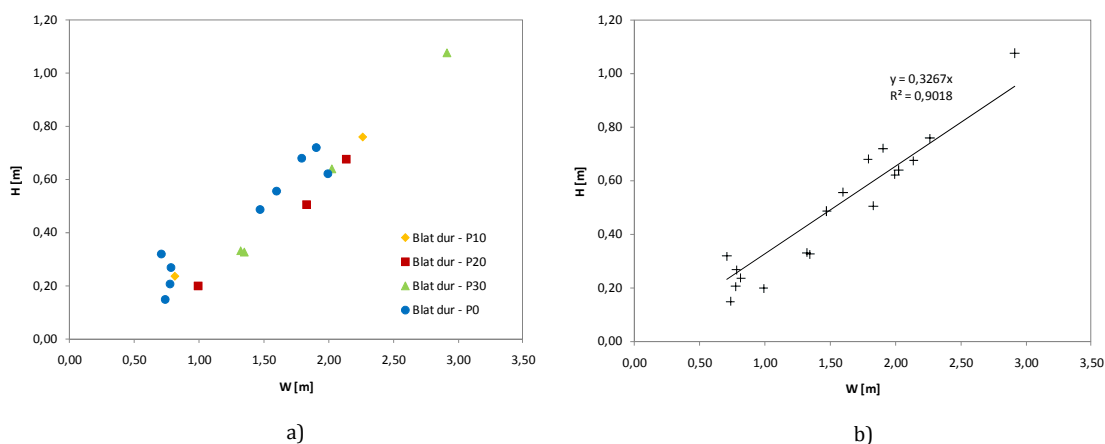


Figura 7.43 Altura de flama segons la longitud del front de flames pel blat dur. a) Diferenciació per sèrie. b) Representació de totes les proves.

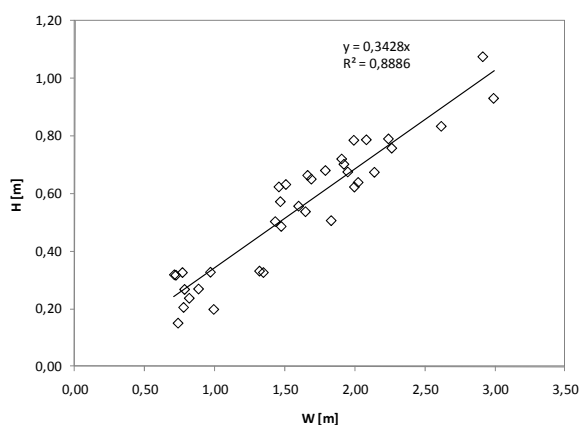


Figura 7.44 Altura de flama segons la longitud del front de flames per a les sèries P0, P10, P20 i P30.

Per tant, a diferència de la llei d'escala de la velocitat de propagació que deixava de complir-se per a pendents de 30° , la llei d'escala de la geometria es compleix per a tots els pendents estudiats. Tot i que com s'observa en la Figura 7.45, els valors de longitud de flama més grans, corresponents majoritàriament a punts de les sèrie P30, mostren l'inici d'un canvi de tendència entre la relació de l'altura de la flama amb la longitud, indicant un canvi en l'angle d'inclinació de les flames, que en la resta de casos resulta pràcticament igual. Això té un efecte directe en la transferència de calor vers el combustible no cremat, fet que es tradueix en un increment de la velocitat de propagació que d'acord als resultats experimentals permetria deduir que la velocitat de propagació és molt sensible a canvis en l'angle d'inclinació de la flama al propagar pendent amunt en les condicions en què tingueren lloc les proves.

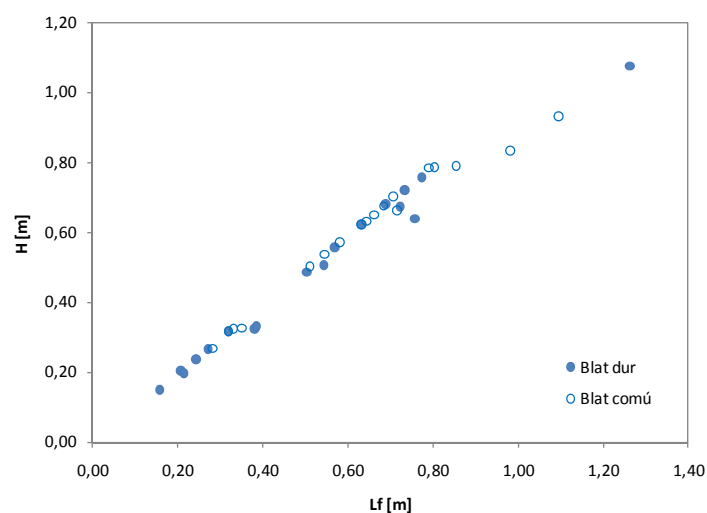


Figura 7.45 Altura de flama segons la longitud de la flama conjuntament per a totes les sèries de pendent (P0, P10, P20 i P30) però distingint els dos combustibles utilitzats.

7.2.3. Resultats de les proves amb vent

Per tal d'avaluar l'efecte del vent en la propagació, es dugueren a terme tres sèries experimentals amb vent -U1, U2 i U3-, més una sèrie de control -U0- al túnel de vent (vegeu el capítol 5). En aquest apartat s'analitza la validesa de les lleis d'escala de velocitat de propagació i geometria per a les sèries de vent.

Validació de la llei d'escala de la velocitat de propagació

D'acord amb el disseny dels experiments, si es compleix la llei d'escala de la velocitat de propagació els punts corresponents a cada una de les sèries amb vent han de quedar alineats entre ells. No cal però que d'una sèrie a l'altra les línies siguin iguals ja que el pendent pot variar segons la magnitud del vent aplicat a cada sèrie. És d'esperar que per les sèries amb un vent més gran la velocitat sigui més gran per a una mateixa longitud de front i per tant el pendent de la línia més gran.

Tal com es pot observar a la Figura 7.46, les sèries U1 i U2 compleixen força bé la llei d'escala de la velocitat de propagació però la sèrie U3 no. En altres paraules, per a velocitats del vent superiors a aproximadament 2,5 m/s la llei d'escala deixa de complir-se.

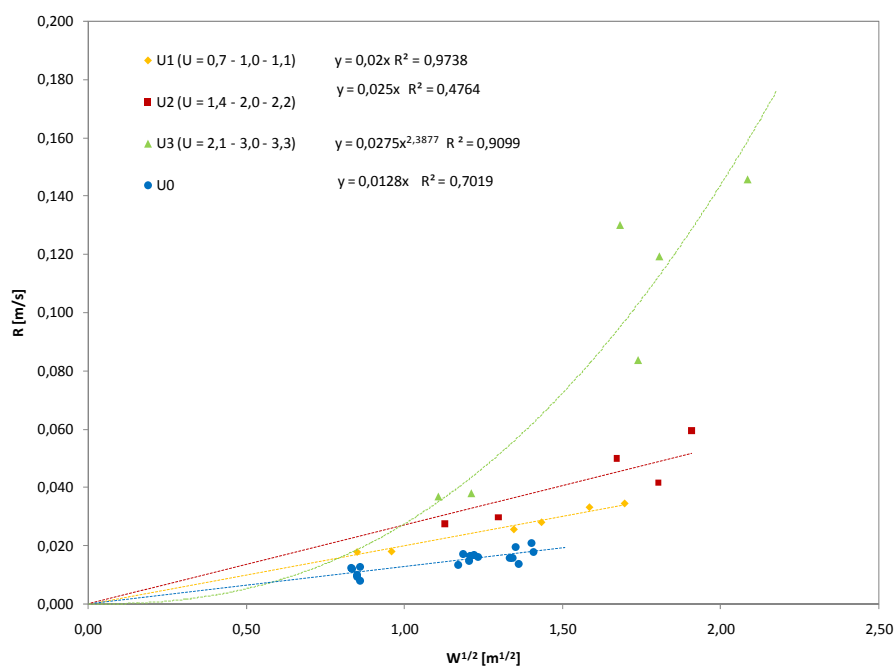


Figura 7.46 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames per les sèries amb vent.

Hi ha diverses raons que poden explicar aquest comportament, una d'elles és que les característiques de la instal·lació experimental utilitzada fan que difícilment per a vents molt grans es pugui assolir l'estat estacionari, tal com ja passava en les proves en pendents elevats. D'altra banda també cal tenir en compte que per a velocitats del vent grans, el foc avança tan ràpid que es disposa de molts menys punts de mesura per a l'obtenció del valor mitjà que apareix a la Figura 7.46 per a cada una de les proves. A més, un altre factor que pot tenir certa influència en aquests resultats és la metodologia experimental. Tal i com s'ha explicat al capítol 5, abans posar en marxa els ventiladors del túnel es deixava avançar el foc al llarg d'un metre del llit perquè aquest es desenvolupés. D'aquesta manera, al posar en marxa els ventiladors ja programats amb la velocitat corresponent a l'assaig, en els casos de les velocitat més elevades el flux d'aire generat provocava l'abatiment de les flames sobre el llit de combustible generant tota una àrea en combustió i no pas un front de flames pròpiament, tal i com es pot observar en la Figura 7.47. Seria interessant comprovar què succeiria si es realitzessin aquestes proves incrementant progressivament la velocitat del vent. Tanmateix per a això, caldria una longitud del llit molt gran per a, un cop assolida la velocitat del vent prevista, deixar evolucionar el front de flames per observar si s'assoleix o no un règim estacionari i si el comportament és el mateix que l'observat en les proves dutes a terme en aquest estudi.

Malgrat aquests factors però, el més probable és que algunes de les hipòtesis efectuades per a dur a terme l'anàlisi dimensional deixen de ser vàlides en les condicions de les proves amb vents elevats.



Figura 7.47 Imatges de les proves dutes a terme al túnel de combustió amb llits d'amplada igual a 1.25 m. a) Velocitat del vent igual a 1,1 m/s. b) Velocitat del vent igual a 3,3 m/s.

A la Figura 7.48 es representen les dades corresponents a les sèries U1 i U2 diferenciant també segons el tipus de combustible. Pel que fa a les dades de la sèrie U1, aquestes es troben perfectament alineades i no es manifesten diferències segons el tipus de combustible. No obstant, si s'analitzen més en detall les dades corresponents a aquesta sèrie (Taula 7.8), s'observa que en les proves dutes a terme amb blat dur el combustible presentà continguts d'humitat inferiors al de les proves amb blat comú, fet que es tradueix en que ambdós combustibles presentin velocitats de propagació semblants. Això era d'esperar d'acord als resultats de les proves de control i de les proves amb pendent, i també d'acord a les conclusions del treball de Anderson *et al.* (1998), que observaren que l'efecte de la humitat en la velocitat de propagació en presència de vent era equivalent a l'efecte que presentava la humitat en la propagació de fronts de flames bàsics.

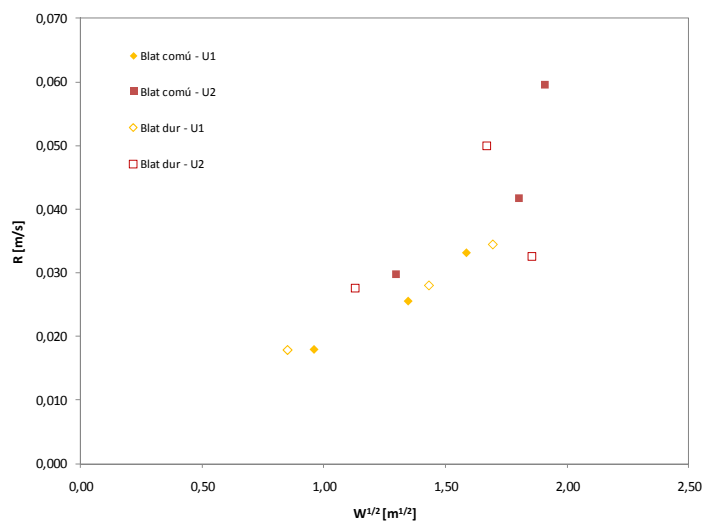


Figura 7.48 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames per les sèries U1 i U2 distingint entre tipus de combustible.

Taula 7.8. Dades de proves de les sèries U1.

Prova	Espècie vegetal	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
W50_U07_v2	Blat dur	7,23	0,018	0,72
W100_U1	Blat dur	7,92	0,028	2,05
W125_U11	Blat dur	6,54	0,035	2,87
W50_U07_2	Blat comú	9,55	0,018	0,92
W100_U1_2	Blat comú	8,94	0,026	1,81
W125_U11_2	Blat comú	8,03	0,033	2,51

Pel què fa a les dades corresponents a la sèrie U2, aquestes presenten un comportament irregular (Figura 7.48). La Taula 7.9 recull les dades corresponents a aquesta sèrie experimental, on es pot observar com en el cas del blat comú, en la prova corresponent a l'escala major (W125) el combustible presentà una humitat superior a la resta de proves. Això implica que en condicions d'humitat similars a les de les proves de les escales W50 i W100 s'hagués assolit un valor de velocitat de propagació més elevat a l'actual, de manera que probablement les dades s'ajustarien millor a una tendència potencial, indicant així que la llei d'escala deixa de ser vàlida. En el cas del blat dur, la prova corresponent a l'escala W125 presentà una humitat entre mig punt i un punt superior a les proves en les altres escales, que fa que les dades no presentin una tendència de comportament clara. De tot això es pot concloure que per a velocitats del vent superiors a 1,5 m/s es comencen a observar comportaments irregulars pel què fa al compliment de la llei d'escala de la velocitat de propagació.

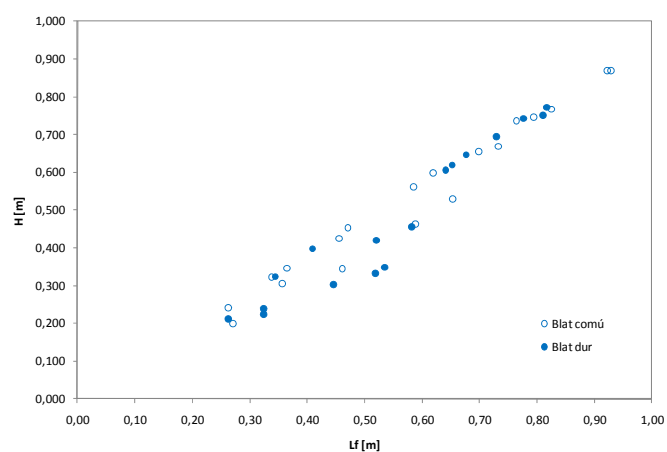
Taula 7.9. Dades de proves de les sèries U2.

Prova	Espècie vegetal	Hs [%]	R [m/s]	W [m]
W50_U14	Blat dur	6,04	0,028	1,27
W100_U2	Blat dur	6,58	0,050	2,79
W125_U22	Blat dur	7,47	0,033	3,45
W50_U14_2	Blat comú	8,12	0,029	1,68
W100_U2_2	Blat comú	7,83	0,042	3,25
W125_U22_2	Blat comú	8,57	0,059	3,64

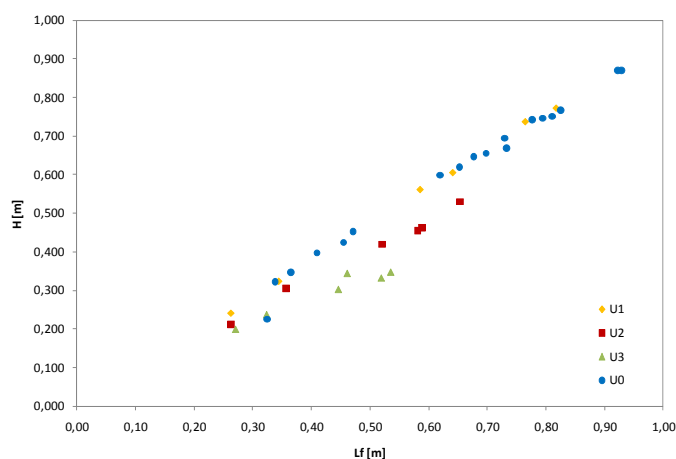
Un altre aspecte que s'observa a partir de les dades de les sèries U1 i U2 és que el creixement que experimenta la longitud del front de flames entre les escales W100 i W125 és molt inferior al que té lloc entre les escales W50 i W100. Aquest fet pot ser iniciatiu de que es troba proper el valor asimptòtic de longitud del front de flames, perquè tal i com ja s'ha comentat anteriorment, el valor d'aquesta variable no pot créixer indefinidament.

Validació de la llei d'escala de la geometria de la flama

En el cas de les proves amb pendent, s'ha observat que la relació entre la longitud de la flama i la seva altura es mantenia constant independentment del valor del pendent, i que ambdós paràmetres escalaven perfectament amb la longitud del front de flames. A la Figura 7.49 a), es pot observar la relació existent, per a les proves amb vent, entre la longitud i l'altura de la flama distingint segons el tipus de combustible. Tot i que aquesta relació es manté lineal, al distingir els punts segons la sèrie experimental (Figura 7.49 b) es pot veure clarament com canvia la relació entre aquestes dues variables, de manera que únicament els punts corresponents a les sèries U0 i U1 queden perfectament alineats. Així, a mesura que s'incrementa la velocitat del vent, el desenvolupament en altura de la flama es veu cada vegada més limitat, o dit d'altra forma, canvia l'angle d'inclinació de la flama.



a)



b)

Figura 7.49 Alçada de la flama segons la longitud de la flama. a) Distingint segons combustible. b) Distingint per sèrie experimental.

La Figura 7.50 mostra la relació existent entre la longitud de la flama i la longitud del front de flames. Com es pot observar les sèries U0 i U1 segueixen clarament una tendència lineal i per tant compleixen la llei d'escala, mentre que la sèrie U2 mostra una millor correlació per a una tendència potencial, cosa que també fa clarament la sèrie U3.

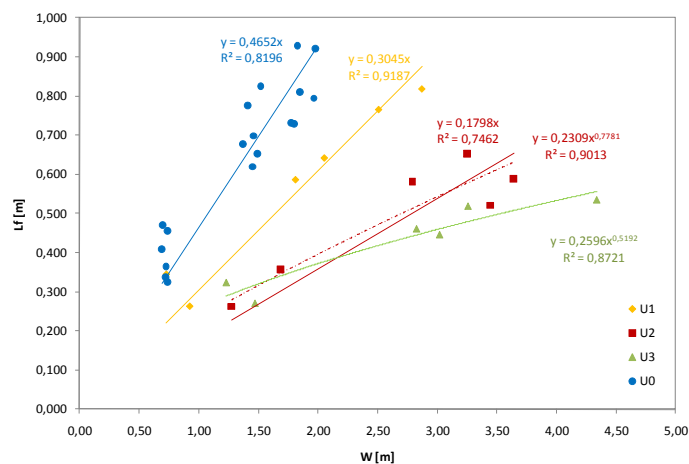


Figura 7.50 Longitud de la flama segons la longitud del front de flames en les sèries amb vent, sense distingir el tipus de combustible.

Aquesta tendència encara s'observa més clarament en el cas de l'altura de la flama (vegeu la Figura 7.51), que mostra una tendència asimptòtica de l'altura de la flama per a velocitats del vent elevades. Cal dir que els vents de la sèrie U3 són, comparats amb les dimensions de les flames extremadament elevats (si es fa l'equivalència a un incendi real serien vents pràcticament huracanats). Això fa que les flames s'inclinin enormement i mentre la longitud de la flama pot encara anar creixent, l'altura és evident que té un límit (Figura 7.47).

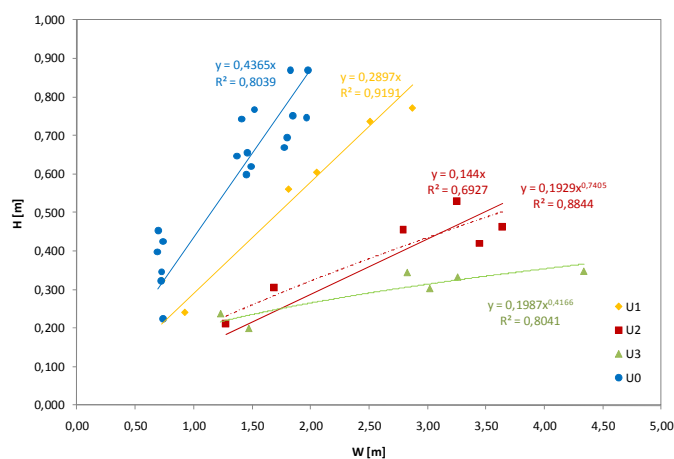


Figura 7.51 Altura de la flama segons la longitud del front de flames en les sèries amb vent, sense distingir el tipus de combustible.

Cal notar que per a les proves amb vent no s'ha analitzat com afecta el tipus d'espècie vegetal en la validació de les lleis d'escala corresponents a l'altura i longitud de flama perquè tal i com s'ha anat veient al llarg d'aquest capítol, la millora que s'aconsegueix en l'ajust experimental de les dades en comparació amb l'anàlisi conjunta no és significativa.

7.2.4. Anàlisi conjunt de les proves amb vent i pendent

Diversos autors han esmentat l'analogia existent entre l'efecte del vent i el pendent, que fan que la flama s'inclini aproximant-se al combustible que encara no ha cremat (Cheney, 1981; Fons, 1946; Rothermel, 1972; Viegas, 1998; Weber, 1989). Cal tenir en compte però que l'efecte del pendent en la força d'empenyiment aerostàtic augmenta amb la intensitat del foc mentre que les forces d'inèrcia degudes al vent es mantenen constants (Byram *et al.*, 1966). És possible per tant que en alguns casos, especialment en incendis d'alta intensitat, l'equivalència entre vent i pendent deixi de complir-se.

A la Figura 7.52 s'hi ha representat conjuntament totes les sèries, tan de vent com de pendent, pel què fa a la velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. Es pot observar que les proves en pendents fins a 20° queden per sota del les sèries amb vent, fet que ens indica que l'efecte d'aquests pendents és inferior als vents utilitzats en les sèries amb vent. La sèrie de pendent 30° però queda dins el núvol de punts de la sèrie U2, indicant-nos una equivalència d'aquest pendent amb vents del voltant de 2 m/s.

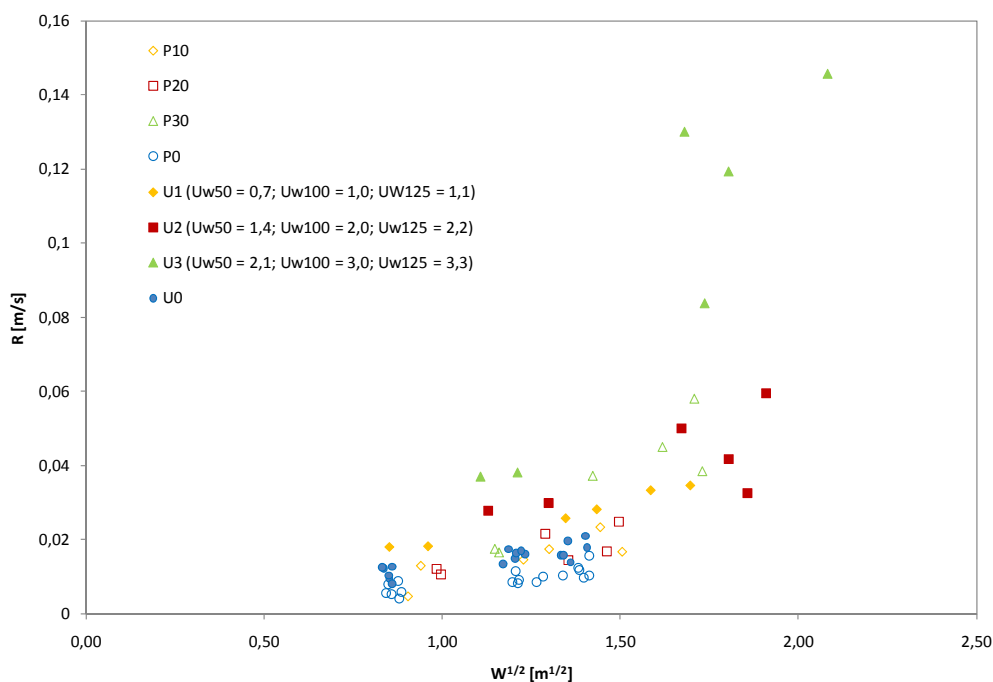


Figura 7.52 Velocitat de propagació segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. Representació conjunta de les sèries amb vent i pendent, distingint segons el tipus de combustible utilitzat.

En el cas de la longitud de la flama (vegeu la Figura 7.53) succeeix quelcom semblant en el sentit que l'efecte del pendent sobre la longitud de la flama és clarament inferior a l'efecte del vent, però aquí l'efecte encara és menor que en el cas de la velocitat de propagació. Així els punts de totes les sèries de pendent queden en general per sota de les sèries amb vent. Cal matisar aquí que atès que no s'ha fet distinció entre els diversos pendents queda lleugerament emmascarat l'efecte de la sèrie de P30, els punts de la qual s'alineen prou bé amb la sèrie de color groc corresponent a U1, és a dir a vents de l'ordre d'1 m/s.

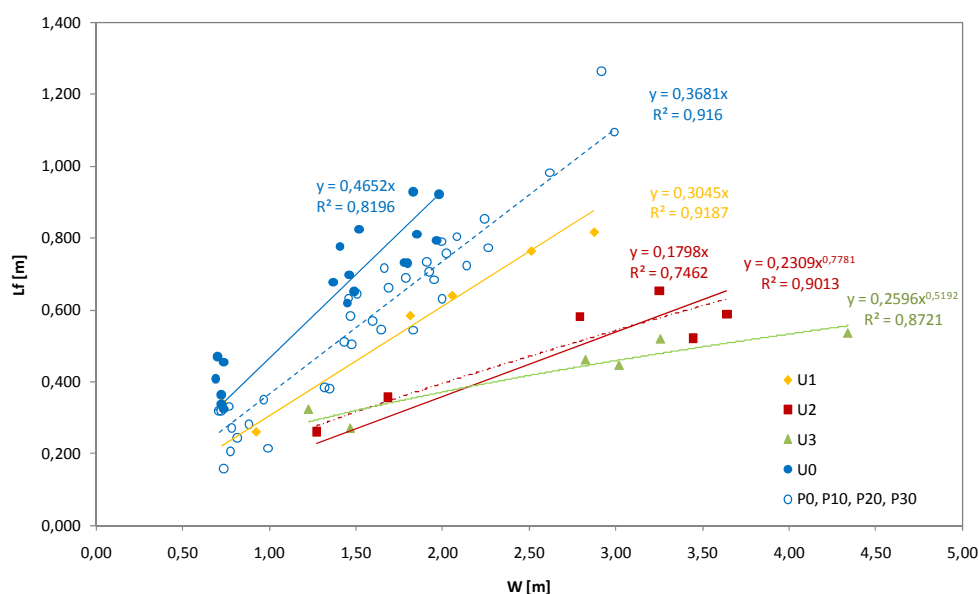


Figura 7.53 Longitud de la flama segons l'arrel quadrada de la longitud del front de flames. Representació conjunta de les sèries amb vent i pendent, distingint segons el tipus de combustible utilitzat.

Una altra forma de comparar l'efecte del vent i del pendent és a partir de l'anomenat vent equivalent a pendent (u_{we}). Tal i com s'ha vist al capítol 6, aquesta variable consisteix en determinar el valor de la velocitat del vent que tindria el mateix efecte que el pendent en la propagació del foc. A la Figura 7.54 s'ha representat per a les sèries de vent i pendent, la velocitat del vent o del vent equivalent en funció de la velocitat de propagació. Cal recordar que d'acord a les lleis d'escala aquestes dues variables han d'escalar linealment. A partir d'aquesta gràfica es pot observar com els punts corresponents a la sèrie P10 i els punts corresponents a la sèrie U3 segueixen tendències distintes a la resta de dades. En el primer cas, els punts de la sèrie P10, queden situats per sota de la resta de punts ja que els valors determinats de velocitat del vent equivalent varien des de 0,18 m/s fins a 0,44 m/s, valors aquests molt petits. De fet, en la Figura 7.52 s'observa com, pel què fa a velocitat de propagació els punts de la sèrie P10 es solapen amb els punts de la sèrie U0, és a dir, que tenen un comportament molt similar al dels fronts de flames bàsics. Pel què fa als punts de la sèrie U3, aquests presenten valors superiors a la resta i presenten també una tendència distinta. En aquest cas succeeix tot el contrari que tenia lloc en el cas anterior, ja que els valors de vent assajats són molt elevats d'acord a les dimensions del front de flames.

Això concorda amb el que ja s'havia observat al analitzar les proves amb vent on la llei d'escala de velocitat de propagació deixava de ser vàlida per a velocitat del vent superiors als 2,5 m/s.

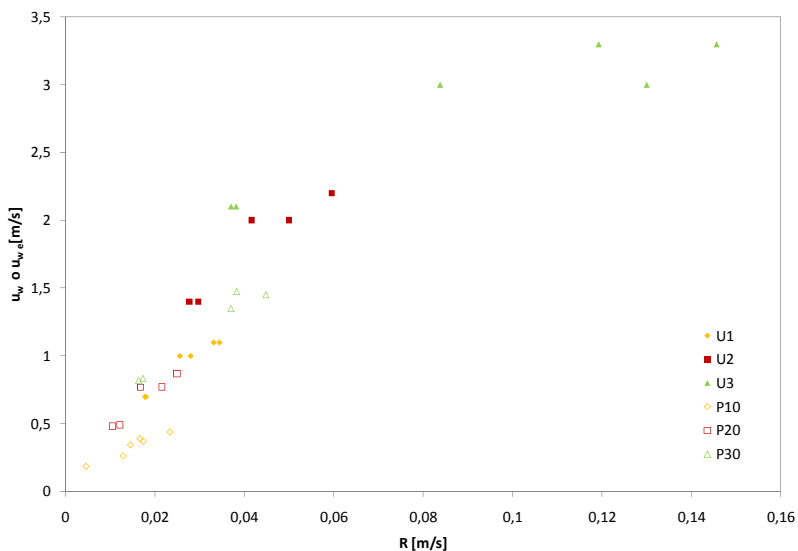


Figura 7.54 Velocitat del vent o velocitat del vent equivalent a pendent segons la velocitat de propagació per a totes les sèries de vent i pendent.

La Figura 7.55 recull de forma conjunta les dades corresponents a les sèries P20, P30, U1 i U2, de manera que s'agrupen tots aquells punts amb velocitat del vent inferiors als 2,5 m/s. Com mostra aquesta figura, les dades s'ajusten a una recta ($R^2=0,87$), complint així la relació que segons l'anàlisi dimensional desenvolupat han de presentar aquestes dues variables.

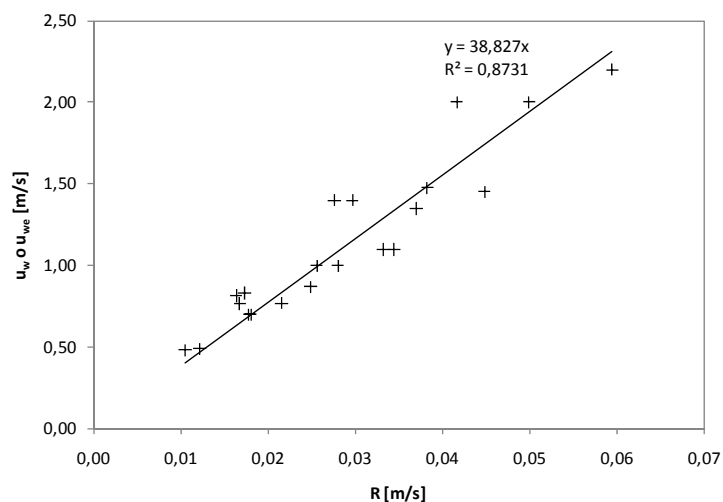


Figura 7.55 Velocitat del vent o velocitat del vent equivalent al pendent en funció de la velocitat de propagació de les sèries P20, P30, U1 i U2.

7.3. Conclusions

L'experimentació realitzada en aquesta tesi s'ha dissenyat d'acord a les lleis d'escala derivades de l'anàlisi teòrica desenvolupada al Capítol 4. A més, s'ha tingut en compte per a construir els models experimentals i establir els valors de les variables de disseny, com es duu a terme habitualment l'experimentació en incendis forestals a laboratori (vegeu Capítols 2 i 3).

Els resultats de les proves realitzades a la instal·lació del CERTEC (bloc 1) en fronts de flama bàsics – sense vent ni pendent– ha permès analitzar totes les lleis d'escala trobades al Capítol 4. Això ha estat possible gracies a que en aquestes proves fou possible mesurar un major nombre de variables, que o bé intervingueren directament en l'anàlisi o permeteren estimar o calcular altres variables que formaren part d'aquest. Així, els resultats obtinguts han permès determinar la validesa de les lleis d'escala i per tant de les hipòtesis sota les quals foren formulades, en el rang experimental en què tingueren lloc aquestes proves. En altres paraules, això equival a que els fenòmens que intervenen en la propagació del foc són els mateixos per a totes les escales en què s'han fet les proves.

En el cas de l'experimentació duta a terme al LEIF (blocs 2, 3 i 4) només es pogueren validar les lleis d'escala corresponents a la velocitat de propagació i a l'altura i longitud de la flama. A més, la gran quantitat de combustible involucrada en cada assaig feu totalment inviable l'asseccament del combustible, de manera que no es pogué controlar la humitat del combustible, que d'acord a les lleis d'escala cal que es mantingui constant. Precisament per això, es realitzaren proves de control per a conèixer l'efecte de la humitat en la velocitat de propagació i la longitud i altura de la flama. Una altra limitació de l'experimentació realitzada al LEIF, fou deguda al fet que es va treballar amb dos combustibles diferents en funció de la disponibilitat del subministrador. No obstant, aquest fet ha permès veure quin era l'efecte tant de la humitat com del tipus de combustible en la validació de les lleis d'escala. Així, s'ha observat que, pel que fa a la humitat, quan les proves que s'estan comparant presenten valors molt dispars, augmenta la dispersió de les dades disminuint el coeficient de correlació. En realitat el que succeeix és que per a cada valor d'humitat, a la recta de regressió de la llei d'escala, li correspondria un pendent diferent. Pel que fa al tipus de combustible, succeeix quelcom semblant ja que cada un d'ells tindria la seva pròpia recta de regressió de la llei d'escala. Cal dir però que si el contingut d'humitat es troba entre el 8 % i el 12%, i els combustibles són semblants pel que fa a les propietats intrínseques, tot i que la dispersió de les dades augmenta, l'error comès en suposar que compleixen una mateixa llei d'escala es pot considerar acceptable.

L'anàlisi conjunt de totes les proves control ha posat de manifest que el tipus d'instal·lació experimental utilitzada no té cap influència en els resultats obtinguts i per tant en la validació de les lleis d'escala. Aquest fet és important ja que les proves control s'han dut a terme en quatre instal·lacions de característiques molt diferents entre elles, no només pel que fa a les dimensions sinó també pel que fa a la presència de tancaments laterals. S'ha de destacar com a resultat important també que s'han pogut validar les lleis d'escala de la velocitat de propagació i geometria de flama per aquestes

proves control en un rang prou gran de dimensions de longitud del front de flames que va des dels 25 cm fins els 4,5 m aproximadament.

En les proves realitzades en condicions de pendent la llei d'escala de la geometria de flama es compleix en tot el rang de pendents estudiats, que van de 10° fins els 30° . Cal dir però que en les proves amb pendent de 30° s'ha vist que la relació entre la longitud i l'altura de la flama té una tendència lleugerament diferent respecte als altres pendents i això fa pensar que s'estigui arribant al llindar de validesa de llei d'escala i per tant de les hipòtesis formulades. Això es confirma en els resultats obtinguts per a la velocitat de propagació que mostren que la llei d'escala en aquest cas ja no es compleix per a pendents de 30° .

En les proves amb vent els resultats obtinguts mostren que per a velocitats de vent superiors a aproximadament 1,5 m/s comencen a observar-se comportaments anòmals. Tot i que les lleis d'escala de velocitat de propagació i geometria de flama sembla que, d'acord amb les nostres dades, es compleixen fins a 2,5 m/s, les desviacions de les dades per a vents superiors a 1,5 m/s comencen a ser notables. Això queda també palès a les imatges enregistrades on es veu com els focs amb vents superiors a 1,5 m/s tenen una morfologia i comportament diferent. Cal afegir aquí que els valors de vent que es van utilitzar es seleccionaren perquè són valors típicament utilitzats en l'experimentació a laboratori però, d'acord amb les lleis d'escala obtingudes, un vent de 3 m/s aplicat a un front d'1 m de longitud equivaldria a un vent de 30 m/s (108 km/h) en un front de 100 m de longitud. Per tant, és com si es tinguessin unes condicions huracanades en un incendi real, fet que pràcticament no es dona mai o en qualsevol cas no són condicions habituals. A banda, com ja succeí amb les proves amb pendent, en les proves dutes a terme amb velocitats de vent superiors, no s'arribà a assolir un règim estacionari de propagació.

No es vol finalitzar la tesi sense realitzar algunes reflexions respecte de la possible extrapolació de dades entre laboratori i camp mitjançant l'ús de les lleis d'escala desenvolupades. Al llarg d'aquesta tesi, durant les estades realitzades tant a Portugal, com a Austràlia i Nova Zelanda, es va participar en diversos programes experimentals a camp amb l'objectiu d'obtenir dades per a validar les lleis d'escala entre l'escenari de laboratori i el de camp. No obstant, aquestes dades no s'han pogut utilitzar per diverses raons. D'una banda perquè els experiments no es van poder dissenyar seguint les lleis d'escala d'acord amb els experiments fets al laboratori. Això es deu bàsicament a dos fets, en primer lloc al fet que és difícil trobar models experimentals de FVS reals que concordin amb els models que s'han utilitzat al laboratori i, en segon lloc, al fet que encara que es puguin trobar aquests models, sovint aquella àrea no es troba disponible per fer-hi experiments. D'altra banda, la possible utilització de la gran quantitat de dades de camp generades hagués requerit d'un nou treball de laboratori que ha estat impossible de realitzar com a part d'aquesta tesi. En aquest sentit, el que caldria fer seria partint de les especificacions de les proves realitzades a camp i utilitzant les lleis d'escala, dissenyar nous experiments de laboratori, els resultats dels quals permetrien validar les lleis en un rang d'escala molt més gran. De fet aquesta hauria de ser la manera habitual de procedir a l'hora de dissenyar

experiments de laboratori per tal que els resultats obtinguts en aquests es poguessin extrapolar a escales majors seguint les lleis d'escala trobades. Cal destacar que les lleis d'escala desenvolupades en aquest treball tenen un límit definit d'aplicació, ja que ni les variables que descriuen el combustible, ni les variables que descriuen la geometria o comportament del foc poden créixer de forma indefinida, tal i com suggereixen les lleis d'escala.

8. CONCLUSIONS / CONCLUSIONS

El treball realitzat durant el desenvolupament d'aquesta tesi ha permès extreure les següents conclusions:

The work done during the development of this Thesis has allowed extracting the following conclusions:

1. S'ha realitzat un extens treball de revisió bibliogràfica centrat bàsicament en aquells estudis que d'una manera o altra han aplicat l'anàlisi dimensional i/o de semblança a l'estudi dels incendis i en particular dels incendis forestals. S'ha posat de manifest la utilitat d'aquestes tècniques en la modelització i correlació de dades experimentals tot i la poca difusió que han tingut en l'àmbit dels incendis forestals. A més ha quedat clar que no és possible realitzar un escalatge complet dels incendis forestals i cal realitzar hipòtesis per tal d'arribar a un escalatge parcial. D'entre les diverses possibilitats, l'escalatge de Froude ha estat el més emprat.

An extensive review of the research that in one way or another incorporates dimensional analysis and/or similarity analysis into the study of forest fires has been conducted. Even that in the field of forest fires these techniques have been barely used, this review has shown their usefulness to model and to correlate experimental data. Furthermore, it has been shown that developing a complete scaling of forest fires is not possible and different assumptions have to be made in order to reach a partial scaling. Among the various strategies of partial scaling, Froude scaling has been the most used.

2. Una part de la revisió bibliogràfica s'ha dedicat a l'anàlisi del tipus d'experimentació que s'ha realitzat fins a l'actualitat en l'àmbit dels incendis forestals. S'ha observat que no existeix a la

bibliografia cap estudi en què s'hagin aplicat les lleis d'escala derivades de l'escalatge de Froude als models normalment utilitzats en l'experimentació de laboratori, per tal d'estudiar la validesa de l'extrapolació de resultats a una escala diferent a la que han estat obtinguts.

Another part of the literature review has been devoted to the analysis of the experimentation performed in the field of forest fires until now. No studies have been found in the literature that apply the scaling laws derived from Froude scaling to the models typically used in laboratory experimentation, in order to validate the extrapolation of the results obtained in a scale to a different scale.

3. L'estudi de les variables que permeten descriure la propagació d'un incendi forestal en funció dels diferents models experimentals ha permès detectar que algunes d'aquestes variables no es troben unívocament definides a la bibliografia. S'ha fet doncs un esforç important per a definir totes aquestes variables així com el rang de valors que poden assolir en els diferents models experimentals.

The analysis developed to study the variables that describe the propagation of a forest fire, according to the different experimental models, has shown that some of these variables are not uniquely defined in the literature. Therefore an important effort has been carried out to define all these variables and the range of values that can be achieved by them in the experimental models identified.

4. L'estudi de les variables ha permès també conèixer les relacions que existeixen entre les diferents variables i com canvien en funció del model i de l'escenari experimental. Això, ha requerit d'una àmplia revisió de la bibliografia. Així, aquest estudi recull informació molt valuosa per al desenvolupament de futurs estudis en l'àmbit del canvi d'escala en incendis forestals.

The study of variables has also allowed knowing the relationships between the variables and how they change depending on the model and the experimental scenario. This has required an extensive review of the literature. Thus, this study gathers together valuable information for developing future studies on the topic of changing scale in forest fires.

5. A partir de l'anàlisi dimensional i de semblança efectuat s'han pogut obtenir les lleis d'escala que regeixen la propagació d'un front de flames bàsic, d'un front de flames sota l'efecte del vent i d'un front de flames propagant pendent amunt. Com a dimensió característica del sistema s'ha seleccionat la longitud del front de flames. S'ha conclòs que totes les variables geomètriques del sistema i la intensitat han d'escalar amb la longitud del front de flames, que la velocitat de propagació, la velocitat dels gasos, la velocitat de combustió i el temps de residència de la flama han d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front de flames i que el poder emissiu de les flames ha d'escalar amb l'arrel quadrada de la longitud del front al cub.

The scaling laws controlling the propagation of a flame front in different conditions, no-wind no-slope, wind-aided and up-slope, have been obtained from dimensional and similarity analysis. Flame front length has been defined as a characteristic linear dimension of the system. It has been concluded that all the geometrical variables of the system and fire intensity must scale with the flame front length, rate of spread, velocity of the gases, burning rate and residence time must scale with the square root of flame front length, and the emissive power must scale with the third power of the square root of flame front length.

6. S'ha dut a terme un extens programa experimental en diferents instal·lacions, per tal de poder verificar les lleis d'escala obtingudes teòricament en diferents condicions de propagació del foc – sense vent ni pendent, amb pendent o amb vent. D'aquestes proves experimentals s'ha obtingut una gran quantitat de dades que a més d'haver estat utilitzades per a la validació de les lleis d'escala, es podran utilitzar també per a futurs estudis sobre el canvi d'escala i el comportament del foc.

An extensive experimental program has been conducted at different facilities in order to validate the scaling laws obtained theoretically in different conditions of fire spread –no-wind no-slope, wind-aided and up-slope–. A large amount of data has been obtained from these experimental tests that, apart from being used to validate the scaling laws, can be used in future studies on scaling and fire behavior topics.

7. S'han desenvolupat metodologies per a l'obtenció de la velocitat de propagació, l'altura i la longitud de flama, la longitud de preescalfament, la temperatura de la superfície del llit i la longitud del front de flames, a partir del tractament d'imatges, tant de vídeo com infraroges. Aquestes eines han permès determinar de forma pràcticament automàtica aquestes variables, aconseguint una mesura més precisa i en un temps menor. A més, tot i que aquestes metodologies han estat implementades per mesurar les variables d'acord a les condicions en què tingueren lloc les proves de laboratori, la majoria d'elles poden ser utilitzades en altres condicions.

Methodologies to compute, from video and/or infrared images, the rate of spread, flame height and length, the preheating length, the temperature of fuel bed surface and the flame front length, have been developed. These tools have allowed determining almost automatically these variables, obtaining a more accurate measurement in less time. In addition, although these methodologies have been implemented to measure these variables according to the laboratory conditions under which the experiments took place, most of these methodologies can be applied in other conditions.

8. La longitud del front de flames ha resultat ser un paràmetre adequat com a longitud característica del sistema, fet molt significatiu perquè aquest paràmetre ha estat definit en aquest treball. A la bibliografia s'han trobat paràmetres relacionats amb aquest però en cap cas igualment definits. A més a més, s'ha desenvolupat una nova metodologia per a la determinació d'aquest paràmetre.

Flames front length has been proved to be a suitable parameter as a characteristic length of the system. This is very significant because flame front length has been firstly defined in this work. In the literature, related parameters can be found but never equally defined. In addition, a new methodology for the determination of this parameter has been developed.

9. Els resultats obtinguts per a fronts de flama bàsics, és a dir, que propaguen sense vent ni pendent, han permès validar totes les lleis d'escala en el rang de longituds del front de flames que va dels 25 cm als 1,6 m. A més, les lleis d'escala corresponents a la velocitat de propagació i a la geometria de flama s'han pogut validar en un rang de longituds del front de flames superior, dels 25 cm als 4,5 m. No obstant això, els resultats han posat de manifest que paràmetres com la humitat del combustible, el tipus de combustible o les característiques de la instal·lació experimental tenen un marcat efecte en la propagació del foc, de manera que s'han de controlar adequadament per a interpretar correctament els resultats i que no quedin emmascarats per l'efecte d'aquests factors.

En el cas dels fronts de flama propagant pendent amunt, els resultats han mostrat, pel què fa la llei d'escala de la geometria de flama, que es compleix per a tot el rang de valors de pendent estudiats – 0° a 30°. No succeeix el mateix amb la llei d'escala de la velocitat de propagació que deixa de complir-se per a pendents de 30°.

Pel què fa als fronts de flames conduïts pel vent, han mostrat que per a velocitats del vent superiors als 2,5 m/s deixen de ser vàlides les lleis d'escala de geometria i de velocitat de propagació. No obstant, a partir de velocitats superiors a 1,5 m/s ja comencen a observar-se irregularitats.

En els casos en què no es poden validar les lleis d'escala, s'ha observat que la longitud del llit de combustible no era suficient per a què la velocitat assolís un règim de propagació estacionari.

Pel què fa a la validació de les lleis d'escala desenvolupades en escales majors, per a l'estudi de la possible extrapolació de dades de laboratori i camp, s'ha vist que la manera adequada de procedir és partir de les dades de l'escala superior i mitjançant les lleis d'escala determinar les especificacions de les proves a una escala menor.

Results for basic flame fronts, i.e. under no-wind and no-slope conditions, have allowed validating all the scaling laws developed theoretically in flame fronts ranging from 25 cm to 1.6 m length. In addition, the scaling laws corresponding to the rate of spread and flame geometry have been validated in a wider range of flame front lengths, from 25 cm to 4.5 m. However, parameters such as the fuel moisture content, the fuel type and the characteristics of the experimental device have a significant effect on fire spread. So, these factors have to be properly controlled to correctly analyze the results because these can be masked by the effect of these factors.

In the case of flame fronts spreading up-slope, results have shown that the scaling law of flame geometry is verified for the entire range of studied slopes -0° to 30° . In the case of the rate of spread scaling law, this is no longer verified for 30° slopes.

Concerning wind-aided flame fronts, results have shown that for wind speed values higher than 2.5 m/s both rate of spread and flame geometry scaling laws cease to be verified. However, irregularities start being observed for wind speeds higher than 1.5 m/s.

The cases in which the scaling laws are no longer verified, it has been observed that the fuel bed length was not long enough to let the rate of spread achieve a steady state.

Regarding the validation of the scaling laws developed in greater scales for the study of the possible extrapolation between laboratory and field data, it has been observed that the correct way to proceed would be starting from data of the greater scale and determine the specifications of the smaller scale tests using the scaling laws.

10. Com a apunt final destacar que aquesta tesi recull la informació necessària per a qualsevol investigador que es vulgui introduir al tema del canvi d'escala en incendis forestals.

To conclude, it is worth noting that this thesis gathers together information useful to any researcher who wants to start studying the changing scale in forest fires.

NOMENCLATURA

a	Coefficient genèric eq. [2.3] i eq. [3.6]
A_{llit}	Àrea del llit de combustible [m ²]
b	Coefficient genèric eq. [2.3] i eq. [3.6]
b_0	Espai entre llistons [m]
b_c	Gruix dels llistons [m]
B	Força d'empenyiment aerostàtic [m ³ /s ³]
c_{pa}	Capacitat calorífica de l'aire [J/kg·K]
C	Càrrega de combustible en base seca [kg/m ²]
C_h	Càrrega de combustible en base humida [kg/m ²]
C_w	Constant del model de Weber <i>et al.</i> (1995) (vegeu apartat 6.4.1)
C	Constant
d_c	Diàmetre de partícula [m]
d_z	Diàmetre de la columna de fum a una altura z [m]
D	Longitud característica o diàmetre [m]
E	Poder emissiu del front de flames [W/m ²]
F_c	Nombre convectiu de Froude [-]
g	Acceleració de la gravetat [m/s ²]
Gr	Nombre de Grashof [-]
h	Altura del llit de combustible [m]
h_c	Coefficient de convecció [W/m ² ·K]
h_{cs}	Coefficient de convecció a la superfície del llit [W/m ² ·K]
H	Altura de la flama mesurada perpendicularment a la superfície del llit [m] (vegeu Figura

	1.3 i Figura 1.4)
H_s	Humitat del combustible en base seca [%]
H_v	Altura de la flama mesurada segons l'eix vertical [m] (vegeu Figura 1.4)
HY	Calor de combustió o calor alliberada [J/kg]
I	Intensitat del front de flames [W/m]
I_a	Flux de calor per unitat d'àrea [W/m ²]
k_a	Conductivitat tèrmica de l'aire [W/m·K]
k_g	Conductivitat tèrmica dels gasos de combustió [W/m·K]
K_w	Constant del model de Weber <i>et al.</i> (1995) (vegeu apartat 6.4.1)
ℓ_i	Variable lineal genèrica del sistema [m]
l_c	Longitud dels llistons [m]
l_d	Longitud de dissipació (turbulència) [m]
l_s	Longitud de preescalfament [m]
L	Longitud o longitud característica [m]
L_a	Longitud de la flama en l'eix central d'aquesta [m] (vegeu Figura 1.3 i Figura 1.4)
L_i	Longitud de la vora de la flama més propera al llit de combustible [m] (vegeu Figura 1.3 i Figura 1.4)
L_f	Longitud de la flama [m] (vegeu Figura 6.7 i Figura 6.8)
m	Paràmetre d'entrada del programa de càlcul de la velocitat de propagació relacionat amb la temperatura d'ignició [-]. A l'eq. [2.15] Coeficient relacionat amb el coeficient d'absorció de radiació
m'_c	Massa de combustible cremat per unitat de superfície [kg/m ²]
M_t	Massa total de combustible [kg]
n	Coeficient relacionat amb la viscositat de l'aire (eq. [2.15])
N_c	Criteri d'energia de Byram o nombre convectiu [-] (Byram, 1959)
Nu	Nombre de Nusselt [-]
p_a	Pressió atmosfèrica [Pa]
P_f	Poder del foc (Byram, 1959)
P_w	Poder del vent (Byram, 1959)
P_R	Irradiància [W/m ²]
Pr	Nombre de Prandtl [-]
PCI	Poder calorífic inferior [J/kg]
PCS	Poder calorífic superior [J/kg]
q	Calor generada per unitat de superfície i temps [J/m·s]
Q	Cabal volumètric de combustible en fase gas a temperatura ambient [m ³ /s]
Q'	Cabal volumètric de combustible en fase gas a temperatura ambient per unitat lineal [m ² /s]
Q_c	Calor de combustió [J/kg]
r_z	Distància radial a una altura z [m]
R	Velocitat de propagació del front de flames [m/s]

Ra	Nombre de Rayleigh [-]
Re	Nombre de Reynolds [-]
R_g	Constant dels gasos [J/K]
S_f	Gruix de la flama [m]
t	Instant de temps [s]
t_r	Temps de residència de la flama [s]
T	Temperatura [K]
T_a	Temperatura ambient [K]
T'_a	Gradient vertical de la temperatura ambient [K/m]
T_f	Temperatura de la flama [K]
T_{film}	Temperatura de film [K]
T_g	Temperatura dels gasos de combustió [K]
T_{ij}	Temperatura de l'element ij [K] (eq. [6.1])
T_l	Temperatura de gasificació del combustible [K]
T'_{ij}	Valor normalitzat de temperatura de l'element ij [K] (eq. [6.1])
T_{max}	Temperatura màxima de la matriu corresponent a la superfície del llit [K] (eq. [6.1])
T_{min}	Temperatura mínima de la matriu corresponent a la superfície del llit [K] (eq. [6.1])
T_p	Temperatura de la paret o superfície [K]
T_s	Temperatura a la superfície del llit de combustible [K]
T_z	Temperatura a una altura z [K]
u	Velocitat horitzontal de l'aire o del gas [m/s]
u_a	Velocitat induïda [m/s]
u_f	Fluctuació mitjana de la velocitat (turbulència) [m/s]
u_g	Velocitat dels gasos de combustió [m/s]
u_i	Velocitat d'entrada d'aire a la columna de fum [m/s]
u_w	Velocitat del vent [m/s]
u_{we}	Velocitat del vent equivalent a pendent [m/s]
U	Velocitat mitjana del flux d'aire [m/s]
v_i	Velocitat genèrica del sistema [m/s]
V	Velocitat de combustió [kg/m ² ·s] o [kg/m·s]
\tilde{V}	Component de la fluctuació de U [m/s]
\dot{w}	Acceleració dels gasos al centre de la columna [m/s ²]
W	Longitud del front de flames [m]
W_f	Amplada del foc [m]
z	Coordenada z , altura [m]
z_d	Constant del model de Weber <i>et al.</i> (1995) (vegeu apartat 6.4.1)
z_p	Constant del model de Weber <i>et al.</i> (1995) (vegeu apartat 6.4.1)

Lletres gregues

α	Pendent del terreny [°]
α_t	Difusivitat tèrmica [m ² /s]
α_w	Constant del model de Weber <i>et al.</i> (1995) (vegeu apartat 6.4.1)
β	Constant d'arrossegament (vegeu eq. [6.16])
β_a	Coefficient d'expansió tèrmica de l'aire [K ⁻¹]
β_g	Coefficient d'expansió tèrmica dels gasos de combustió [K ⁻¹]
β_l	Angle format entre la superfície de la flama i el llit de combustible [°] (vegeu Figura 1.3 i Figura 1.4)
β_t	Angle format entre l'eix perpendicular a la superfície del llit i la flama [°] (vegeu Figura 1.3 i Figura 1.4)
ζ	Fracció pirolitzada de combustible [-]
η	Fracció de l'aire que s'incorpora a la flama [-]
θ	Angle format entre l'eix central de la flama i la superfície del llit [°] (vegeu Figura 1.3 i Figura 1.4) o coordenada polar
θ_a	Angle format entre l'eix perpendicular a la superfície del llit i l'eix central de la flama [°] (vegeu Figura 1.3 i Figura 1.4)
θ_v	Angle format entre l'eix vertical i l'eix central de la flama [°] (vegeu Figura 1.4)
ϑ	Viscositat cinemàtica [m ² /s]
μ_a	Viscositat de l'aire [kg/m·s]
μ_g	Viscositat dels gasos de combustió [kg/m·s]
ρ_a	Densitat de l'aire [kg/m ³]
ρ_{ap}	Densitat aparent del llit de combustible [kg/m ³]
ρ_{cv}	Densitat del combustible vaporitzat [kg/m ³]
ρ_g	Densitat dels gasos de combustió [kg/m ³]
ρ_m	Densitat del combustible [kg/m ³]
ρ_p	Densitat de partícula [kg/m ³]
σ	Constant de Stefan-Boltzmann [W/m ² ·K ⁴]
σ_s	Relació superfície-volum [m ² /m ³]
ϕ	Constant d'arrossegament (vegeu eq. [6.16] i eq. [6.17])
ψ	Angle de desviació del vent a causa del foc [°]
Γ	Vorticitat [Pa/s]
Δ	Increment associat a la variable que acompanya aquest símbol

Subíndexs

f	Fenomen real
m	Model
$S1$	Escala 1
$S2$	Escala 2

x	component x
y	component y
z	component z

Abreviatures

ADAI	<i>Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial</i>
CERTEC	Centre d'Estudis del Risc tecnològic
DE4	Taula d'assaigs en congostos
FVS	Formació vegetal simple
FVC	Formació vegetal complexa
LEIF	<i>Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais</i>
TPi	Termoparell número i
Wi	Escala experimental corresponent a llits amb amplades de valor i expressat en cm

BIBLIOGRAFIA

Àgueda, A., Pastor, E., Pérez, Y., Planas, E. (2009). "Fire intensity reduction in straw fuel beds treated with a long term retardant" *Proc. 6th Mediterranean Combustion Symposium*, Ajaccio, France.

Albini, F.A. (1976). "Estimating wildfire behavior and effects". USDA Forest Service, General Technical Report INT-30, Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, UT.

Albini, F.A. (1981). "A model for the wind-blown from a line fire". *Combustion and Flame*, 43: 155 - 174.

Albini, F.A. (1985). "A model for fire spread in wildland fuels by radiation". *Combust. Sci. and Tech.*, 42: 229 - 258.

Albini, F.A. i Stocks, B.J. (1986). "Predicted and Observed Rates of Spread of Crown Fires in Immature Jack Pine". *Combustion Science and Technology*, 48: 65 - 76.

Albini, F.A., (1986). "Wildland fire spread by radiation - a model including fuel cooling by natural convection". *Combustion Sci. Technol.*, 45: 101 - 113.

Alexander, M. (1982). "Calculating and interpreting forest fire intensities" *Canadian Journal of Botany*, 60: 349 - 357.

Allgöwer, B., Calogine, D., Camia, A., Cuiñas, P., Fernandes, P., Francesetti, A., Hernando, C., Kötz, P., Koutsias, N., Lindberg, H., Molina, D., Morsdorf, F., Ribeiro, L.M., Rigolot, E., Séro-Guillaume, O., (2002). "Methods for Wildland Fuel Description and Modelling: A State of the Art". EUFIRELAB: Euro-

Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "wall-less" Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region. Deliverable D-02-01.

Anderson, H.E. (1964). "Mechanisms of fire spread. Research progress report No. 1". US Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research paper INT-8, 13 pp.

Anderson, H.E. (1968). "Fire Spread and Flame Shape". *Fire Technology*, 4: 51 - 58.

Anderson, H.E. (1969). "Heat Transfer and Fire Spread". USDA Forest Service, Research paper INT-69, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.

Anderson, H.E. (1990). "Moisture diffusivity and response time in forest fuels". *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 315 - 325.

Anderson, H.E., Schuette, R.D., 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.

Anderson, W., Pastor, E., Butler, B., Catchpole, E., Dupuy, J.L. Fernandes, P., Guijarro, M., Mendes-Lopes, J.M., Ventura, J. (2006). "Evaluating models to estimate flame characteristics for free-burning fires using laboratory and field data". *Proceedings of the V International Conference on Forest Fire Research*, Figueria da Foz, Portugal.

André, J.C.S. (1996). "A theory on the propagation of surface forest fires fronts". *Tesi Doctoral*, Universitat de Coimbra, Portugal (en portuguès).

Andrews, P.L. (1986). "Behave: Fire behavior prediction and fuel modeling system- Burn subsystem. Part 1". USDA Forest Service, Research Paper INT-194.

Arenas, A. i Herranz, A. (1989). "Análisis dimensional y sus aplicaciones". Universidad de Murcia, 82 p.

Arnaldos, J., Navalón, X., Pastor, E., Planas, E., Zárate L. (2004). "Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales". Ed. Mundiprensa, 414 p.

Babrauskas, V. (2003). "Ignition Handbook". Fire Science Publishers, Issaquah, WA.

Balbi, J.H., Rossi, J.L., Marcelli, T., Santoni, P.A. (2007). "A 3D Physical Real-Time Model of Surface Fires Across Fuel Beds". *Combustion Science and Technology*, 179: 2511 - 2537.

- Bradbury, A.G.W., Sakai, Y., Shafizadeh, F. (1979). "Kinetic model for pyrolysis of celulose". *J. Appl. Polym. Sci.*, 23: 3271 - 3280.
- Bridgman, P.W. (1978). "Dimensional Analysis". AMS Press, New York.
- Brodkey, R.S., Hershey, H.C. (1988). "Transport phenomena. A unified approach". Ed. McGraw-Hill, New York.
- Brown, J.K. (1972). "Field test of a rate of fire spread model in slash fuels". USDA Forest Service Research, Paper INT-116.
- Bruce, H.D., Pong, W.Y., Fons, W.L. (1961). "The effect of density and thermal diffusivity of wood on the rate of burning of wood cribs". U.S. Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Sta., Technical Paper 63.
- Bruner, A.D. i Klebenow, D.A. (1979). "Predicting success of prescribed fires in pinyon-jupiter". U.S.D.A. Forest Service, Technical Report INT-219.
- Burriel, J.A., Ibàñez, J.J., Mata, T., Vayreda, J. (2002). "Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Regió Forestal I". Agrania editio, S.C.P.
- Burrows, N.D. (1995). "Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles". Ed: Department of Conservation and Land Management, CALM Science Division.
- Byram, G.M. (1959). *Forest fire control and use*. Ed: K.P. Davis, McGraw-Hill, New York.
- Byram, G.M. (1966). "Scaling laws for modeling mass fires". *Pyrodynamics* 4: 271-284.
- Byram G.M., Clements, H.B., Elliot, E.R., George, P.M. (1964). "An experimental study of model fires". Project Fire Model. Technical report number 3. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.
- Byram, G.M., Clements, H.B., Bishop, M.E., Nelson, R.M., Jr. (1966). "An experimental study of model fires". Final Report of Project Fire Model, OCD-PS-65-40, USDA Forest Service, Southern Forest Fire Laboratory.
- Carrier, G.F., Fendell, F.E. i Wolf, M.F. (1991). "Wind-Aided Firespread across Arrays of Discret Fuel Elements. I. Theory". *Combust. Sci. and Tech.*, 75: 31 - 55.

- Catchpole, W.R., Catchpole, E.A., Rothermel, R.C., Morris, G.A., Butler, B.W. Latham, D.J., (1998). "Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel". *Combust. Sci.Technol* 131, 1 - 37.
- Chandler, C.C. (1957). "Light burning in southern California fuels". U.S. Forest Service Calif. Forest & Range Exp. Sta. Research Note 119.
- Chandler, G., Chesney, P., Thomas, P., Trabaud, L., Williams, D. (1983). "Fire in forestry: forest fire behavior and effects". Ed. Wiley Interscience Publication, New York.
- Cheney, N.P. (1981). "Fire Behaviour". *A Fire and the Australian Biota*, Ed. Gill, A.M., Groves, R.H., Noble, I.R., Australian Academy of Science, Canberra, 151 - 175.
- Cheney, N.P. (1990). "Quantifying bushfires". *Journal Math. Comput. Modelling*, 13(12): 9 - 15.
- Cheney, N.P. i Gould, J.S. (1995). "Fire Growth in grassland fuels". *International Journal of Wildland Fire*, 5(4): 237 - 247.
- Cheney, N.P., Gould, J.S., Catchpole W.R. (1993). "The influence of fuel, weather, and fire shape variables on fires-spread in grasslands". *International Journal of Wildland Fire* 3(1):31 - 44.
- Cheney, N.P. i Sullivan, A.L. (2008). "Grassfires: Fuel, weather and fire behaviour". 2nd Edition. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 160 p.
- Clark, T.L., Jenkins, M.A., Cohen, J., Packham, D.R. (1996a). "A coupled atmosphere - fire model: Convective feedback on fire-line dynamics". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35: 875 - 901.
- Clark, T.L., Jenkins, M.A., Cohen, J., Packham, D.R. (1996b). "A coupled atmosphere - fire model: role of convective Froude number and dynamic fingering at the fireline". *International Journal of Wildland Fire*, 6: 177 - 190.
- Cohen, J.D. i Butler, B.W. (1998). "Modeling potential structure ignitions from flame radiation exposure with implications for wildland/urban interface fire management". *Proceedings of the 13th Fire and Forest Meteorology Conference*, Lorne, Australia 1996. Ed. IAWF, USA, 81 - 86.
- Cohen, M., Cuñas, P., Diez, C., Fernandes, P., Guijarro, M., Moro, C. (2002). "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. (1967). "PROJECT FLAMBEAU. An investigation of Mass Fire (1964 - 1967)". OCD Work Unit No. 2536-A, Final Report OCD- PS-65-26.
- Cox, G. (1977). "Gas velocity measurements in fires by cross-correlation of random thermal fluctuations - A comparison with conventional techniques". *Combustion and Flame*, 28: 155 - 163.
- Cruz, M.G. (2004). "Ignition of crown fuels above a spreading surface fire". Tesi Doctoral. University of Montana, Missoula, MT.
- Cruz, M.G. i Gould, J. (2009). "Field-based fire behaviour research: past and future roles". Proceedings of the 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E. i Wakimoto, R.H. (2004). "Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands". *Forest Science*, 50(5): 640 - 658.
- Curry, J.R. i Fons, W.L. (1938). "Rate of spread of surface fires in the ponderosa pine type of California". *Journal of Agricultural Research*, 57: 239 - 267.
- Deeming, J.E., Burgan, R. E., Cohen, J. D. (1977). "The National Fire-Danger Rating System-1978". United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-39 Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utha. pp. 66.
- De Mestre, M.J., Catchpole, E.A., Anderson, D.H., Rothermel, R.C. (1989). "Uniform propagation of a planar fire front without wind". *Combustion Science and Technology*, 65: 231 - 234.
- Di Blasi, C. (2008). "Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis". *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(1): 47 - 90.
- Dupuy, J.L. (1995). "Slope and fuel load effects on fire behavior: Laboratory experiments in pine needles fuel beds". *International Journal of Wildland Fire*, 5(3): 153 - 164.
- Dupuy, J.L. (1997). "Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts: expérimentation, test et proposition de modèles". Tesi doctoral, Université Claude Berland (Lyon1), 272p.
- Dupuy, J.L., Larini, M. (1999). "Fire spread through a porous forest fuel bed: a radiative and convective model including fire-induced flow effects". *International Journal of Wildland Fire*, 9(3): 155 - 172.
- Dupuy, J.L., Marechal, J., Bouvier, L., Lois, N. (1998). "Measurement of temperatures and radiant heat fluxes during static fires in a porous fuel". Proceedings of the 3rd International Conference on Forest

Fire Research – 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Luso – Coimbra, Portugal – 16/20 Novembre 1998.

Dupuy, J.L., Maréchal, J., Morvan, D. (2003). "Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties". *Combustion and Flame*, 135: 65 - 76.

Dupuy, J.L., Maréchal, J., Portier, D. (2002). "Variability of laboratory fire rate of spread related to uncontrolled atmospheric conditions and fuel properties". *A Forest Fire Research and Wildland Fire Safety*, Ed. Millpress, Rotterdam.

Dupuy, J.L., Vachet, P., Maréchal, J., Berthon, A., Bournot, P., Stefanini, J.(2006). "Gas velocity measurements in flames from a forest fuel". *Proceedings of the 5th International Conference on Forest Fire Research, Figueira da Foz (Portugal), 27 – 30 de Novembre de 2006*.

Emmons, H. (1963). "Fire in the forest". *Fire Res. Abstr. and Rev.*, 5: 163 - 178.

Emori, R.I. i Saito, K. (1982). "Model Experiment of Hazardous Forest Fire Whirl". *Fire Technology*, 18: 319 - 327.

Emori, R.I. i Saito, K. (1983). "A Study of Scaling Laws in Pool and Crib Fires". *Combustion Science and Technology*, 31: 217 - 231.

Emori, R.I., Iguchi, Y., Saito, K., Wichman, I.S. (1988). "Simplified Scale Modeling of Turbulent Flame Spread with Implication to Wildland Fires". *Fire Safety Science – Proceedings of the Second International Symposium*, 263 - 273.

Evans, R.J. i Milne, T.A. (1987). "Molecular characterization of the pyrolysis of biomass". *Fundamentals Energy Fuels*, 1: 123 - 137.

Fahnestock, G.R. (1970). "Two keys for appraising forest fire fuels". *USDA Forest Service, Research Paper PNW - 99*.

Fernandes, P.M. i Botelho, H.S. (2003). "A review of prescribed burning effectiveness in fire hazard reduction". *International Journal of Wildland Fire*, 12(2): 117 - 128.

Fernandes, P.M., Botelho, H.S., Loureiro, C. (2002). "Models for the sustained ignition and behaviour of low-to-moderately intense fires in maritime pine stands". In: Viegas, D.X. (Ed.), *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Millpress, Rotterdam.

- Fernandes, P.M., Catchpole, W.R., Rego, F.C. (2000). "Shrubland fire behaviour modelling with microplot data". *Can. J. For. Res.* 30: 889 - 899.
- Fernandes, P.M., Cohen, M., Guijarro, M., Rigolot, E. (2003). "Fire Star Field Fires: methods. Deliverable: D7-01". *Fire Star: A decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland-urban interfaces*, EVG1-CT-2001-00041.
- Fernandes, P.M., Botelho, H., Cohen, M., Cuiñas, P., Dupuy, J.L., Fonturbel, M.T., Loureiro, C., Maréchal, J., Philippe, P., Pérez-Gorostiaga, P., Portier, D., Rigolot, E., Ruas, L., Valette, J.C., Vega, J.A. (2004). "Fire Star Field Fires: Second campaign. Deliverable: D7-05". *Fire Star: A decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland-urban interfaces*, EVG1-CT-2001-00041.
- Finney, M.A. (1998). "FARSITE: Fire Area Simulator – model development and application." USDA Forest Service, Research paper RMRS-RP-4, Ogden, UT.
- Fischer, W.C. (1978). "Planning and evaluating prescribed fires. A standard procedure". U.S.D.A. Forest service, General Technical Report INT-43.
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M., Gowman, L.M. (2009). "Implications of changing climate for global wildland fire". *Int. Journal of Wildland Fire*, 18(5): 483 - 507.
- Fons, W.L. (1946). "Analysis of fire spread in light forest fuels". *Journal of Agricultural Research*, 72: 93 - 121.
- Fons, W.L., Clements, H.B., Elliot, E.R., George, P.M. (1962). "Project fire model. Summary Progress report II". USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station, Southern Forest Fire Laboratory, Macon GA.
- Fons, W.L., Clements, H.B., George, P.M. (1963). "Scale effects on propagation rate of laboratory crib fires". *Proceedings of the 9th Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute, Pittsburgh.
- Fosberg, M. A. (1970). "Drying rates of heartwood below fiber saturation". *Forest Sci.* 16. pp 57-63
- Frandsen, W.H. (1973). "Effective heating of fuel ahead of spreading fire". USDA Forest Service, Research Paper INT-140.

- Gill, A.M, Knight, I.K. (1988). "Fire measurement". Proceedings of the Conference on Bushfire Modelling and Fire Danger Rating Systems, Canberra, 11 – 12 de Juliol de 1988.
- Gould J.S., McCaw W.L., Cheney N.P., Ellis P.F., Knight I.K., Sullivan A.L. (2007). "Project Vesta. Fire in dry eucalypt forest: fuel structure, fuel dynamics and fire behaviour". Ensis-CSIRO, Canberra ACT, and Department of Environment and Conservation, Perth WA.
- Green, L.R. (1970). "An Experimental Prescribed Burn to reduce fuel hazard in chaparral". U.S.D.A. Forest Service, Research Note PSW-216.
- Grishin, A., Gruzin, A., and Gruzina, E. (1984). "Aerodynamics and heat exchange between the front of a forest fire and the surface layer of the atmosphere". Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 25(6): 889 - 894.
- Groce, P.A. i Xin, Y. (2005). "Scale modeling of quasi-steady wood crib fires in enclosures". Fire Safety Journal, 40: 245 - 266.
- Grotkjaer, T., Dam-Johansen, K., Jensen, A.D., Glarborg, P. (2003) "An experimental study of biomass ignition". Fuel 82, 825 - 833.
- Guijarro, M., Diez, C., Hernando, C., Madrigal, J., Dupuy, J.L., Vachet, P., Maréchal, J., Portier, D., Ventura, J., Mendes-Lopes, J.M. (2003). "Deliverable D7-04: Fire Star Laboratory Fires: First campaign". Fire Star: A decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland – urban interfaces. Contract number: EVG1-CT-2001-0041.
- Guijarro, M., Hernando, C., De Los Santos, J.A., Díez, C. (1997). "EFAISTOS. Experiments and simulations for improvement and validation of behaviour models of forest fires". European Contract ENV4-CT96-0299. Intermediate report. Forest fire behaviour in the wind tunnel.
- Guijarro, M., Madrigal, J., Hernando, C., Díez, C., Dupuy, J.D., Vachet, P., Maréchal, J., Aranda, J.M., Melénez, J., López, F. (2006). "Comparison of tempertaures measurements with thermocouples and infrared cameras".
- Hottel, H.C., Williams, G.C., Kwentus, G.K. (1971). "Fuel pre-heating in free-burning fires". Proceedings of the 13th Symposium International on Combustion, 963 - 970.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P. (2002). "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" Fifth Edition, John Wiley and Sons, Inc., 980 pp.

- Kelsey, K.E. (1957). "The sorption of water vapour by wood". Australian Journal of Applied Sciences, 8: 42 - 54.
- King, N.K. (1973). "The influence of water vapour on the emission spectra of flames". Combust. Sci. Technol, 6: 247 - 256.
- Knight, I.K., Sullivan, A.L., Hutchings, P.T., Cheney, S.P. (2002). "Feasibility study of a gas-fired bushfire flame front simulator. Final Report". Forestry and Forest Products Client Report N. 1062, CSIRO.
- Kuwana, K., Sekimoto, K., Saito, K., Williams, F.A. (2008). "Scaling fire whirls". Fire Safety Journal, 43: 252 - 257.
- Lancaster, J. W. (1970). "Timelag useful in fire danger rating". Fire Control Notes 31 (3) pp 6-8.
- Langhaar, H.L. (1951). "Dimensional analysis and the theory of models". John Wiley & Sons, New York.
- Lee, B.T. (1972). "Laboratory Scaling of the Fluid Mechanical Aspects of Large Fires". Combustion Science and Technology, 4: 233 - 239.
- Lee, S.L., Emmons, H.W. (1961). "A Study of natural convection above a line fire". Journal of Fluid Mechanics, 11: 353 - 369.
- Leicester, R.H. (1985). "Building technology to resist fire, flood, and drought. A Natural Disasters in Australia". Ed. Aust. Acad. Tech. Sci., Parkville, Victoria, 221 - 236.
- Linn, R.R. (1997). "Transport model for prediction of wildfire behavior". Los Alamos National Laboratory Scientific Report LA13334-T.
- Marcelli, T., Santoni, P., Simeoni, A., Leoni, E., Porterie, B. (2004). "Fire spread across pine needle fuel beds: characterization of temperature and velocity distributions within the fire plume". International Journal of Wildland Fire, 13: 1 - 12.
- Martin, L. (2007). "Caracterització geomètrica i tèrmica de la flama dels incendis forestals". Projecte Final de Carrera. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Martínez, E., Castellnou, M., Molina, D. (2005). "Pre-suppression of large fires: The case of Rialb". Llibre de ponències de la II Conferència Internacional sobre Estratègies de Prevenció d'Incendis Forestals al Sud d'Europa. Barcelona, 9 - 11 Maig.

- Martini, R.E., Finney, M.A., Molina, D.M., Sapsis, D.B. (1991). "Dimensional analysis of flame angle versus wind speed". Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology, Missoula.
- McAlpine, R.S., Lawson, B.D., Taylor, E. (1991). "Fire spread across a slope". A Proceedings, 11th Conference on Fire and Forest Meteorology, Missoula, MT, 218 – 225.
- McArthur, A.G. (1962). "Control burning in Eucalypt forests". Comm. Aust. Forest and Timber Bureau, Canberra, Leaflet 80.
- McArthur, A.G. (1966). "Weather and grassland fire behaviour". Commonw. Aust., Forest and Timber Bureau, Canberra, Leaflet 100.
- McArthur, A.G. (1967). "Fire Behaviour in Eucalyptus forests". Commonw. Aust., Dep. Nat. Devel., Forest and Timber Bureau, Canberra, Leaflet 107.
- McArthur, A. G. (1968). "The effect of time on fire behavior and fire suppression problems". South Aust. Emergency Fire Serv. Adelaide, South Australia.
- McArthur, A.G. (1977). "Grassland fire danger meter Mk V". Country Fire Authority of Victoria, Melbourne, Australia.
- McCaffrey, B.J. (1979). "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results". NSBIR 79-1910. National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- McRae, R. (2004). "Virtually volvelles". A Proceedings, Bushfire 2004, Department of Environment and Heritage, Adelaide, SA.
- Mendes-Lopes, J.M.C., Ventura, J.M.P, Rodrigues, J.A.M. (2002). "Determination of heat transfer coefficient through a matrix of *Pinus pinaster* needles". A Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Ed. Millpress, Rotterdam.
- Mendes-Lopes, J.M.C., Ventura, J.M.P., Amaral, J.M.P. (2003). "Flame Characteristics, temperature-time curves, and rate of spread in fires propagation in a bed of *Pinus pinaster* needles". Int. J. Wildland Fire 12, 67 - 84.
- Mercer, G.N. i Weber, R.O. (2001). "Fire Plumes" a Forest Fires: Behaviour and Ecological Effects. Johnson, E.A. i Miyanishi, K. Academic Press, San Diego, 594 p.
- Merril, D.F. i Alexander, M.E. (1987). "Glossary of forest fire management terms". National Research Council of Canada, Committee for Forest Fire Management, Ottawa, Canada.

- Morandini, F., Balbi, J.H., Rinieri, F., Marcelli, T. (2002a). "Measurement of pine needles buoyant diffusion flame characteristic length scales using infrared image processing technique". A Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Ed. Millpress, Rotterdam.
- Morandini, F., Santoni, P.A., Balbi, J.H. (2001a). "The contribution of radiant heat transfer to laboratory scale fire spread under the influences of wind and slope". Fire Safety Journal, 36: 519 - 543.
- Morandini, F., Santoni, P.A., Balbi, J.H. (2001b). "Fire front width effects on fire spread across a laboratory scale sloping fuel bed". Combustion Science and Technology, 166: 67 - 90.
- Morandini, F., Santoni, P.A., Balbi, J.H., Ventura, J.M. Mendes-Lopes, J.M. (2002b). "A two dimensional model of fire spread across a fuel bed including wind combined with slope conditions". *International Journal of Wildland Fire*, 11: 53 - 64.
- Morandini, F., Silvani, X., Rossi, L., Santoni, P.A., Simeoni, A., Balbi, J.H., Rossi, J.L., Marcelli, T. (2006). "Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties". Fire Safety Journal, 41(3): 229 - 235.
- Morf, P., Hasler, P., Nussbaumer, T. (2002). "Mechanisms and kinetics of homogeneous secondary reaction of tar from continuous pyrolysis of wood chips". Fuel (8): 843 - 853.
- Morton, B.R., Taylor, G.I., Turner, J.S. (1956). "Turbulent buoyant convection from maintained and instantaneous sources". Proc. Roy. Soc. A, 234: 1 - 23.
- Morvan, D. (2007). "A numerical study of flame geometry and potential for crown fire initiation for a wildfire propagating through shrub fuel". *International Journal of Wildland Fire*, 16: 511 - 518.
- Morvan, D. i Dupuy, J.L. (2004). "Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation". Combustion and Flame, 138: 199 - 210.
- Muñoz, M. (2005). "Estudio de los parámetros que intervienen en la modelización de los efectos de grandes incendios de hidrocarburo: geometría y radiación térmica de la llama". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Myers, J., J. Gould, M. G. Cruz, i M. Henderson. (2007). "Fuel dynamics and fire behaviour in Australian mallee and heath vegetation". USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-46CD.
- Nelson, R.M. Jr (1980). "Flame characteristics for fires in southern fuels". USDA Forest Service, Southeast For. Exp. Stn. Asheville, North Carolina, Research Paper SE-205.

- Nelson, R.M. Jr (1993). "Byram's derivation of the energy criterion for forest and wildland fires". *International Journal of Wildland Fire*, 3(3): 131 - 138.
- Nelson, R.M. Jr (2001). "Water Relations of Forest Fuels". A Johnson, E.A. i Miyanishi, K. (Ed): *Forest Fires: Behaviour and Ecological Effects*. Academic Press, San Diego, 594 pp.
- Nelson, R.M. Jr (2002). "An effective wind speed for models of fire spread." *International Journal of Wildland Fire*, 11: 153 - 161.
- Nelson, R.M. Jr (2003). "Power of the fire - a thermodynamic analysis". *International Journal of Wildland Fire*, 12: 51 - 65.
- Nelson, R.M. i Adkins, C.W. (1986). "Flame characteristics of wind-driven surface fires". *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 1293 - 1300.
- Nelson, R.M. i Adkins, C.W. (1988). "A dimensionless correlation for the spread of wind-driven fires." *Canadian Journal of Forest Research*, 18: 391 - 397.
- Palheiro, P.M. i Cruz, M.G. (2004). "Results and Discussion: Fire behaviour analysis of gestosa experiments". Report intern. ADAI. Universitat de Coimbra.
- Pastor, E. (2004). "Contribució a l'estudi de l'efecte dels retardants en l'extinció d'incendis". Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Pastor, E., Àgueda, A., Andrade-Cetto, J., Muñoz, M., Pérez, Y., Planas, E. (2006). "Computing rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing". *Fire Safety Journal*, 41(8): 569 - 579.
- Pastor, E., Rigueiro, A., Zárate, L., Giménez, A., Arnaldos, J., 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., Zárate, L., Planas, E., Arnaldos, J. (2003). "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour". *Progress in Energy and Combustion Science*, 29: 139 - 153.
- Pérez, Y. (2003). "Posada a punt d'un sistema per a l'estudi de l'efecte 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.
- Pérez, Y., Àgueda, A., Pastor, E., Planas, E. (2006). "Study of the effect of changing scale in forest fire experimentation by means of dimensional analysis". *Forest Ecology and Management*, 234, S1.

- Pérez, Y., Pastor, E., Àgueda, A., Giménez, A., Arnaldos, A., Planas, E. (2005). "Synergies between management and research in forest fires: the challenge of prescribed burnings". Proceedings of the 2nd International Conference on Prevention Strategies for fires in Southern Europe.
- Philpot, C.W. (1965). "Temperatures in a large natural-fuel fire" U.S.D.A. Forest Service Research Note PSW-90.
- Plucinski, M., Gould, J., Pastor, E., Planas, E., Pérez, Y., McCarthy, G. (2009). "Project FuSE: Aerial Suppression Experiments". Proceedings of the International Wildfire Management Conference, June 18 - 20, Sydney.
- Portiere, B., Loraud, J.C., Morvan, D., Larini, M. (1999). "A numerical study of buoyant plumes in cross-flow conditions". *International Journal of Wildland Fire*, 9(2): 101 - 108.
- Porterie, B., Morvan, D., Larini, M., Loraud, J.C. (1998). "Wildfire propagation: A two-dimensional multiphase approach". *Combust. Explo. Shock Waves*, 34: 139 - 150.
- Pyne, S.J., Andrews, P.L., Laven, R.D. (1996). "Introduction to Wildland fire". John Wiley & Sons, 808 p.
- Quintiere, J.G. (1989). "Scaling Applications in Fire Research" *Fire Safety Journal*, 15: 3 - 29.
- Raupach, M.R. (1990). "Similarity analysis of the interaction of bushfire plumes with ambient winds". *Mathematical Computing and Modelling*, 13: 113 - 121.
- Rossa, C. i Viegas, D.X. (2009). "Propagation of wind and slope backfires". Proceedings of the 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009.
- Rothermel, R.C. (1972). "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels". U.S.D.A. Forest Service, Research Paper INT-115.
- Rothermel, R.C. (1983). "How to predict the spread and intensity of forest and range fires". USDA Forest Service, General Technical Report INT-143. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Rothermel, R.C. i Anderson, H.E. (1966). "Fire spread characteristics determined in the laboratory". U.S.D.A. Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Sta., Ogden, Utah, Research Paper INT-30.
- Santoni, P.A., Balbi, J.H., Dupuy, J.L. (1999). "Dynamic modelling of upslope fire growth". *Int. J. of midland Fire*, 9: 285 - 292.

- Santoni, P.A., Simeoni, A., Rossi, J.L., Bosseur, F., Morandini, F., Silvani, X., Balbi, J.H., Cancellieri, D., Rossi, L. (2006). "Instrumentation of wildland fire: Characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub". *Fire Safety Journal*, 41: 171 - 184.
- Schroeder, M.J., Buck C.C. (1970). "Fire weather. A guide for application of meteorological information to forest fire control operations". U.S.D.A. Forest Serv. Agr. Handbook p 360.
- Schuette, R.D. (1965). "Preparing reproducible pine needle fuel beds". USDA Forest Service, Research Note INT-36, Intermountain Forest & Range Experiment Station.
- Sharples, J.J. (2008). "Review of formal methodologies for wind-slope correction of wildfire rate of spread". *International Journal of Wildland Fire*, 17: 179 - 193.
- Silvani, X. i Morandini, F. (2009). "Fire spread experiments in the field: Temperature and heat fluxes measurements". *Fire Safety Journal*, 44(2): 279 - 285.
- Silvani, X., Morandini, F., Muzy, J.F. (2009). "Wildfire spread experiments: Fluctuations in thermal measurements". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(9): 887 - 892.
- Simard, A.J. (1989). "Measuring and interpreting flame height in wildland fires". *Fire Tech.*, 25: 114 - 133.
- Simard, A.J. (1991). "Fire severity, changing scales, and how things hang together". *Int. Journal of Wildland Fire*, 1(1): 23 - 34.
- Soma, S. i Saito, K. (1991). "Reconstruction of fire whirls using scale models". *Combustion and Flame*, 86: 269 - 284.
- Spalding, D.B. (1963). "The art of partial modelling". *Proceedings of the 9th Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute, Pittsburgh.
- Steward, F.R., Wuest, L.J., Waibel, R.T. (1977). "Some characteristics of fires within uniform fuel matrices". ASME Publication No. 77-HT-71, New York.
- Stocks, B.J. (1987). "Fire behaviour in immature jack pine". *Canadian Journal of Forest Research*, 17: 80 - 86.
- Stocks, B.J. (1989). "Fire behaviour in immature jack pine". *Canadian Journal of Forest Research*, 19: 783 - 790.

- Stocks, B.J., Alexander, M.E., Lanoville, R.A. (2004). "Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME)". *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 1543 - 1547.
- Sullivan, A.L. (2007). "Convective Froude number and Byram's energy criterion of Australian experimental grassland fires". *Proceedings of the Combustion Institute*. 31: 2557 - 2564.
- Sullivan, A.L. (2009a). "Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models". *Int. Journal of Wildland Fire*, 18: 349 - 368.
- Sullivan, A.L. (2009b). "The CSIRO Pyrotron. Future fire now." *Proceedings of the 16th AFAC Conference and the Bushfire CRC Conference*, 24 – 29. september, Gold Coast, Australia.
- Sullivan, A.L., Ellis, P.F., Knight, I.K. (2003). "A review of radiant heat flux models used in bushfire applications". *International Journal of Wildland Fire*, 12: 101 - 110.
- Sullivan AL, Knight IK, Cheney NP. 2002. Predicting radiant heat flux from burning logs in a forest following a fire. *Australian Forestry* 65(1), 59 - 67.
- Taylor, E.S. (1974). "Dimensional analysis for engineers". Oxford (Eng.): Clarendon Press, 162 p.
- Taylor, G.I. (1961). "Fire under influence of natural convection". *International Symposium on the use of models in fire research*, W. G. Berl. (ed.). Ntl. Acad. Sci. –Nat. Res. Couc. Publ., p 786.
- Thomas, P.H. (1958). "On the rate of burning of cribs of wood". *Joint Fire Res. Organ., Boreham Wood, Herts, England. Fire Research Note* 370.
- Thomas, P.H. (1963). "The size of flames from natural fires". *Proceedings of the 9th Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute, Pittsburgh.
- Thomas, P.H., Webster, C.T., Raftery, M.M. (1961). "Experiments on buoyant diffusion flames". *Combustion and Flame*, 5: 359 - 357.
- Tieszen, S.R. (2001). "On the fluid mechanics of fires". *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33: 67 – 92.
- Trabaud, L. (1979). "Etude du comportement du feu dans la garrigue de Chêne kermes à partir des température". *Annuaire Sciences Forestières*, 1: 13 - 38.
- Trabaud, L. (1992). "Les feux de forêts". Editions France – Selection. p 278.

- Van Wagner, C.E. (1963). "Prescribed burning experiments in red and white pine". Canada Department of Forestry, Publication N. 1020. Ottawa.
- Van Wagner, C.E. (1968). "Fire behavior mechanisms in a red pine plantation: field and laboratory evidence". Congress of the International Union of Forest Research Organizations. Munich, 4 - 9 de setembre de 1967.
- Van Wagner, C.E. (1971). "Two solitudes in forest fire research". PS-X-29, Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station.
- Van Wagner, C.E. (1972). "Heat of combustion, heat yield and fire behaviour". PS-X-35, Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station.
- Van Wagner, C.E. (1973). "Height of crown scorch in forest fires". Canadian Journal of Forest Research, 3: 373 - 378.
- Van Wagner, C.E. (1977). "Conditions to start and spread of crown fire". Canadian Journal of Forest Research, 7: 23 - 34.
- Vega, J.A., Cuiñas, P., Fontúrbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., Fernández, C. (1998). "Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes". In: Viegas, D.X. (Ed.), Proc. 3rd Int. Conf. Forest Fire Research & 14th Fire and Forest Meteorology, Conf. ADAI, Coimbra. 713 - 728.
- Vega, J.A., Cuiñas, P., Fontúrbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., Fernández, C. (2000). "Desarrollo de nuevos modelos de predicción de comportamiento del fuego". In: Vélez, R. (Coord.), La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Ed. McGraw-Hill. 9.11-9.20.
- Weise, D.R. (1993). "Modelling wind and slope-induced wildland fire behavior". Tesi Doctoral, University of California, Berkeley.
- Vélez, R. (coordinador). (2000). "La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias". McGraw-Hill, Madrid.
- Ventura, J.M.P., Mendes-Lopes, J.M.C., Rego, F.M.C, Bothelo, H.S. (1994). "Temperature - Time curves in forest fire" Proc. 2nd Int. Conf. Forest Fire Research, Vol I: 335 - 342, Coimbra.
- Ventura, J.M.P., Mendes-Lopes, J.M.C., Ripado, L.M.O. (1998). "Temperature-time curves in fire propagating in beds of pine needles". Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research 14th Conference on Fire and Forest Meteorology, Vol I: 699 - 711, Luso.

- Viegas, D. X. (1998). "Forest fire propagation". *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 356: 2907 - 2928.
- Viegas, D.X. (2004). "Slope and wind effects on fire propagation". *International Journal of Wildland Fire*, 13: 143 - 156.
- Viegas, D.X. (2005). "A Mathematical Model for Forest Fires Blowup". *Combustion Science and Technology*, 177: 27 - 51.
- Viegas, D.X., Cruz, M.G., Ribeiro, L.M., Silva, A.J., Ollero, A., Arrue, B., Dios, R., Gómez-Rodríguez, F., Merino, L., Miranda, A.I., Santos, P. (2002). "Gestosa fire spread experiments". *A Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Viegas (Ed.), Millpress, Rotterdam.
- Viegas, D.X., Ribeiro, P.R, Maricato, L. (1998). "An empirical model for the spread of a fireline inclined in relation to the slope gradient or to wind direction". *Proc. 3rd Int. Conf. Forest Fire Research*, Vol I: 325 - 342, Luso.
- Viegas, D.X. i Rossa, C. (2009). "Fireline rotation analysis". *Combust. Sci. and Tech.*, 181: 1495 - 1525.
- Vogel, M. i Williams, F.A. (1970). "Flame propagation along matchsticks arrays". *Combustion Science Technology*, 1: 429 - 436.
- Walker, J.D., Stokes, B.J. (1968). "Thermocouple Errors in Forest Fire Research". *Fire Technology*, 4: 59 - 62.
- Weber, R.O. (1989). "Analytical models for fire spread due to radiation". *Combustion and Flame*, 78: 398 - 408.
- Weber, R.O., Gill, A.M., Lyons, P.R.A., Moore, P.H.R, Bradstock, R.A., Mercer, G.N. (1995). "Modelling wildland fire temperatures". *CALMScience Supplement*, 4: 23- 26.
- Williams, F. (1982). *Urban and wildland fire phenomenology*. *Progress in Energy Combustion Science*, 8: 317 - 354.
- Wilson, R.A. (1982). "A reexamination of fire spread in free-burning porous fuel beds". *USDA Forest Service Research Paper INT - 289*.
- Wilson, R.A. (1990). "Reexamination of Rothermel's fire spread equations in no-wind and no-slope Conditions". *USDA For. Serv. Res. Pap. INT-434, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden*.

- Wolff, M.F., Carrier, G.F., Fendell, F.E. (1991). "Wind-aided firespread across arrays of discrete fuel elements II. Experiment". *Combustion Science and Technology* 77: 261 - 289.
- Wotton, B.M., McAlpine, R.S., Hobbs, M.W. (1999). "The Effect of Fire Front Width on Surface Fire Behaviour". *Int. Journal of Wildland Fire*, 9(4): 247 - 253.
- Wu, J. i Li, H. (2006). "Concepts of scale and scaling". In Wu *et al.* (Ed): *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*, Springer, Netherlands.
- Zárate, L. (2004). "Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales". *Tesi Doctoral*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Zhou, X., Mahalingam, S., Weise, D. (2005). "Modeling of Marginal Burning State of Fire Spread in Live Chaparral Shrub Fuel Bed". *Combustion and flame*, 143: 183 - 198.
- Zhou, X., Sun, L., Mahalingam, S. (2003). "Thermal particle image velocity estimation of fire plume flow". *Combust. Sci. And Tech.*, 175: 1293 - 1316.

ANNEX I

En aquest annex es recopilen els codis dels algorismes de càlcul implementats amb el programari *Matlab*[®] per a determinar la velocitat de propagació (*'homografia.m'*, *'velocitat.m'* i *'velocitat_mod.m'*), la longitud del front de flames (*'eflength.m'*), l'altura i la longitud de la flama (*'altura.m'*) i la temperatura del llit de combustible (*'temp_s'*). A més, s'inclouen també les funcions *'loadir.m'* i *'mplot'*, que són cridades pels programes *'velocitat.m'* i *'velocitat_mod.m'*.

Algoritme 'homografia.m'

```

function H=homografia(uv,w,l);

uv=[uv(1,:); 240-uv(2,:); uv(3,:)];
xy = [0 0 w/100 w/100;
      l/100 0 0 l/100;
      1 1 1 1];

uvmean = mean(uv)';

duv = mean(sqrt((uv(1,:)-uvmean(1)*ones(1,4)).^2+(uv(2,:)-uvmean(2)*ones(1,4)).^2));
Tuv = [sqrt(2)/duv 0 -uvmean(1)*sqrt(2)/duv; 0 sqrt(2)/duv -uvmean(2)*sqrt(2)/duv; 0 0 1];
uvtilde = Tuv * uv;
xymean = mean(xy)';

dxy = mean(sqrt((xy(1,:)-xymean(1)*ones(1,4)).^2+(xy(2,:)-xymean(2)*ones(1,4)).^2));
Txy = [sqrt(2)/dxy 0 -xymean(1)*sqrt(2)/dxy; 0 sqrt(2)/dxy -xymean(2)*sqrt(2)/dxy; 0 0 1];
xytilde = Txy * xy;

for i=1:4
    A(3*i-2:3*i,:) = [0 0 0 -uvtilde(:,i)' xytilde(2,i)*uvtilde(:,i)';
                    uvtilde(:,i)' 0 0 0 -xytilde(1,i)*uvtilde(:,i)';
                    -xytilde(2,i)*uvtilde(:,i)' xytilde(1,i)*uvtilde(:,i)' 0 0 0];
End

[U,S,V] = svd(A);
h = V(:,9);
Htilde=[h(1:3)';h(4:6)';h(7:9)'];

H = inv(Txy)*Htilde*Tuv;

```

Algorithme 'velocitat.m'

```
function [M, Tgris, Temp, Temps_Esp, limit_max, limit_min, limit, Rsqr_mean, Rsqr_max, p_limit_mean,
p_limit_max]=velocitat(m,H,int,cents);
```

```
files=importdata('files.all.txt');
fname=strvcat(files);
[a,b]=size(fname);
M=zeros(a,100);
Temp=zeros(3,a);
t=0;
```

```
for z=1:a
    [T0,OBJ,SCAL,Time]=loadir2(fname(z,:));
    Timesec=Time(1,4)*3600+Time(1,5)*60+Time(1,6)+Time(1,7)/1000;
```

```
for i=1:100
    for j=1:100
        uv4 = inv(H)*[i/100;j/100;1];
        uv4 = uv4/uv4(3);
        T(j,i)=T0(round(uv4(2)),round(uv4(1)));
    end
end
```

```
Tgris=(T-min(min(T)))/((max(max(T))-min(min(T))));
```

```
[d,e]=size(Tgris);
s=zeros(1,e);
for j=1:e
    [k,x]=find(Tgris(:,j)>=m);
    if ~isempty(k)
        c=size(k,1);
        s(j)=k(c);
    end
end
```

```
if s==zeros(1,e)
    M(z,:)=105;
else
    M(z,:)=s;

    y=find(s>1);
    if ~isempty(y);
        Temp(1,z)=Timesec;
        Temp(2,z)=mean(s(y));
        Temp(3,z)=max(s(y));
    else
        Temp(1,z)=0;
        Temp(2,z)=0;
        Temp(3,z)=0;
    end
end
end
```

```

limit_max=a;
limit=a;

for i=1:round(a/2);
    [f,g]=find(M(i,:)==0);
    if isempty(g)
        limit_min=i;
        break;
    end
end

q=find(Temp(1,:)==0);
Temp(:,q)=[];
Temps_Esp(1,:)=Temp(1,:)-Temp(1,1);
Temps_Esp(2,:)=Temp(2,:);
Temps_Esp(3,:)=Temp(3,:);

mplot(1:100, M(limit_min:int:limit,:)); axis ij;
figure(1); title('Perfil del front');
figure(1); xlabel('[cm]');
figure(1); ylabel('[cm]');

figure;
mplot(Temps_Esp(1,:), Temps_Esp(2,:), Temps_Esp(3,:));
figure(2); legend('Velocitat mitjana de propagacio', 'Velocitat maxima de propagacio',4);legend boxoff;
figure(2); xlabel('Temps [s]');
figure(2); ylabel('Espai [cm]');

[p_limit_mean, s_mean]=polyfit((Temps_Esp(1,limit_min:limit))', (Temps_Esp(2,limit_min:limit))',1);
Output = polyval(p_limit_mean,(Temps_Esp(1,limit_min:limit))');
Num=0; Den=0;
Mitjana=mean((Temps_Esp(2,limit_min:limit))');
for i=1:size(Output,1);
    Num=Num+(Output(i,:)-Mitjana)^2;
    Den=Den+((Temps_Esp(2,limit_min+i-1))'-Mitjana)^2;
end
Rsqr_mean=Num/Den

[p_limit_max, s_max]=polyfit((Temps_Esp(1,limit_min:limit_max))',
(Temps_Esp(3,limit_min:limit_max))',1);
Output = polyval(p_limit_max,(Temps_Esp(1,limit_min:limit_max))');
Num=0; Den=0;
Mitjana=mean((Temps_Esp(3,limit_min:limit_max))');
for i=1:size(Output,1);
    Num=Num+(Output(i,:)-Mitjana)^2;
    Den=Den+((Temps_Esp(3,limit_min+i-1))'-Mitjana)^2;
end
Rsqr_max=Num/Den

```


Algoritme 'velocitat_mod.m'

Function [M,Temp,limit_inf,limit_sup_max,Temps_Esp,Temps_Esp_cor,...
Temps_Esp_cor2,Rsqr_max,p_limit_max]=velocitat_leif(m,int,w,l,uv);

close all;

H=homografia(uv,w,l);

files=importdata('files.all.txt');

fname=strvcat(files);

[a,b]=size(fname);

M=zeros(a,w);

Temp=zeros(2,a);

for z=1:a

[T0,OBJ,SCAL,Time]=loadir2(fname(z,:));

Timesec=Time(1,4)*3600+Time(1,5)*60+Time(1,6)+Time(1,7)/1000;

for i=1:w

for j=1:l

uv4 = inv(H)*[(w/100)*(i/w);(l/100)*(j/l);1];

uv4 = uv4/uv4(3);

T(j,i)=T0(round(uv4(2)),round(uv4(1)));

end

end

Tgris=(T-min(min(T)))/((max(max(T))-min(min(T))));

Tgris=Tgris(end:-1:1,:);

[d,e]=size(Tgris);

s=zeros(1,e);

for j=1:e

[k,x]=find(Tgris(:,j)>=m);

if ~isempty(k)

c=size(k,1);

s(j)=k(c);

end

end

if s==zeros(1,e)

M(z,:)=500;

else

M(z,:)=s;

y=find(s>1);

if ~isempty(y);

Temp(1,z)=Timesec;

Temp(2,z)=max(s(y));

else

Temp(1,z)=0;

Temp(2,z)=0;

```

    end
  end
end

for i=round(size(M,1)/2):size(M,1)
  [f,g]=find(M(i,:)>=1);
  if ~isempty(g)
    limit_sup_max=i;
    break
  elseif (isempty(g)) && (i==a);
    limit_sup_max=i;
  end
end

for i=1:round(size(M,1)/2);
  [f,g]=find(M(i,:)==0);
  if isempty(g)
    limit_inf=i;
    break;
  elseif (0<(size(g,2))<=(round(w/10)))
    limit_inf=i;
    break;
  end
end

q=find(Temp(1,:)==0);
Temp(:,q)=[];
Temps_Esp(1,:)=Temp(1,:)-Temp(1,1);
Temps_Esp(2,:)=Temp(2,:);

Temps_Esp_cor=Temps_Esp(:,limit_inf:limit_sup_max);
deriv=diff(Temps_Esp_cor(2,:))./diff(Temps_Esp_cor(1,:));
SD=std(deriv);
mitj=mean(deriv);
x=size(deriv);
for i=1:x
  if (deriv(i)>SD+mitj) || (deriv(i)<mitj-SD);
    if deriv(i)>0
      Temps_Esp_cor(2,i+1)=0;
    elseif deriv(i)<0
      Temps_Esp_cor(2,i)=0;
    end
  end
end
end
Temps_Esp_cor2=Temps_Esp_cor;
q=find(Temps_Esp_cor2(2,:)==0);
Temps_Esp_cor2(:,q)=[];

[p_limit_max, s_max]=polyfit((Temps_Esp_cor2(1,:))', (Temps_Esp_cor2(2,:))',1)

Output = polyval(p_limit_max,(Temps_Esp_cor2(1,:))');
Num=0; Den=0;

```

```
Mitjana=mean((Temps_Esp_cor2(2,:)));  
  
for i=1:size(Output,1);  
    Num=Num+(Output(i,.)-Mitjana)^2;  
    Den=Den+((Temps_Esp_cor2(2,i))-Mitjana)^2;  
end  
Rsqr_max=Num/Den;  
  
mplot(1:w, M(limit_inf:int:limit_sup_max,:)); set(gca,'DataAspectRatio',[1 1  
1], 'PlotBoxAspectRatio',[w/100 l/100 1]); axis tight; box on;  
figure(1); title('Front evolution');  
figure(1); xlabel('[cm]');  
figure(1); ylabel('[cm]');  
  
figure;  
plot(Temps_Esp(1,:),Temps_Esp(2,:),'b');  
hold on; plot(Temps_Esp_cor2(1,:),  
Temps_Esp_cor2(2,:),'o','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','g','MarkerFaceColor','g');  
hold on; plot([Temps_Esp(1,limit_inf) Temps_Esp(1,limit_inf)], [0 l], '-k');  
hold on; plot([Temps_Esp(1,limit_sup_max) Temps_Esp(1,limit_sup_max)], [0 l], '-k');  
figure(2); legend('Maximum position vs time',4);legend boxoff;  
figure(2); xlabel('Time [s]');  
figure(2); ylabel('Distance [cm]');
```

Algorithme 'loadir2.m'

```

function varargout=loadir2(fname, varargin)

if nargin==1
    plt=0;
else
    plt=varargin{1};
end

if ischar(fname)
    ln=size(fname,2);
    a=findstr(fname,'\');

    if ~isempty(a)
        nn=size(a,2);
        txt=fname(a(nn)+1:ln-4);
    else
        txt=fname(1:ln-4);
    end

    varname=strcat('vd.',txt);
    vd=importdata(fname);
    vartime=eval(strcat(varname, '_DateTime'));
    inittime=vartime;

    s=eval(varname);
    s=s(240:-1:1,:);

    if plt==1
        [cs,h]=contour(s);
        title(txt);
        dif=deltat(vartime,inittime);
        xlabel(sprintf('10.3f',dif));
        colorbar;
    end

    if nargout==1
        varargout(1)={s};

    elseif nargout==2
        vd=rmfield(vd,fname(1:ln-4));
        varargout(1)={s};
        varargout(2)={vd};

    elseif nargout==3
        varargout(1)={s};
        varargout(2)={eval(strcat(varname, '_ObjectParam'))};
        varargout(3)={eval(strcat(varname, '_Scaling'))};

    elseif nargout==4
        varargout(1)={s};

```

```
varargout(2)={eval(strcat(varname, '_ObjectParam'))};  
varargout(3)={eval(strcat(varname, '_Scaling'))};  
varargout(4)={eval(strcat(varname, '_DateTime'))};  
end  
end
```

Algorithme 'mplot.m'

```

function varargout=mplot(x, varargin)
lines={'-'};
lines=strvcat(lines);
lnc=size(lines,1);
ln=1;

marks={'none'};
marks=strvcat(marks);
mkc=size(marks,1);
mk=1;

tcolors=[0 0 255; ...
255 0 255; ...
0 0 128; ...
128 0 128; ...
128 0 0; ...
0 128 0; ...
255 128 0; ...
128 0 255; ...
255 0 0; ...
0 0 0; ...
255 255 0; ...
0 255 0; ...
0 0 160; ...
128 128 0; ...
0 128 128; ...
192 192 192; ...
128 128 128; ...
255 0 128; ...
255 255 128; ...
0 255 255; ...
255 128 255; ...
64 64 64; ...
128 255 255]./255;
clc=size(tcolors,1);
cl=1;

z=[];
newplot;

[r c]=size(x);
if (r>1 & c==1)
for i=1:nargin-1
[m n]=size(varargin{i});
if (m==r)
for j=1:n
h=line(x,varargin{i}(:,j));
set(h,'linestyle',lines(ln,:),'color',tcolors(cl,:), 'marker',marks(mk,:), 'MarkerSize', 5);
[cl,ln,mk]=incline(cl,clc,ln,lnc,mk,mkc);
z=[z, h];

```

```

    end
elseif (n==c)
    for j=1:n
        h=line(x,varargin{i}(j,:));
        set(h,'linestyle',lines(ln,:), 'color',tcolors(cl,:), 'marker',marks(mk,:), 'MarkerSize', 5);
        [cl,ln,mk]=incline(cl,clc,ln,inc,mk,mkc);
        z=[z, h];
    end
end
end
elseif (r==1 & c>1)
    for i=1:nargin-1
        [m n]=size(varargin{i});
        if (n==c)
            for j=1:m
                h=line(x,varargin{i}(j,:));
                set(h,'linestyle',lines(ln,:), 'color',tcolors(cl,:), 'marker',marks(mk,:), 'MarkerSize', 5);
                [cl,ln,mk]=incline(cl,clc,ln,inc,mk,mkc);
                z=[z, h];
            end
        elseif (m==c)
            for j=1:n
                h=line(x,varargin{i}(:,j));
                set(h,'linestyle',lines(ln,:), 'color',tcolors(cl,:), 'marker',marks(mk,:), 'MarkerSize', 5);
                [cl,ln,mk]=incline(cl,clc,ln,inc,mk,mkc);
                z=[z, h];
            end
        end
    end
end
if nargout==1
    varargout{1}=z;
end

function [c,l,m]=incline(c,cc,l,lc,m,mc)
c=c+1;
if c>cc
    c=1;
end
l=l+1;
if l>lc
    l=1;
    m=m+1;
    if m>mc
        m=1;
    end
end
end

```

Algorithme 'eflength.m'

```

function [arclength, difflength, ...
meanarclength, Temps_Esp2]=eflength(Temps_Esp,M,W,limit_inf,limit_sup_max);

M2=M(limit_inf:limit_sup_max,:);
Temps_Esp2=Temps_Esp(1,limit_inf:limit_sup_max);
[a,b]=size(M2);
arclength=zeros(a,1);

for i=1:a
    pp=spline(1:1:W, M2(i,:));
    derpp=fnder(pp);
    farclength=sqrt(1.+(ppval(1:1:W,derpp)).^2);
    farclengthpp=spline(1:1:W,farclength);
    arclength(i,1)=quad(@ppval,1,W,[],[],farclengthpp);
end
difflength=zeros(a,1);
difflength=((arclength-W)/W)*100;
meanarclength=mean(arclength);

figure, plot(Temps_Esp2, arclength, 'o');
hold on; plot(Temps_Esp2, meanarclength); xlabel('Time[s]');ylabel('W[cm]'); title('Wef');
fgs=findobj('type','figure');
saveas(fgs,sprintf('Wef%02d'),'fig');

figure, plot(Temps_Esp2, difflength, 'r');xlabel('Time[s]');ylabel('Er W[cm]'); title('Er Wef');
fgs=findobj('type','figure');
saveas(fgs,sprintf('Error_Wef%02d'),'fig');

```


Algoritme 'altura.m'

```
function [res,h_mean,limg_mean,timg_mean]=altura(fV,fH)
ffile='imfiles.txt';
files=importdata(ffile);
nf=size(files,1);
res=[];
iptsetpref('ImshowTruesize','manual')
iptsetpref('TruesizeWarning','off')
iptsetpref('ImshowAxesVisible','on')
iptsetpref('ImshowBorder','tight');
for i=1:nf
    img=imread(strvcat(files(i)));
    himg=imshow(img);
    [x,y]=getpts;
    h=fV*(y(1)-y(2));
    dx=fH*(x(1)-x(2));
    timg=atan(dx/h);
    limg=(h^2+dx^2)^0.5;
    timg=timg*180/pi;

    res=[res; h, dx, limg, timg];
end

h_mean=mean(res(:,1));
limg_mean=mean(res(:,3));
timg_mean=mean(res(:,4));
```

Algoritme 'temp_s.m'

```

function [Tmax, Tmin, Ti,
Temp_s,Temp_s_vect,mitjana_Ts,std_Ts,median_Ts,time_abs,T_sup_mean]=temp_s(mff,miso,H);
files=importdata('files.all.txt');
fname=strvcat(files);
[a,b]=size(fname);
a=175;
for z=1:a
    [T0,OBJ,SCAL,Time]=loadir2(fname(z,:));
    Timesec=Time(1,4)*3600+Time(1,5)*60+Time(1,6)+Time(1,7)/1000;

    for i=1:100
        for j=1:100
            uv4 = inv(H)*[i/100;j/100;1];
            uv4 = uv4/uv4(3);
            T(j,i)=T0(round(uv4(2)),round(uv4(1)));
        end
    end

Tgris=(T-min(min(T)))/((max(max(T))-min(min(T))));
[d,e]=size(Tgris);
s=zeros(1,e);
ss=zeros(1,e);
for j=1:e
    [k,x]=find(Tgris(:,j)>=mff);
    [kk,xx]=find(Tgris(:,j)>=miso);
    if ~isempty(k)
        c=size(k,1);
        s(j)=k(c);
    end
    if ~isempty(kk)
        cc=size(kk,1);
        ss(j)=kk(cc);
    end
end

pos_ff=round(max(s));
pos_iso=round(mean(ss));
Temp_s=T(pos_ff:pos_iso,:);
Temp_s_vect=reshape(Temp_s,1,[]);
mitjana_Ts(1,z)=mean(Temp_s_vect);
std_Ts(1,z)=std(Temp_s_vect);
median_Ts(1,z)=median(Temp_s_vect);
time_(1,z)=Timesec;
T_sup_mean(1,z)=mean(mean(T));

Tmax(1,z)=max(max(T));
Tmin(1,z)=min(min(T));
Ti(1,z)=mff*(Tmax(1,z)-Tmin(1,z))+Tmin(1,z);

```

```
end  
time_abs=time_(1,:)-time_(1,1);  
figure;plot(time_abs,mitjana_Ts);  
hold on;plot(time_abs,median_Ts, '*');
```


ANNEX II

La longitud de preescalfament és una variable que es va definir en aquest treball. Per a fer-ho es van tenir en compte les limitacions de la metodologia desenvolupada per a la seva determinació. Per tal d'establir una definició el més rigorosa possible es va analitzar l'efecte del contingut d'humitat del combustible en aquesta variable, de manera que en aquest annex es recull l'estudi realitzat a tal efecte.

II.1. El preescalfament del combustible

El procés de combustió de la matèria vegetal té lloc en diverses fases; la ignició, la combustió i l'extinció. La fase d'ignició és la més complexa i depèn de l'estat del combustible. Aquesta fase engloba diferents processos, la deshidratació del combustible, la piròlisi i la ignició (Arnaldos *et al.*, 2004). Alguns autors, però, consideren la deshidratació del combustible juntament amb la piròlisi com una fase prèvia a la ignició, que anomenen descomposició o preescalfament del combustible (Hottel *et al.*, 1971; Frandsen, 1973), atesa la importància d'aquests processos en la continuïtat i l'avanç de l'incendi. Així, el preescalfament del combustible situat per davant del front de flames és el procés de transferència de calor –tant en forma de radiació com convecció– de manera que el combustible incrementa la seva energia interna i per tant la seva temperatura.

La distribució de calor que rep el llit de combustible quan està configurat per partícules de geometries semblants, depèn de factors com la localització (distància) de la font de calor, el flux de calor a través de la superfície, la relació superfície-volum i la difusivitat tèrmica del combustible. A més, el gradient d'humitat juga també un paper important en el preescalfament del combustible. Precisament per això es decidí analitzar l'efecte de la humitat del combustible en la longitud de preescalfament d'aquest.

II.2. Estudi de l'efecte de la humitat en la longitud de preescalfament

La metodologia per a la determinació de la longitud de preescalfament es basà en l'estudi de la temperatura de la superfície del llit de combustible situat per davant del front de flames, a partir del tractament de les imatges enregistrades amb la càmera termogràfica. Atès el mode d'operació de la càmera en rangs de temperatura, no fou possible mesurar valors de temperatura de l'ordre de la temperatura ambiental garantint la fiabilitat de la mesura. Per això fou necessari realitzar un estudi exploratori dels valors de temperatura que millor caracteritzen el límit de la regió del llit preescalfada pel front de flames tal i com s'ha detallat al capítol 6.

La Figura II. 1 i la Figura II. 2 presenten respectivament per a les escales W25 i W50, com varia la distància entre el front de flames i les distintes isoterms de temperatura normalitzada (vegeu apartat 6.3.1) per a les diferents proves i per tant per a diferents valors d'humitat del combustible. En ambdós escales s'observa com independentment del valor de temperatura normalitzada, la distància determinada disminueix per a valors d'humitat del combustible majors, essent la diferència en percentatge aproximadament igual, independentment del valor de temperatura normalitzada utilitzat en el càlcul d'aquesta distància.

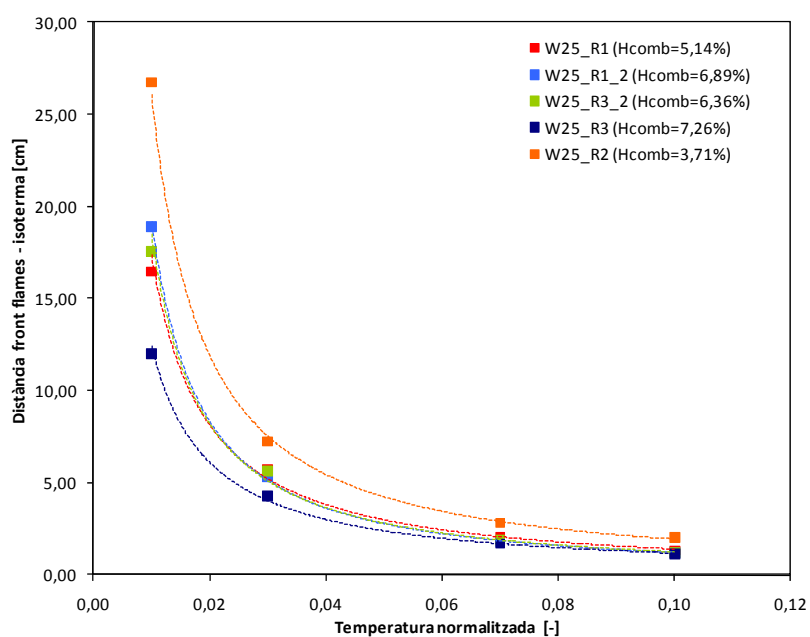


Figura II. 1 Distància mitjana entre el front de flames i les isoterms analitzades pels assaigs corresponents a l'escala W25.

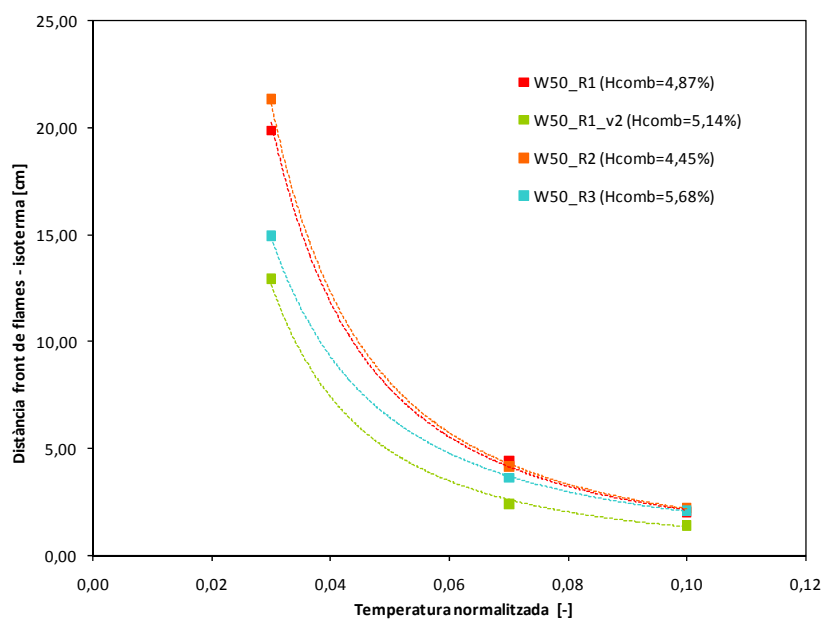


Figura II. 2 Distància mitjana entre el front de flames i les isoterms analitzades pels assaigs corresponents a l'escala W50.

A partir de les figures anteriors queda clar com la humitat té un paper significatiu també en la longitud de preescalfament del combustible. En efecte, tenint en compte que la humitat del combustible afecta també a la longitud de la flama, i que el principal mecanisme de preescalfament del combustible en absència de vent i pendent és la radiació, llavors aquests resultats són lògics.

Com que el coeficient de variació de la humitat del combustible per a les proves realitzades a les escales W50 i W100 fou igual, de l'ordre del 10 %, els resultats que s'observen per a les proves de l'escala W100 són equivalents als obtinguts a l'escala W50 i per això no es presenta aquí la gràfica corresponent a aquesta escala.

Així doncs, a l'hora de definir la longitud de preescalfament del combustible caldrà fer-ho a partir de proves amb els mateixos valors d'humitat per tal que l'efecte d'aquest paràmetre no emmascari els resultats i derivi en conclusions errònies i per tant en un criteri per a definir la longitud de preescalfament que no seria l'adequat.