

Institut

El foc i el medi

d'Estudis

PUBLICACIONS

DE LA

PRESIDÈNCIA

27 / 2007

Cicle de conferències

Catalans

**PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
27 / 2007**



El foc i el medi

**PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
27 / 2007**

Cicle de conferències

El Foc i el medi : cicle de conferències. — (Publicacions de la Presidència ; 27)


Referències bibliogràfiques

ISBN 978-84-7283-917-5

I. Institut d'Estudis Catalans II. Col·lecció: Publicacions de la Presidència ; 27

1. Foc — Congressos

614.84(061.3)

Amb la col·laboració de  **FUNDACIÓ
Caixa Sabadell**

4

Disseny gràfic: Enric Satué

© dels autors de les conferències

© 2007, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: juny de 2007

Tiratge: 450 exemplars

Text revisat lingüísticament per l'Oficina de Correcció i Assessorament Lingüístics de l'IEC

Compost per fotocomposició gama, s. l.

Imprès a Limpergraf, SL

ISBN: 978-84-7283-917-5

Dipòsit Legal: B. 31213-2007

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del *copyright*, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment i suport, incloent-hi la reprografia i el tractament informàtic, la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec comercial, la inclusió total o parcial en bases de dades i la consulta a través de xarxa telemàtica o d'Internet. Les infraccions d'aquests drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

ÍNDEX

Presentació,
a càrrec de Josep Enric Llebot,
membre de la Secció de Ciències i Tecnologia
9

Societat Catalana de Filosofia

La paraula dels grecs sobre el foc: destrucció, purificació
i creació,
a càrrec de Xavier Ibáñez Puig i Josep Monserrat Molas,
de la Societat Catalana de Filosofia
13

Societat Catalana d'Economia

Valoració del risc d'incendis forestals a Catalunya,
a càrrec de Joan Mogas Amorós,
de la Universitat Rovira i Virgili
43

Institució Catalana d'Història Natural

Què cal fer després dels incendis forestals?,
a càrrec de V. Ramon Vallejo,
de la Universitat de Barcelona
73

Societat Catalana de Geografia

Endreçar el territori per combatre els incendis,
a càrrec de Rufí Cerdan,
de la Universitat Autònoma de Barcelona
93

Amics de l'Art Romànic

El foc i la llum a la vida diària i artística del romànic
català (segles X-XIII),
a càrrec de Joan-F. Cabestany i Fort,
de l'Institut d'Estudis Catalans
135

Societat Catalana d'Estudis Històrics

6 El foc com a factor de producció,
a càrrec de Josep M. Benaül Berenguer,
de la Universitat de Barcelona
157

Societat Catalana d'Estudis Clàssics

Foc sempre viu,
a càrrec de Jaume Pòrtulas,
de la Universitat de Barcelona
183

Associació Catalana de Ciències de l'Alimentació

El foc, el medi i l'alimentació,
a càrrec de Maria Josep Rosselló,
de la Universitat Ramon Llull
197

Institució Catalana d'Estudis Agraris

El foc, font de vida,
a càrrec de Josefina Plaixats Boixadera,
de la Universitat Autònoma de Barcelona
203

El foc, coadjuvant en la producció d'aliments,
a càrrec de Carles Bernat,
de l'Escola Superior d'Agricultura de Barcelona
221

Societat Catalana de Física

El sol,
a càrrec de Jordi Isern,
de l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya
i de l'Institut de Ciències de l'Espai
del Consell Supervisor d'Investigacions Científiques
245

Societat Catalana de Llengua i Literatura

Joaquim Ruyra, la natura i el foc,
a càrrec de Lluïsa Julià,
de l'Associació d'Escriptors en Llengua Catalana
263

Societat Catalana de Física i Societat Catalana de Química

Fonts alternatives d'energia

Les piles de combustible,
a càrrec de Pere Lluís Cabot,
de la Universitat de Barcelona
281

Materials avançats per a l'energia fotovoltaica,
a càrrec de Jordi Andreu Batallé,
de la Universitat de Barcelona
317

Societat Catalana de Pedagogia

Ens alimentem de sol: una proposta curricular
per a l'ESO,
a càrrec de Mercè Izquierdo Aymerich,
de la Universitat Autònoma de Barcelona
339

Societat Catalana de Tecnologia

Els incendis d'hidrocarburs,
a càrrec d'Eulàlia Planas Cuchi,
del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic
de la Universitat Politècnica de Catalunya
359

L'accident BLEVE - bola de foc,
a càrrec de Joaquim Casal i Fàbrega,
del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic
de la Universitat Politècnica de Catalunya
385

EL FOC I EL MEDI
PRESENTACIÓ,
A CÀRREC DE
JOSEP ENRIC LLEBOT,
MEMBRE DE LA SECCIÓ
DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA

Malgrat la modernitat del segle XXI, la nostra vida encara depèn dels quatre elements fonamentals —l'aigua, l'aire, la terra i el foc— que fa força més de dos mil·lennis alguns pensadors grecs, amb un cert esperit cosmològic, varen formular. Per tal d'aportar una reflexió sobre els quatre elements fonamentals, l'Institut d'Estudis Catalans va prendre la iniciativa d'organitzar quatre cicles de conferències amb la pretensió d'analitzar la relació de cadascun dels quatre elements amb el medi i, en definitiva, amb la societat. El primer cicle tingué lloc l'any 2001 i s'hi parlà de l'aigua i el medi. Un any més tard se celebrà el segon cicle amb el nom de «La terra i el medi» i, l'any 2004, durant la tercera edició del cicle de conferències es tractà del foc i el medi. Resta encara pendent el darrer i últim cicle de conferències, que tractarà de l'aire i el medi. En tots els casos s'ha comptat amb la col·laboració i la participació de les societats filials de l'Institut, ja que sempre s'ha pretès presentar visions obertes i amb diferents perspectives dels quatre elements aprofitant la gran diversitat d'enfocaments i d'expertesa que tenen aquestes societats científiques. També s'ha comptat amb la col·laboració i el patrocini de l'Obra Social Caixa de Sabadell, que, com en molts altres temes, ha estat sensible a aquesta temàtica.

L'interès de cadascun dels cicles ha propiciat la publicació dels escrits presentats pels conferencians. En aquesta publicació trobarem reproduïts els escrits que han lliurat els autors de les presentacions corresponents al cicle «El foc i el medi». És especialment colpidor veure en un únic document com, durant el cicle, s'han abordat punts de vista tan diferents sobre aquest tema: el foc com a font d'energia; el foc com a font de vida i, també, causa d'accidents i de mort de les persones i de destrucció del medi natural; el foc com a font d'inspiració i de reflexió literària; el foc com a productor de llum que modula la vida diària medieval; el foc com a font de pensament; el foc com a element que determina l'es-

tractura d'un territori; l'aprofitament i l'emmagatzematge del foc, o la disponibilitat del foc i de l'energia com a factors clau per entendre una part de la història. El lector trobarà tot això en aquest volum tractat de manera rigorosa i breu, donant-nos un tast d'una aproximació multidisciplinària al tema del foc i la seva relació amb el medi a partir de les ciències humanes, les ciències socials, les ciències naturals i la tecnologia.



**SOCIETAT CATALANA
DE FILOSOFIA**

LA PARAULA DELS GRECS

**SOBRE EL FOC: DESTRUCCIÓ,
PURIFICACIÓ I CREACIÓ,**

A CÀRREC DE

XAVIER IBÁÑEZ PUIG

I JOSEP MONSERRAT MOLAS,

DE LA SOCIETAT CATALANA

DE FILOSOFIA

La consideració del foc des de l'antiguitat sempre s'ha mogut en la consideració de la seva ambivalència com a element benefactor i com a element malfactor. En són exemples il·lustratius el foc en Heràclit, el mite de Prometeu i Epimeteu o el gran incendi còsmic dels estoics.

1. EL PENSAMENT ENTRE EL FOC

En la seva obra *Sobre la certesa*, Ludwig Wittgenstein escriu: «El nen aprèn perquè creu l'adult. El dubte ve *després* de la creença» (paràgraf 160); i afegeix: «Vaig aprendre moltes coses i les vaig acceptar sobre el fonament de l'autoritat humana. *Després* he descobert que es veien confirmades o rebutjades per la meua experiència» (paràgraf 161). El pensament reflexiu té lloc sempre *després*, tan bon punt tot allò que hem après sobre el fonament de l'autoritat humana (fent confiança als pares, als mestres, als conductors de telenotícies, a la societat adulta en general) d'una manera o altra se'ns esquartera. I el dubte és aquest moment en què descobrim que tot allò que abans ens havia semblat cert i segur no era altra cosa que un joc d'ombres sobre la paret d'una cova. El dubte és aleshores, al mateix temps, un trencament i una obertura. En paraules de Rosen, «el dubte no és una ombra que encega sinó una llum que revela». Per explicar això, Rosen ens diu que «el filòsof és “separat” de la tenebra de la vida de cada dia gràcies a l'aclariment de la seva pròpia mancança», i afegeix: «*Eros*, el foc de Prometeu, l'oracle de Delfos: totes aquestes imatges són la mateixa. Una força que prové de fora entra en l'ànima i ens “reafirma” en la nostra necessitat de descobrir qui som. Notem de passada —conclou— que aquesta força que prové de fora també podria ser l'admiració (*thauma*) davant la bellesa i la intel·ligibilitat de l'ordre còsmic.»

És aquesta funció simbòlica del foc de Prometeu com a figura d'una força que ens ve de fora —més concretament, d'alguna cosa o d'algun lloc que ens és superior— i que il·lumina la nostra pròpia condició d'homes el que volem sotmetre a examen des de la consideració dels llocs clàssics on el pensament grec l'ha proposada, i també en els seus rebrots moderns en el pensament català.

Els homes vivim de manera habitual en un espai que volem il·luminat, en què les seguretats en el que sabem i en el que fem són il·luses o fràgils. Però fins i tot dins de la cova on som hi ha un foc que ens permet percebre ombres que, tot i ser només ombres, ho són de la realitat. El foc exterior que ens dóna la llum de la raó ens ha de permetre, al seu torn, distingir el que aquestes ombres tenen de meres ombres. Si l'home és llibertat; si la llibertat és capacitat d'autodirecció racional; si l'autodirecció racional depèn de la nostra lucidesa, i si, en fi, no hi ha lucidesa sense llum i, doncs, sense foc, aleshores el *foc de Prometeu* resulta que és la imatge que els grecs ens han donat per pensar la fundació mateixa de la humanitat o, si ho preferiu així, per pensar en què es fonamenta una vida pròpiament humana. La *destrucció* de falses opinions, l'esforç de *purificació* com a treball reflexiu per alliberar-se de les meres ombres i la *creació* d'un espai aclarit per a la vida humana són moments de la vida reflexiva que es troben expressats en la figura del foc. La vida del pensament i la vida humana en general tenen lloc al caliu de la llar, perquè és un foc que les encén i les manté vives. Preparem ara la nostra consideració dels grecs amb algunes observacions preliminars sobre aquesta figura.

El foc és el «despreniment de calor i de llum produït per la combustió d'un cos». Materialment ha acompanyat el rastre que ha deixat l'aventura humana. Ha estat un dels motius més persistents en totes les facetes del pensament humà, pel fet de ser a l'arrel mateixa de la seva acció trans-

formadora de la naturalesa. El foc ha exercit una fascinació constant sobre els sentits, el sentiment i la intel·ligència, fins al punt que hi ha qui ha pogut manifestar que la seva possessió és una de les claus del que distingeix l'ésser humà. Del foc no és difícil parlar-ne, però sí que ho és encertar el to davant d'una acadèmia científica, perquè la «ciència del foc» ha estat una quimera, una pretensió que avui sabem falsa, però que a la vegada ha estat l'incentiu primordial de les tensions que han fet avançar i progressar la ciència.

És per això que Bachelard pot afirmar que en els períodes precientífics és molt complicat circumscriure un subjecte d'estudi. Encara més en el cas del foc: si s'ha pogut avançar en l'anàlisi, es deu al fet que les idees científiques han aconseguit, a poc a poc, anar distingint els errors. Però el foc, al contrari de l'electricitat, no ha trobat la seva ciència. Ha quedat en l'esperit de la preciença com un fenomen complex que depèn a la vegada de la química i de la biologia. Per donar compte del fenomen del foc cal, doncs, que conservem en el concepte de foc l'aspecte totalitzador que correspon a l'ambigüitat de les explicacions que van alternativament de la vida a la substància en una reciprocitat interminable.

En la present aproximació partirem d'una constatació que resulta evident quan es presenta lligada a la «possessió humana del foc» i a la «humanització provocada pel foc» —la constatació que el foc és, abans que *natural*, un ésser *social*. Tornem a Bachelard:

Puede aún que no se haya reparado suficientemente en que el fuego, antes que un *ser natural* es, sobre todo, un *ser social*. [...] De hecho, el respeto al fuego es un respeto enseñado; no es un respeto natural. [...] *En realidad, las prohibiciones sociales son las primeras*. La experiencia natural no viene sino en segundo lugar para añadir una prueba material *inesperada*, cuya naturaleza

es demasiado oscura para fundar en ella un conocimiento objetivo. La quemadura, es decir, la inhibición natural, al confirmar las prohibiciones sociales no hace sino aumentar, a los ojos del niño, el valor de la inteligencia paternal. [...] La prohibición social es nuestro primer *conocimiento general* sobre el fuego. Lo primero que se sabe del fuego es que no debe ser tocado. [...] A partir de ahí, y puesto que las inhibiciones son, en primer lugar, prohibiciones sociales, el problema del conocimiento personal del fuego es el problema de la *desobediencia adrede*. El niño quiere hacer como su padre, lejos de su padre, y, al igual que un pequeño Prometeo, roba cerillas. [...] Sólo este complejo [complex de Prometeu] puede hacernos comprender el interés que siempre despierta la leyenda —bien pobre en sí— del padre del Fuego.¹

El foc, considerat durant segles com un element, ha estat, sempre, un símbol carregat d'aspectes divins. A diferència de la pedra, l'aigua o l'aire, el foc fou descobert per l'home, i sempre pot ésser reactivat. Aquesta reactivació proporciona al foc un caràcter a la vegada humà i diví. És alguna cosa que s'expressa sobretot en el mite de Prometeu: el foc és d'origen diví, robat al cel, però és, alhora, una adquisició humana, perquè el seu secret ha estat quelcom lliurat.

Què és, doncs, el complex de Prometeu de què parla Bachelard? Seria, per definir-ho amb pocs mots, el conjunt de les tendències que ens impulsen a saber tant com els nostres pares, tant com els nostres mestres, més que els nostres mestres a través de l'ús de l'objecte i amb el perfeccionament

1. G. BACHELARD (1938), *La psychanalyse du feu*, París, Gallimard. Citem segons la paginació de la traducció castellana, *Psicoanálisis del fuego*, Madrid, Alianza, p. 23-25. Vegeu també de G. BACHELARD (1948): *La flamme d'une chandelle*, París, PUF.

del coneixement objectiu. La supremacia per la possessió d'instints més poderosos tempta un gran nombre d'individus, però també els esperits més selectes resulten d'una temptació; Bachelard en diu «el complex de Prometeu»: «el complex d'Èdip de la vida intel·lectual».²

Allò robat dels déus, i allò que l'home pot refer després de la seva consumació, defineix la relació humana en el mateix món on apareix situat: la llar fou el centre de la força divina en la casa indogermànica, i a l'antiga Roma el llit matrimonial era al costat de la llar, perquè hom atribuïa al foc força generadora, com ens il·lustren tots els mites del foc.

Altrament, el foc manté, a més del component de factura humana, el record del seu origen diví: símbol de la presència de Déu, a la sinagoga, i després a les esglésies cristianes, cremava constantment una *llum eterna*. El foc resulta símbol de la presència i de l'acció de Déu, sigui guiant el seu poble, la columna de foc que guiava els israelites en la fugida d'Egipte, sigui parlant a l'escollit, l'esbarzer que crema, sigui purificant els seus elegits. En darrera instància, el foc té un lloc en l'escatologia de bona part de les religions com a representació de la fi del món i serveix alhora per expressar el càstig a què han d'ésser sotmesos els dolents (*infern*).

Retinguem-nos, però, d'anar tan amunt, i tan avall, i tornem a la *fàbrica* humana. Precisament, el foc ha estat considerat, per si mateix, símbol de la cultura, com ens il·lustra aquest text de W. Jaeger, precisament sobre els grecs:

Prometeo es el que trae la luz a la humanidad doliente. El fuego, esta fuerza divina, se convierte en el símbolo sensible de la cultura. Prometeo es el espíritu creador de la cultura, que penetra y conoce el mundo,

2. G. BACHELARD, *La psychanalyse du feu*, p. 26.

que lo pone al servicio de la voluntad mediante la organización de sus fuerzas de acuerdo con sus propios fines, que revela sus tesoros y establece la vida débil y oscilante del hombre sobre bases seguras. [...]. La concepción fundamental del robo del fuego lleva consigo una idea filosófica de tal profundidad y grandiosidad humana que el espíritu griego no la podría agotar jamás. Estaba reservado al genio griego la creación de este símbolo del heroísmo doloroso y militante de toda creación humana, como la más alta expresión de la tragedia de su propia naturaleza. Sólo el *Ecce Homo*, que con su dolor por los pecados del mundo surge de un espíritu completamente distinto, ha conseguido crear un nuevo símbolo de la humanidad de validez eterna, sin quitar nada a la verdad del anterior. No en vano ha sido siempre el *Prometeo* [d'Èsquil] la pieza preferida por los poetas y los filósofos de todos los pueblos entre las obras de la tragedia griega y lo seguirá siendo en tanto que una chispa del fuego prometeico arda en el espíritu humano.³

19

2. EL FOC ENTRE ELS GRECS: PROMETEU

És ben sabut que els mites grecs eren transmesos oralment i que això permetia als transmissors donar-ne versions diferents. La varietat de versions no respon únicament al gust de cada transmissor, sinó que respon en bona part a concepcions matisades o diferents de la veritat de la condició humana que cada mite vol expressar. Pel que fa al mite de

3. W. JAEGER (1990), *Paideia*, Madrid, FCE, p. 244-245, original alemany (1933). Citem segons la traducció del nostre Joaquim Xirau, publicada a Mèxic el 1943.

Prometeu, ens n'han arribat tres versions diferents, les d'He-síode (qui, de fet, ens en dóna dues versions, una a la *Teogonia* i l'altra a *Els treballs i els dies*), la d'Èsquil (a *El Prometeu encadenat*) i la de Protàgores (al *Protàgores* de Plató). En totes tres versions hi ha una base comuna: el tità Prometeu roba el foc als olímpics i el dóna a l'home, amb la qual cosa transforma la condició de l'home. Totes tres versions, doncs, ens parlen del foc com a do diví que funda la humanitat present de l'home. Considerem els relats d'Èsquil i de Protàgores. Com a versions antagoniques que són del mateix fet, potser la seva consideració conjunta ens donarà alguna lliçó sobre el que tenen en comú les distintes concepcions gregues de l'home.

2.1. *El Prometeu encadenat: Èsquil*

La història de Prometeu en Èsquil és senzilla. Prometeu és encadenat per Hefest en compliment de les ordres de Zeus i custodiat per Força i Poder. Io, dona mortal castigada per Hera, passa per allà, i Prometeu, a petició d'ella, li dóna a conèixer part del seu destí. Zeus el lliga, no només com a càstig per haver donat el foc als homes, sinó també com a tortura per tal que el tità li lliuri el secret que només ell coneix: qui és que amenaça d'arrabassar el poder a Zeus en el futur. El tità, desafiator, accepta el seu destí i refusa de confiar aquest secret al seu torturador.

Potser es fa difícil treure conclusions del missatge final que Èsquil volia transmetre a partir només del que és el segon lliurament d'una trilogia (la primera part devia ser el *Prometeu portador del foc* i la tercera, el *Prometeu alliberat*, ambdues perdudes). Però amb el que hem conservat n'hi ha prou per entendre unes quantes coses bàsiques de l'antropologia continguda en la tragèdia d'aquest autor.

El primer que convé notar és que l'obra ens parla del conflicte entre Zeus, el sobirà olímpic, i Prometeu, el tità que té el do de la previsió i que ha lliurat el foc als homes i els ha fet així el do del poder de transformar la seva pròpia condició. En l'escena inicial trobem Hefest que, a contracor, clava el tità a una muntanya. Per fermar-lo, li travessa el pit amb un clau gegant. Que aquest sigui el mètode per clavar-lo a la muntanya ens recorda una obvietat: Prometeu és immortal. Per més que suposi d'alguna manera un perill per al poder de Zeus, el sobirà olímpic no pot matar-lo de cap manera, sinó només dominar-lo. Prometeu i Zeus, en allò que representen, no són figures que puguin entrar en una alternativa de manera que es pugués pensar l'una sense l'altra: l'ordre còsmic ha de ser pensat amb l'una i amb l'altra. La justícia olímpica ha enviat Hefest, el forjador diví, a castigar el qui ha donat la forja, el foc, als homes. Hefest es compadeix de la seva víctima. Però Prometeu, el tità, respon amb menyspreu a aquesta compassió: el tità té un orgull de titans. No es penedeix ni per un moment del que ha fet.

Però què ens diu el relat de Zeus? En tenim tres notícies rellevants. La presència de Força i Poder, la presència d'Io i el temor de Zeus.

Els custodis d'Hefest, els qui vetllen per tal que l'ordre de Zeus sigui acomplerta, són dues forces impersonals, les figures del Poder i de la Força. La sobirania de Zeus és, doncs, abans que res, figura del poder: l'ordre còsmic, l'ordre olímpic, és un ordre que es manté per la força. Èsquil no tria pas la Justícia com a companya del Poder, sinó la Força. Potser podem pensar que la Justícia no és pas patrimoni del monarca, sinó de l'ordre en el seu conjunt, que depèn no només de Zeus sinó també de les forces que, com la de Prometeu, limiten i amenacen el poder mateix de Zeus.

Io confirma amb la seva presència el fet que Justícia no és pas patrimoni dels monarques olímpics. Que Zeus se

n'hagi encapritxat ha portat Hera a venjar-se del seu marit maltractant la noia. Víctima primer de Zeus, després d'Hera, Io ens recorda en escena l'arbitrarietat i la injustícia amb què el poder del rei dels déus és exercit. Io ha estat transformada en vaca, i ha de suportar que un tàvec li clavi el fibló un cop i un altre. El càstig és, per tant, doble: el rebaixament a la condició d'un animal mansoi, la punxada dolorosíssima i repetida *ad nauseam* del tàvec. L'únic que manté Io en peu és l'esperança que el turment no duri gaire. Prometeu, però, veu la veritat del que li espera: el turment d'Io ha de durar encara molt de temps.

Zeus, el poderós, però, té por. El seu poder és implacable, capaç de castigar sense remordiment un mortal o de torturar tot immortal que el traeixi; però, tot i així, és un poder fràgil que és conscient de la seva pròpia fragilitat. L'ordre olímpic, com l'ordre humà, és incert. Prometeu ha posat en perill el poder dels déus i, de fet, sap per endavant quin perill cal témer realment. El poder de la forja, el poder del foc, és el poder de creació, és el poder que tenen els homes de fer-se el món a la seva mida, d'«humanitzar» el món, i això els pot portar a menysprear els déus i creure's ells mateixos déus i prescindir dels olímpics.

En cert sentit, Zeus davant Prometeu experimenta la mateixa inquietud que Io. Io s'inquieta perquè sap que Prometeu coneix el seu destí; Zeus s'inquieta... per això mateix. Prometeu, el previsor, ha de ser forçat a dir el que preveu, per tal de poder prendre les mesures oportunes. Zeus, el qui té el poder de dominar fins i tots els titans, mostra en cert sentit la mateixa fragilitat que Io en el fet que s'angoixa davant la incertesa del seu destí. Els llamps i trons i el remolí que engoleix Prometeu al final de l'obra no són pas un símbol de fortalesa sinó, ans al contrari, un moment de feblesa olímpica.

Podem pensar que el relat d'Èsquil ens parla d'un con-

flicte irreductible⁴ entre dues dimensions de la vida humana. El foc i la llum donen a l'home el poder de transformació, la tècnica. Però aquest poder, quan sent la seva pròpia força, duu a la desmesura de l'orgull. Zeus, el poder, el monarca diví, és símbol de les monarquies humanes i, doncs, símbol de la política. El sobirà és sobirà perquè d'ell emana la llei i, doncs, el seu poder es troba en cert sentit més enllà de la llei: d'ací que el seu poder pugui ser arbitrari. La desmesura del poder tècnic ha de ser dominada per un poder polític mesurat; la desmesura de tots dos duu al remolí del caos.

Els homes, quan ens creiem déus, posem en perill l'ordre olímpic. La filantropia de Prometeu, que dóna als homes el foc dels poders divins, és per tant un perill per a l'ordre de Zeus. Al capdavall, és un tità que ens fa el do del foc i la tècnica. El nostre poder de transformació de les nostres condicions de vida és un poder titànic. La llum, que ens fa veure que som en part amos del nostre destí, desperta el nostre desig sense mesura de ser sempre més del que som. Si bé aquest desig ens fa millorar la nostra vida, la seva desmesura esdevé la principal font de conflictes, allò que, si no és corregit per una capacitat de convivència política que no ve de la tècnica sinó d'un altre poder, pot constituir, literalment, la nostra destrucció. La vida humana està lligada a la desmesura perquè té una fundació titànica.

4. Que el conflicte és irreductible queda ben palès en el fracàs d'Oceà en els versos 275 i següents. El seu esforç diplomàtic per reconciliar els dos poders, el seu intent de convèncer Prometeu que li concedeixi amb humilitat d'intercedir per ell davant Zeus, fracassa completament. L'interrogatori final d'Hermes, que hauria pogut alliberar Prometeu si aquest hagués volgut cedir a comunicar a Zeus quina boda futura posarà en perill el tron olímpic, també fracassa: Prometeu es fa fort en el seu orgull titànic. Tot amb tot, com hem dit, Zeus i Prometeu representen en Èsquil poders entre els quals no hi ha altra relació possible que l'antagonisme i la tensió.

La lliçó d'aquest segon capítol de les obres d'Èsquil que tractaven de Prometeu no és, doncs, com volen algunes lectures romàntiques del relat, la de la revolta del filantrop contra la tirania del Déu, sinó la del conflicte entre dos poders que traspassen la condició humana mateixa. L'existència humana és problemàtica perquè el conflicte la determina des de la seva pròpia fundació. El poder titànic de transformar el món menysprea amb orgull el poder olímpic de fermar els titans i posar-los límits. Si els poders de transformació i de domini amenacen la nostra existència en la seva desmesura, no caldria, doncs, transformar-se i autodominar-se per tal de posar mesura al poder? Èsquil no tria Prometeu davant Zeus, sinó que mostra indirectament com Justícia es juga en el fet que aquests dos poders puguin conviure en una tensió equilibrada. La tragèdia de Prometeu és, doncs, tragèdia humana.

Segons Èsquil, el primer do de Prometeu per convertir els mortals en homes és l'esperança cega, per tal de fer-los ignorar el destí que els espera, la mort. Després els donà el foc, gràcies al qual pogueren aprendre les tècniques. És a partir del moviment que es dóna entre l'esperança cega i la tècnica que pot iniciar-se la història. La història es juga, al capdavant, en la capacitat humana de crear: l'esperança fa que tingui sentit per a nosaltres l'empresa de fer del món una casa habitable, i el poder transformador del foc fa que tinguem allò que cal per emprendre aquesta tasca. El progrés de l'home consisteix, aleshores, a ser capaç de créixer com a homes tot humanitzant el món en orientar les forces titàniques, de què se'ns ha fet do, gràcies a una comprensió divina dels propis límits. El problema polític presentat per Èsquil és aquest: com podem créixer (do de Prometeu) sense perdre l'ordre i la figura (domini de Zeus). Aquest, repetim-ho, és el problema. La vida humana viu en el conflicte: la negativitat és el motor de la història.

2.2. *El Prometeu «alliberat»: Protàgores*

Al *Protàgores* de Plató, el personatge Protàgores ens explica la història de Prometeu, en una versió sensiblement diferent. La història fa així: quan les criatures mortals van començar a existir, els germans Prometeu i Epimeteu van ser els encarregats d'assignar a cadascun d'ells els poders que havien de tenir. Epimeteu va demanar al seu germà que li deixés fer a ell la feina. Concedida la petició, Epimeteu va començar a repartir els dons que cada animal havia de necessitar per sobreviure: rapidesa a uns, urpes a d'altres, grans dimensions a uns tercers, etc. Però quan tots els dons van haver estat repartits, Epimeteu es va adonar que havia deixat sense res els homes, que quedaven, doncs, indefensos. Per esmenar l'error del seu germà, Prometeu va robar el foc i les arts tècniques d'Atena i Hefest i els va donar als homes. Dotats d'aquestes arts, els homes van esdevenir capaços de procurar-se per si mateixos els vestits, l'habitatge i el menjar. Ara bé, com que encara estaven mancats de saviesa política, no sabien viure junts i col·laborar, de manera que, aïllats els uns dels altres, romanien a mercè de les bèsties salvatges. És per això que va intervenir Zeus, manant a Hermes que repartís la justícia i la vergonya (322c2) entre tots els homes, ja que les ciutats només poden existir si aquestes dues coses són patrimoni de tots i no només d'uns pocs especialistes. Tanmateix, si tot i així n'hi ha que no són capaços de conviure amb els altres homes, han de ser expulsats de la ciutat.

Comparada amb la versió d'Èsquil, les diferències salten a la vista. Per començar, el robatori de Prometeu és presentat no com una esquerda de l'ordre olímpic, sinó gairebé com la seva restitució: és Epimeteu qui ha comès un error, i Prometeu es limita a restablir les coses en el seu ordre. En segon lloc, Protàgores no parla en absolut de cap càstig. Més aviat tot al contrari: un cop feta l'obra de Prometeu, Zeus

s'ho mira i veu que l'obra està inacabada, perquè només amb les arts els homes encara no en tenen prou per sobreviure. Zeus, completant l'obra de Prometeu, afegeix el do del foc als dons de la justícia i de la vergonya. Que Justícia i Vergonya substituïssin Força i Poder és, altre cop, ben remarcable. El Poder aquí no és el poder brutal i arbitrari d'Èsquil, sinó que és el garant d'un ordre benèfic. Prometeu i Zeus són ara col·laboradors en la creació i el manteniment de l'ordre de totes les coses —incloent-hi l'home. Prometeu no és el rebel que es revolta contra Zeus, sinó un fidel col·laborador que s'afanya a esmenar amb zel els errors del seu germà.

D'Èsquil a Protàgores ha desaparegut el conflicte. Protàgores canta la resolució harmònica de tot conflicte. Convé no pensar, però, que Protàgores és un ingenu que no veu el punt d'arbitrarietat que té tot poder que no respon davant de ningú més. Més aviat tot el contrari. Per veure-ho, és important considerar la manera com Protàgores es presenta a ell mateix en l'inici del diàleg de Plató, d'on traiem la seva versió del mite de Prometeu, titulat precisament *Protàgores*. Ho fa així: Protàgores comença dient que Sòcrates fa bé de prendre precaucions, «perquè —diu— l'home que és foraster i va a les grans ciutats i hi persuadeix els més escollits d'entre els joves de deixar la companyia d'altres [...] per anar amb ell per tal d'esdevenir millors amb la seva companyia, l'home que fa això cal que vagi amb compte; perquè no són petites les enveges, les males volences i les hostilitats que neixen al voltant seu», i aleshores afegeix que «l'art sofística (*sophistikèn tékhnen*) és antiga, però els qui la duïen entre mans entre els antics, tement la part que té d'odiós, la volien ocultar i dissimular, els uns amb el nom de la poesia, com Homer, Hesíode i Simònides; d'altres, amb el d'iniciació i profecia, com Orfeu i Museu; alguns, pel que he vist, amb el de gimnàstica, com Iccos el Tarentí i aquest sofista encara viu i no inferior a cap altre, Heròdic de Selímbría, abans de

Mègara; la música feia de cobertora al vostre gran sofista Agàtocles i a Pitoclides de Ceos i a molts d'altres». A diferència d'aquests, conclou, ell no vol pas «fer el mateix que ells» perquè aquests «no han aconseguit el que volien, per tal com no han enganyat els qui tenen el poder a les ciutats, per als quals únicament són aquestes precaucions; ja que, quant a la multitud, per dir-ho clar, no s'assabenta de res, ans el mot d'ordre d'aquells, ella el repeteix a cor». Ell ha triat, per contra, «el camí contrari: confesso —diu— que sóc sofista i que educo els homes, i crec que la meva precaució és millor que la llur: confessar millor que dissimular. Afegeixo d'altres precaucions a aquestes, talment que, gràcies al déu, mai no he sofert res de mal confessant que sóc sofista» (316c5-317c1).

És molt remarcable que el primer autor citat sigui Homer i que, òbviament, l'últim de la llista sigui precisament... el mateix Protàgores! Com és sabut, la formació ciutadana dels grecs es feia sobre la lectura d'Homer: es prenia cura de l'ordre de la ciutat formant els futurs ciutadans sobre les històries dels homes i dels déus. En la presentació que fa Protàgores de si mateix, com acabem de llegir, el savi sofista es presenta *literalment* com el nou Homer. Protàgores té el projecte revolucionari de substituir Homer en la formació ciutadana. Ell sap prou bé que la pau de la ciutat és fràgil i que el poder, quan no respon davant de ningú més, té sempre una dimensió d'arbitrarietat. Però així com Homer ens mostra un ordre possible en el respecte dels déus (Àiax, posem per cas, cau en desgràcia precisament per haver menyspreat l'ajut d'Atena), Protàgores es presenta ell mateix com a síntesi reeixida del saber de Prometeu i del saber de Zeus per construir i mantenir la convivència pacífica. Protàgores silencia el conflicte entre Prometeu i Zeus, no perquè sigui ingenu, sinó perquè pretén que ell mateix constitueix la solució a aquest conflicte.

En efecte, la sofística, o sigui la versió protagòrica de

la saviesa, és precisament això: la reconciliació i la col·laboració de la tècnica (retòrica) i el poder (polític). Protàgores es presenta ell mateix com el savi en què es resol el conflicte mostrat per la tragèdia d'Èsquil. El savi sofista és l'encarnació de la reconciliació entre el poder prometeic i el poder olímpic. El destí dels homes ja no està en mans dels déus, sinó que ara el domini de la tècnica retòrica subsumeix des de la tècnica les altres tècniques en benefici del poder constituït. Això explica l'ambigüitat amb què Protàgores es presenta. Diu d'ell mateix que és mestre de virtut ciutadana, però també diu que Zeus ha donat a tots els homes aquesta virtut. Com s'entén, això? La virtut, do de Zeus, es realitza en la capacitat de construcció d'una vida pròpiament humana en virtut del do de Prometeu. I aquesta conjunció de dons és el que representa la figura protagòrica del savi. Els homes que, tenint justícia i vergonya, no tenen l'art sofística, han de ser completats en la seva humanitat per la mediació del mestre sofista. Protàgores assumeix, així doncs, una funció prometeica d'acompliment diví dels designis de Zeus.

Amb Protàgores, el destí de l'home ja no es troba en mans dels déus sinó de la Història o, més precisament, dels savis que comprenen la Història. Protàgores representa aleshores una figura ben moderna: la del qui preveu com respondran els homes davant les distintes situacions, la de qui és capaç de despertar determinades respostes en els homes, la de l'heroi titànic capaç de transformar el món polític i, doncs, de «treballar» amb la Història. El foc de Prometeu és ara, amb Protàgores, el domini creador de la història en què es forgen els homes de cada època. I aquest camí protagòric en què la tragèdia humana arriba a la seva resolució heroica és un mite ben familiar també en la nostra modernitat, que es desplega al llarg del temps fins a arribar també a dos autors recents de casa nostra: en primer lloc, i una mica més proper en el temps, una altra versió protagòrica del foc del saber

com a instrument d'il·lustració i de progrés, tot i que paradoxalment acabarà en tragèdia; i, en segon lloc, una versió una mica anterior, que recupera la versió hesiòdica però que acabarà paradoxalment en èxit. El fracàs de la il·lustració i el triomf del poder de la força és precisament el que, poc després, altra vegada patí Catalunya.

3. PROMETEU ENTRE ELS CATALANS

Volem recordar, d'entre d'altres possibles,⁵ dos Prometeus de dues figures estretament vinculades a l'Institut d'Estudis Catalans, Pere Coromines i Eugeni d'Ors. El primer fou un dels vuit membres fundadors d'aquesta institució i també de la Societat Catalana de Filosofia; el segon, secretari de l'Institut d'Estudis Catalans i animador de la reflexió filosòfica des de la Secció de Ciències. Ambdós dedicaren sengles obres a Prometeu, la paraula grega sobre el foc, i tot i coincidir en el contingut, adoptaren una posició diferent.

5. *De genealogia deorum* de Boccaccio; *La estatua de Prometeo* (1669) de Calderón de la Barca; *Pandora* (1740) de Voltaire; el *Prometeu* (1773-1774) de Goethe; el *Frankenstein o el modern Prometeu* (1818) de Mary Shelley; el *Prometeu alliberat* (1818) de Percy Shelley; el *Prometeu mal encadenat* (1899) d'André Gide; *La conquesta del foc* (1932) de Sigmund Freud; el *Prometeo* (1916) de Pérez de Ayala; *Hay una nube sobre el futuro* (1965) de José Ricardo Morales; el «Prometeu als Inferns» (a *L'estiu*, 1946) d'Albert Camus; *El càstig de Prometeu* (1932) de Karel Capek, i el *Prometeu* (1969) de Heinrich Müller. Vegeu la introducció de la traducció del *Prometeu encadenat* d'Èsquil a La Magrana (2001, Barcelona), a càrrec de Ramon Torné i Teixidó, on trobareu també llistes d'obres pictòriques (de Rubens a Max Klinger) i musicals (de Beethoven a Scriabin) inspirades en el mite de Prometeu, així com de les traduccions aparegudes fins al moment d'aquesta edició en gallec, castellà i català.

3.1. *Pere Coromines i el Prometeu sacrificat*

Les dites i facècies de l'estrenu filantrop En Tomàs de Bajalta presenta, a manera de trilogia, una composició irònica i atenta sobre la naturalesa sociopolítica i la conformació del caràcter de la Catalunya que passa del segle XIX al XX («intent de compendiar el contingut de l'actual civilització catalana», p. 3 de les *Obres completes*). La trilogia de Pere Coromines (*Silèn*, 1925; *Pigmalió*, 1928; *Prometeu*, 1934) va mostrant-nos el protagonista en tres moments històricament culminants: la darrera guerra carlina al Montseny i a les terres de l'Ebre, la prosperitat de la Barcelona burgesa i provinciana de final de segle i la revolució social que es congriava a l'inici del segle XX i que portarà a la mort del protagonista, afusellat al Castell de Montjuïc. Tomàs de Bajalta evoluciona al ritme del país: de nissaga carlina passa a comerciant burgès enriquit, i d'aquí, a ideòleg revolucionari anarquista. Una bella mostra del que el professor Jordi Sales ha anomenat el «reflex anarcocarlí», que tant ha condicionat la nostra multiseular (in)capacitat d'actuar en funció i responsabilitat d'Estat. La tercera novel·la de la trilogia es titula *Prometeu*: després de la carlinada i l'enriquiment comercial, el protagonista, «un ninot», en paraules de l'autor, és portat a la recerca de la redempció del poble abraçant el món obrer en ebullició.⁶ La clau del títol de la novel·la resulta evident com a metàfora que il·lustra el fervor revolucionari, com se segueix d'aquests exemples, alhora que hi veurem el foc com a símbol de la cultura i el saber alliberadors.

Heus aquí la clau moderna de les divinitats mitològiques. Zeus és el capital. Els obrers són els fills de

6. Pere COROMINES (1934), *Prometeu*, llibre tercer de *Les dites i facècies de l'estrenu filantrop En Tomàs de Bajalta*, a *Obres completes* (1972), Barcelona, Selecta.

Deucalió. Els savis són els titans que lluiten contra Zeus. Però jo [Tomàs de Bajalta] sóc el tità Prometeu que robarà l'espurna de foc de la fornal d'Hefest. Aleshores els obrers ompliran les idees amb les divines riqueses de l'esperit i el capitalisme s'esfondrarà [p. 262].

Era, però, evident que els estudiants i els professors aportaven als obrers, amb llur tracte, tot un món de coneixements, *el foc diví de Prometeu*, com diria el nostre estretu filantrop En Tomàs de Bajalta. El qual, una vegada va haver fet aquest descobriment, s'hi va tirar de cap. Reunia obrers a casa seva i els iniciava en el que per a ells eren els misteris de la ciència [p. 263].

La revista, el pamflet, la conferència, la funció de teatre, l'escola, l'edició de llibres, varen substituir la fèrula que, en el mite de Prometeu, serví al tità per a dur als homes la brasa de foc robada en la fornal d'Hefest. D'una manera o altra, conscientment o inconscientment, la primera joventut catalana nacionalista, despullada de la pel·lofa provincial, fou anarquitzant i va voler redimir la humanitat abans d'alliberar-se ella mateixa [p. 264].

Si el mite de Prometeu, el gran *philanthropos*, troba una explicació indianística en la frotació d'un broc (*pamantha*) en el centre d'una branca foradada (*arani*), la gran facècia de la vida i la mort del nostre filantrop té la clau del seu enigma... [p. 313].⁷

Per què té la clau del seu enigma? Coromines retrata l'esforç agònic d'un personatge —que representa una socie-

7. La lingüística del segle XIX ja havia cregut trobar un parentesc entre el grec Prometeu (*pro + math*) i el sànscrit *pramanthâ* ('el pal que encén el foc per fregament') i, fins i tot, amb l'arrel *manth*, que designa l'acció de robar (però això es discuteix encara, cf. l'obra de Gregorio LURI, *Prometeos: Biografías de un mito* [2001], Madrid, Trotta, p. 49, nota 42, p. 55).

tat, la catalana— per ser, per aprendre, abraçant uns ideals, els de la radicalització de la Il·lustració, que el portaran a la condemna per part de la intolerància, la foscor i, afegim, com a víctima també de no haver entès la lògica de la racionalitat de l'Estat.

3.2. *Eugeni d'Ors i el Prometeu alliberat*

Catorze anys abans del *Prometeu* de Pere Coromines, Eugeni d'Ors havia publicat el seu *El nou Prometeu encadenat* a les pàgines d'*El Día Gráfico*, que havia estat el refugi del *Glossari* després de la seva sortida de la Mancomunitat. L'obra que comentem, una peça de teatre, aparegué per entregues durant els mesos d'agost i setembre de 1920. Són una clara mostra de com Ors veia el que li estava passant. Evidentment, cal contraposar-ho a d'altres opinions per tal de reconstruir l'episodi històric. Per a aquest fet, ens remetem al primer volum de la *Història de l'Institut d'Estudis Catalans*, d'Albert Balcells i Enric Pujol (2002, Barcelona, IEC, especialment pel que ens ocupa p. 101-114). *El nou Prometeu encadenat* és la pròpia visió del Pantarca.⁸

Cal fer notar que ens sembla que aquest text ha de ser revisitat per aclarir la qüestió ideològica del pensament d'Ors, perquè certs prejudicis polítics han impedit d'entendre-la en el seu context europeu. Si bé hi ha qui defensa un Ors bàsicament aristocratitzant i, per tant, a partir d'aquí

8. Eugeni d'ORS (1966), *El nou Prometeu encadenat*, Barcelona, Edicions 62, p. 53, amb un pròleg d'Enric Jardí, p. 5-12, i unes taules cronològiques, p. 47-53. Cal notar l'atenció a aquest text en un capítol del llibre de Carles GARRIGA, *La restauració clàssica d'Eugeni d'Ors*, Barcelona, Curial, 1981, p. 107-124, on comenta les bases històriques i ideològiques d'Ors que fonamenten el text i després el compara amb l'obra d'Èsquil.

s'explicaria la seva deriva feixista, i els apropaments al món socialista i anarquista no serien sinó moviments tàctics o febleses ocasionals, cal tenir ben present que el moviment feixista tenia un component sindicalista, tant en els seus orígens com en el desplegament del moviment en la conquesta del poder. Que després la guerra civil europea passés també per entremig del món obrer és quelcom que no pot deixar-se de fer constar, i en la situació de 1920 la lluita contra el món burgès i liberal dels estats era quelcom que podien compartir socialistes, anarquistes, comunistes, feixistes, carlins i, és clar, nacionalistes. Tot ben barrejat i sense gaire voluntat d'anàlisi perquè entremig de les batusses no predominava precisament la raó.⁹ És d'aquesta manera que Enric Jardí podia dir en el pròleg de l'edició de 1966:

Als seus començos, influït per les doctrines pragmatistes de moda, [Ors] és voluntarista en remarcar la superioritat de l'Albir sobre la Natura, amb la seva teoria de l'«Arbitrarisme», que, a vegades, traïa un cert sabor del «dandisme» de fi de segle, però que, preponderantment, exaltava la «Voluntat d'Ordenació» de l'Home, la qual, en Estètica, el dugué a un Classicisme i, en Política, a una prèdica constant a favor de la «Civilitat». També, políticament, la seva voluntat d'ordenació el féu abominar de la Democràcia parlamentària, i si en els primers anys mostrà simpatia pel Sindicalisme sorelià, després es decantà cap a un Paternalisme de tipus autoritari. «Convé que a Europa s'entoni *La Marsellesa de l'Autoritat*», repetia, per bé que, més que feixistitzant, fou un

9. En aquest sentit, cal considerar encara el valuós estudi de Vicente CACHO VIU (1997), *Revisión de Eugenio d'Ors (1902-1930) seguida de un epistolario inédito*, Madrid, Publicaciones de la Residencia de Estudiantes i Quaderns Crema.

defensor del «Despotisme il·lustrat», és a dir, de la justificació del Poder per la tasca de la Cultura que realitzés. El que ell anomenava «Política de Missió» [...]. De moment, remarco la importància d'aquesta peça [*El nou Prometeu encadenat*] com a manifestació d'una línia dins el pensament orsià, insospitada per molta gent: la de l'escriptor que coneixia l'obra de Georges Sorel; admirava Jean Jaurès; aplaudia Julián Besteiro, empresonat per formar part del comitè de la vaga de 1917; feia circular, en multicopista, unes *Gloses* durant l'aturament general de la primavera del 1919 (les *Gloses de la Vaga*, algunes de ben revolucionàries); havia tingut contactes amb el Noi del Sucre i havia pronunciat, poc abans de rompre amb la Lliga, una conferència a l'Acadèmia de Jurisprudència de Madrid sobre el tema *Posibilidades de una civilización sindicalista*, on venia a dir que calia que els homes de lletres del seu temps col·laboressin a la instauració d'una Nova Era Proletària com ho havien fet determinats aristòcrates de l'«Ancien Régime», que portaren la Revolució Francesa (p. 9 i 11-12).

Eugeni d'Ors presenta la Força i la Fam (i no pas Força i Poder) que obliguen Hefest, l'Esbirro, a forjar, primer, les cadenes que empresonaran Prometeu a la roca, i, seguidament, a clavar-lo a la roca. Després que hagin marxat tots, deixant Prometeu, arriben dos grups d'amigues, un de conscienciat i un que no en sabia res, que procuren assabentar-se de la situació i consolar-lo. Arriba després Oceà, el Polític, que parlant més que no pas escoltant, marca distàncies amb la dissort del seu antic camarada, Prometeu, i, sota la promesa d'intercedir per ell davant del Tirà i aconseguir una fórmula transaccional, no amaga sinó la traïdoria als principis que els eren comuns i la voluntat de distanciar-se del perdedor, salvant, sempre, amb falses paraules, la possi-

bilitat d'un retrobament si la situació es capgirés. Oceà fugí davant la presència d'Io, la Intel·ligència, que apareix perseguida implacablement per una vespa turmentadora. El diàleg entre Prometeu i Io, Treball i Intel·ligència, sempre davant dels dos grups d'amigues, mostra com la Intel·ligència encara està sotmesa a la idea de Progrés i que no sap reconèixer el final de la Història, o sigui, el triomf de la Voluntat i del Treball. Després de la conversa, l'agulló de la vespa torna a fer fugir Io. Després d'un interludi de conversa amb les amigues, apareix Hermes, el Confident. Aquest procura pactar amb Prometeu el seu alliberament a canvi del secret que aquest amaga respecte de la fi del Tirà. Com que no ho aconsegueix amb bones paraules i promeses, marxa en el moment que esclata una tempesta furient. És el moment culminant, quan Fam i Força reapareixen per posar mà sobre Prometeu i, en la lluita final, un llamp fulmina Força i Fam i allibera Prometeu:

35

ELS DOS GRUPS D'AMIGUES: Foll! Mai ningú no ha pogut
fermar la boca al Poble i ara voldries fer-ho tu,
ara que pertot arreu vola el vent de les coses noves
que ja no resta més senyor que la tempesta i el
llamp?

*(En el moment que la Fam i la Força van a posar
la mà damunt Prometeu, la tempesta acreix
espantosament la seva fúria. Tot s'omple de tenebres.
Cau el llamp. Llargs udols.)*

PROMETEU: És la lluita final.

*(Més tenebres. Cauen la Força i la Fam fulminades.
Fugí Hermes i les mateixes Amigues. L'ombra
negra de Prometeu, a la fulgor dels llampecs
nous, és damunt la roca, dreta, sense lligams. FI
DE LA TRAGÈDIA [p. 46].)*

El sentit de la tragèdia és molt clar. Prometeu, que apareix a escena amb un vestit blau de mecànic, esquinçat i sangonós per les tortures patides, representa el Treball, el Treballador, la Voluntat —o sigui, Eugeni d'Ors. Els dos grups d'amigues, fidels fins al final, més o menys conscients del que està passant, representen la Feminitat i el Feminisme («la causa del Treballador, i la causa de la Intel·ligència i la causa de la Dona, no fan sinó una gran, una sola Causa», p. 37) —són les bibliotecàries. Oceà és el Polític, o sigui, embaucador, que parla pels descosits en un llenguatge que no s'entén, traïdor de mena —representa Bofill i Mates, i els polítics intel·lectuals de la Mancomunitat. El Tirà no és sinó Puig i Cadafalch, president de la Mancomunitat. Com a personatges purament simbòlics resten Io (la Intel·ligència), per una banda, que està esgarriada per la seva creença en la Història i en el Progrés i encara no s'ha adonat que és el moment de l'acció, i per l'altra, Fam i Força, els instruments de la tirania per sotmetre els treballadors. (Quedaria per identificar Hermes, el Confident, que crec que hauria de correspondre a alguna persona en concret, però ara no sabria dir a qui.) Tenim, doncs, els personatges d'una tragèdia, «el cas Ors», apartat dels seus càrrecs de rector espiritual del poble català per la seva avinença amb el món obrer. Prometeu-Ors amenaça de revelar el secret que acabarà amb el Tirà. El secret no és sinó la «lluïta final» de la «imminent» revolució sindical (cf. en el text, cap al final: «El secret és escrit en el cel, amb les lletres dels llampecs que cauen. Una lletra, el llamp que va caure sobre el Caucas, i que va fer el gran incendi, que ara comença ja d'ésser una bona llar i un far del món. Una altra lletra, el llamp caigut vora el Tíber. Una altra encara, el caigut a ribes d'Espanya. Tots junts, el secret. Tots junts, l'avenir. Però ja l'avenir és present; perquè l'hora és vinguda que es fonen totes les hores» (p. 45). La successió representa clarament la Revolució Russa (1917, el llamp sobre el Caucas), les ocupacions de les fàbriques a Itàlia (1920, el

llamp vora el Tíber), la situació obrera catalana (vaga del 1917, vaga del 1919, el llamp a ribes d'Espanya).¹⁰ Atenguem aquests textos, per exemple:

PROMETEU: [...] Plegats vàrem fer la Revolució, jo donant la meva sang, ells collint-ne el fruit del poder i de la riquesa. Ells, que així que hagueren ensorrat el vell règim dels nobles i dels privilegis, i fou conquistada la llibertat, s'empararen d'ella per construir la màquina d'una tirania com mai no se n'havia vist i per imposar els més durs i els més egoistes dels privilegis... Però jo els vaig sortir al pas. Jo, i ningú, sinó jo. Jo, el Treballador, que he salvat per sempre la raça dels homes de fer-se pols sota el trepig de la nova tirania...

PRIMER GRUP D'AMIGUES: I què has donat als homes?

PROMETEU: Jo els he instruït. Jo els he donat el foc. De primer, el foc, l'esperit de la llibertat!

PRIMER GRUP D'AMIGUES: I què n'han fet, del foc?

PROMETEU: El foc és el que ha fet habitar entre ells l'esperança.

SEGON GRUP D'AMIGUES: Bé suprem per als mortals, l'esperança, bé suprem per als mortals!

PROMETEU: Així ara han començat d'aprendre a no témer ni la Fam ni la Mort.

PRIMER GRUP D'AMIGUES: I tampoc no temen el Crim?

PROMETEU: El Foc i l'Esperança llancen semblantment flames que s'arrosseguen per terra i altres que munten dretes en l'aire. I tot és esperança, com tot és foc [p. 23-24; cf. Heràclit, és clar].

10. Nota crítica: la lectura de la situació d'Ors era ben equívoca; certament que la Mancomunitat va caure, però no va ser pel poder executiu de la massa obrera.

El poder polític de què parla Ors és aquell que ha aconseguit el poder comptant amb l'aliança de la burgesia industrial, i és precisament la tècnica allò que ha permès que la indústria prosperés:

OCEÀ: Tingues seguretat que, en el camí de les concessions, s'arribarà tan lluny com vulguis. Tan lluny com permetin les necessitats de la producció... Què vols, Prometeu? Reconeixem els teus drets. Sabem que tu ets l'inventor del foc, que sustenta tota la indústria. Què vols, Prometeu [p. 28]?

SEGON GRUP D'AMIGUES: Un mot és com una espurna. Pot incendiar el món, també [p. 28].

Per què és el Poder de la tragèdia d'Èsquil, i no la Força, que és substituït per la Fam? Segons que ens pot suggerir el text següent, la possessió del poder, la voluntat de poder, és un eix fonamental de l'acció d'Ors i, per tant, quelcom a què ell no pot renunciar. Si això fos així, s'entendria que s'atribuís a Prometeu el Poder i calgués substituir aquest personatge per la Fam com a figura del poder exercit pel Tirà:

PROMETEU: He dit manar. Ho sents, Okeanos? He dit manar. El terme et sembla massa savi, encara? No entens que es tracta de la qüestió mateixa, de l'essència de la qüestió de l'autoritat?... Jo sóc l'Autor, jo sóc la ment original, jo sóc els braços de l'eficàcia! Jo sóc aquell que inventa el foc i el manipula! Allà arreu on el foc tempera, cou, fon, evapora, allà s'estén la meva autoritat de Treballador [p. 29].

Dues altres aparicions del foc en el text que comentem ens duen a una reflexió sobre quina és la relació entre el

poder i la intel·ligència que ens permetrà entendre la posició d'Eugeni d'Ors sobre aquesta qüestió. No ens podem refugiar en la concepció d'intel·lectual pur crític del poder polític: ell tenia la voluntat d'esdevenir un *auctor* de la transformació de la realitat: des de la seva autoposició com a *actor i fautor*, aleshores la figura de la intel·ligència pura li representa quelcom criticable, almenys en la mesura que ha estat substituïda pel poder, diguem-ne, polític. El menyspreu de la política no es fa des de la intel·ligència pura, sinó des d'una instància que es pretén diferent d'aquestes dues, una instància que pretén ser la síntesi superior de l'intel·lectual i del polític —i com a principi superior de tot, quin nom millor que el de Pantarca.

SEGON GRUP D'AMIGUES: El Treballador ha ofès el Tirà arrabassant-li el privilegi del Foc. En què l'has pogut ofendre, tu, Intel·ligència?

IO: L'he ofès, mirant-me'l. Res més que mirant-lo amb lucidesa. Jo no li treia res, jo no el volia privar de res, jo era incapaç d'astúcia com de violència. Jo m'estava asseguda davant d'ell i el mirava. Ell llegia en els meus ulls el meu judici. Sabia que la seva mesura era en mi. Un pàl·lid furor així el prenia [p. 32].

Prometeu explica a Io la causa dels seus mals, la seva pròpia culpabilitat, perquè sap que quan ella es corregeixi esdevindran definitivament aliats:

PROMETEU: Jo et diré el que et convé saber. T'ho vull dir amb paraula directa i clara, no embolcallant-ho en enigmes. Tu ets nada per a l'Eternitat, jo per a la Vida. Just és que et porti els secrets de la Vida, com tu em portes els de l'eternitat. [...] Abans

convé que tu coneguis la causa dels teus mals. [...] Tu no sospites que el teu córrer infortunat d'ara no és més que un doblar-se de la teva excessiva lleugeresa de tot temps. El Tirà ha vist que no podia comptar amb tu. Mes, qui, Intel·ligència, ha pogut fermament, fins ara, comptar amb tu?

IO: Treball i Joc són la meva llei, com Servitud i Grandesa, el meu patrimoni.[...]

PROMETEU: Alexandria et va veure fumant l'opi ubriagant i nauseabund de l'erudició. La Roma dels Papes t'ha vist nua en les cavalcades en un carro daurat tirat per panteres. Versalles, jugant a pastora amb les galtes pintades i els escarpins de seda o gronxant-se en el *columpi* de Fragonard. Ahir mateix, que finia el segle XIX, eres agenollada al peu dels ociosos plutòcrates ballant per ells la dansa de Salomé o mormolant, mística, l'encís del Dijous Sant... [p. 33-34]

Aquesta *lleugeresa* de comportament no resulta sinó la *inquiétude*, que està representada per la Vespa que mortifica la Intel·ligència:

PRIMER GRUP D'AMIGUES: La Vespa fa córrer la Intel·ligència, punxant-la. I el córrer de la Intel·ligència s'anomena Progrés [p. 34].

IO: Oh, dolor! Oh, orgull! Les meves fugides terribles, els meus tords velocíssims per la persecució de la Vespa s'anomenen la Història!

PROMETEU: La Història comença quan jo dono als homes el Foc. La Història es tancarà, quan sigui temps que jo tregui el Foc de mans dels homes.

PRIMER GRUP D'AMIGUES: I els homes, no ploraran el Progrés?

PROMETEU: Qui plorarà el Progrés davant la Perfecció?

PRIMER GRUP D'AMIGUES: Oh, llum!... Nascudes nosaltres a l'hora de la indústria, un instint obscur ens aferra encara a la indústria. Però ara veiem què hi ha per damunt de la indústria.

SEGON GRUP D'AMIGUES: Què hi ha per damunt de la indústria?

PROMETEU: Damunt la indústria hi ha la Bellesa.

IO: I la bellesa en les coses naturals, com s'anomena?

PROMETEU: La bellesa en les coses naturals s'anomena Simplicitat.

IO: I la bellesa en les coses socials, com s'anomena?

PROMETEU: La bellesa en les coses socials s'anomena Justícia.

IO: Començo d'entendre i veig obert el camí de la meua salvació. No hi ha salut per mi sinó en la Simplicitat i en la Justícia.

PROMETEU: Comences d'entendre, però no ha entrat, profunda, en el teu cor, la convicció... Algunes proves, algunes experiències crudels manquen encara. Alguns anys més de córrer foll convé que passis, sempre punyida per les teves inquietuds, abans no vinguis a l'aliança definitiva amb els treballadors [p. 35].

SEGON GRUP D'AMIGUES: [...] Va oblidar [Io] que viure de la tasca del propi esperit és igual que viure de la tasca de les pròpies mans, i que aquell qui viu de tasca d'esperit o de mans no ha de cobdiciar amistat amb el regalat per la fortuna o amb l'afavorit pel llinatge.

PRIMER GRUP D'AMIGUES: Així puguem mantenir-nos sempre pures de contacte amb els ociosos envilitos. L'amistat de les dones i l'amistat dels intel·ligents amb els poderosos de la terra només té un camí, i aquest camí s'anomena Prostitució [p. 37].

4. CONCLUSIÓ

Ens convé, com a tots els europeus, una reflexió sobre *el poder*. Fóra temptador preguntar qui té més raó, si l'antiquat Èsquil o el modern Protàgores, si el foc de la intel·ligència a l'obra de Coromines o el foc de l'acció a la d'Ors. Interrogar-nos, encara, sobre la feblesa d'aquesta disjunció. Potser, però, el poder que ens ve de Prometeu i el poder que ens ve de Zeus són encara *massa poc* humans. Potser convé pensar de nou el foc de Prometeu més ençà dels déus i de la història. El foc que nodriria una reflexió com aquesta és el que ens crema davant la sospita que ni el mer conflicte ni la fàcil resolució no són la darrera resposta al problema de la condició humana. Èsquil i Protàgores, Ors i Coromines pensen, potser, enmig de l'enlluernament del foc del poder. No convindrà repensar allò que pugui representar Zeus des d'una dimensió que no és pas la de la història?

42

La reflexió sobre el foc que mou a la reflexió no pot apagar tots els focs. Entendre el foc que ens consumeix i ens dóna vida és reposar vora la llar. La imitació que els mortals podem fer de la vida dels déus és transmetre aquest foc com una flama eterna. Climent d'Alexandria diu que el foc robat per Prometeu pot entendre's com la filosofia: es tracta d'una petita porció, però capaç d'encendre la gran foguera del saber (*Stromata* I, 134).¹¹

11. Sobre el sentit d'aquesta citació i per obtenir una magnífica revisió històrica i artística del mite de Prometeu, vegeu el llibre de G. Luri citat en la nota 7.

SOCIETAT CATALANA

D'ECONOMIA

VALORACIÓ DEL RISC

D'INCENDIS FORESTALS

A CATALUNYA,

A CÀRREC DE

JOAN MOGAS AMORÓS,

DE LA UNIVERSITAT

ROVIRA I VIRGILI

El risc d'incendis forestals ha estat objecte d'estudi des de diferents disciplines, però la seva valoració econòmica ha rebut relativament poca atenció. En aquest treball s'analitza, des d'una perspectiva econòmica, les principals qüestions i els principals problemes en relació amb la valoració de la disminució del risc d'incendis, i es presenta la valoració dels resultats d'una aplicació per reduir a la meitat del risc d'incendis forestals en els boscos de Catalunya.

1. INTRODUCCIÓ

Cada any tenen lloc un gran nombre d'incendis forestals, especialment en l'àrea mediterrània. Això ha provocat que els incendis forestals constitueixin potser la principal amenaça del bosc mediterrani i un dels problemes ambientals més aparent i de més àmplia sensibilització tant per part de l'opinió pública com per part de l'Administració, que cada any dedica més recursos econòmics principalment a tasques de vigilància i tècniques d'extinció. Així, per exemple, durant l'any 2000 es van dedicar a Espanya trenta-sis milions d'euros a la prevenció i l'extinció d'incendis (Ministeri de Medi Ambient, 2001).

Sembla lògic preguntar-se si aquests recursos són suficients o si, per contra, fa falta dedicar més recursos a la política de prevenció i extinció d'incendis. Per respondre a aquesta pregunta, l'Administració, a més de tenir en compte els costos de dur a terme la prevenció, és necessari que incorpori el valor econòmic dels béns de no-mercat en la planificació de la política de prevenció d'incendis forestals. Però estimar les conseqüències econòmiques dels incendis forestals és un problema difícil per als gestors a causa de la falta d'estimacions dels efectes del foc sobre béns de no-mercat que ofereixen els boscos (Englin, 1997).

La majoria d'estudis econòmics sobre incendis forestals es limiten a calcular la pèrdua de valor dels béns forestals per als quals existeix un mercat (fusta, llenya, suro, pinyons...), encara que aquest està lluny de la pèrdua social de valor. Els mercats no mesuren el valor total d'un bé. L'incendi d'un bosc pot canviar el paisatge i és possible que la gent prefereixi el paisatge original. Pot ser que aquesta pèrdua de benestar, deguda a la degradació provocada per l'incendi, no quedi reflectida completament en els mercats. Alhora, els incendis forestals que afecten la biodiversitat d'una determinada zona poden disminuir el benestar de la població encara que no tinguin intenció de visitar-la.

Per tant, els incendis forestals poden tenir un impacte que es pot quantificar en termes de producte interior brut (PIB), juntament amb un altre impacte que només es pot quantificar mitjançant l'ús de l'economia ambiental. En qualsevol cas, la prevenció d'incendis té un cost i un benefici. Una manera interessant de plantejar la pregunta és fins a quin punt val la pena prevenir els incendis forestals. L'economia té la seva pròpia manera de contestar aquestes preguntes.

En l'apartat següent es presenta una anàlisi econòmica que il·lustra la quantitat socialment òptima d'incendis, segons la tecnologia i les demandes actuals.

2. NIVELL DE PREVENCIÓ D'INCENDIS FORESTALS

L'economia, com a ciència social, centra la seva anàlisi en la percepció i els comportaments humans. En concret, analitza la manera en què les persones (i les institucions) intenten aconseguir el màxim benestar amb uns recursos limitats, és a dir, la necessitat d'escollir. Una d'aquestes eleccions és quina quantitat de recursos es dedica a la prevenció d'incendis forestals, assumint que s'obté benestar d'aquestes actuacions.

La resposta senzilla habitual és que hauríem d'assignar recursos a la prevenció d'incendis fins que el cost marginal d'aquests recursos sigui igual al benefici marginal obtingut. Per tant, empíricament, caldria calcular les funcions de cost i benefici marginals i observar on es creuen.

Per complicar una mica les coses, suposem que el mercat per si mateix no assigna aquesta quantitat òptima de recursos perquè existeixen *externalitats*, i per tant es produeix una fallada de mercat en l'assignació de recursos per a la prevenció d'incendis. Per entendre els conceptes d'externalitat i fallada de mercat, i saber com corregir-los, hem de tenir en compte que en la societat hi ha dos tipus d'agents: privats i externs. Els agents privats, ja siguin consumidors o productors, són aquells que participen directament en l'activitat econòmica, mentre que els agents externs són els que no ho fan, encara que aquesta activitat els afecti d'una manera o d'una altra. Per exemple, en una activitat forestal, el productor i el consumidor de fusta són els agents privats d'aquesta activitat concreta, però els usuaris del bosc són externs a aquesta activitat, encara que se'n vegin afectats. En aquest context, els conceptes de privat i extern no tenen res a veure amb els sectors públic o privat.

Quan una activitat econòmica afecta una tercera persona (externa), la variació en el benestar d'aquesta tercera persona es denomina *externalitat*. Per tant, una externalitat és la variació de benestar d'un agent extern per causa d'una activitat econòmica. En economia, el benestar normalment es mesura en unitats monetàries, que reflecteixen el benestar que obtindria una persona en adquirir béns econòmics amb els seus diners. Quan el benestar de les terceres persones disminueix, es produeix una externalitat negativa o un cost extern, mentre que si augmenta el benestar d'aquestes terceres persones té lloc una externalitat positiva o benefici extern. Quan la variació de benestar és conseqüència d'un canvi

ambiental (impacte), l'efecte extern es denomina *externalitat ambiental*. La principal diferència entre un impacte ambiental i una externalitat ambiental és que l'externalitat és la conseqüència en termes de benestar (percepció) de l'impacte ambiental. Com a tal, una externalitat ambiental podria ser negativa per a alguns, passar de negativa a positiva amb el pas del temps o no afectar altres persones.

Normalment, el «mercat» (agents privats – consumidors i productors) no té en compte el benestar dels agents externs. Per tant, la quantitat de recursos que es dediquen a una activitat amb externalitats pot ser l'adequada des del punt de vista privat, però no per al conjunt de la societat. Les externalitats negatives comporten l'assignació en el mercat de massa recursos a l'activitat (producció o consum excessius). Les externalitats positives, per contra, impliquen que no s'han dedicat suficients recursos per aconseguir la producció òptima del bé o servei. Això, aplicat a la prevenció d'incendis, significa que les activitats forestals utilitzen pocs recursos per a la prevenció d'incendis, ja que es basen només en els beneficis privats. Llavors, ¿quina és la quantitat adequada per a la prevenció d'incendis? Des de la perspectiva de tota la societat, la resposta és el punt en el qual es creuen el cost i el benefici marginals socials. La diferència amb l'exposat anteriorment és que ara hem de tenir en compte els costos i els beneficis tant privats com externs. Per calcular el benefici i el cost marginal agregats, cal sumar la variació de benestar que experimenta cada agent de la societat com a causa d'un augment (o disminució) de cada unitat de l'activitat econòmica analitzada.

La variació de benestar per als agents privats es pot calcular raonablement bé mitjançant els preus de mercat, però per als efectes externs es necessiten uns mètodes de valoració més sofisticats, que es presenten en l'apartat següent.

3. MÈTODES DE VALORACIÓ

Existeixen una sèrie de mètodes per estimar els valors de no-mercat. La taula 1 presenta una classificació d'aquests mètodes segons la seva relació amb el mercat. Alguns es basen en les preferències mostrades en mercats reals, però la majoria de vegades no hi ha un mercat específic per als béns ambientals i els preus s'han d'observar en altres mercats (observacions indirectes). Aquest és el cas del mètode del cost del viatge i el mètode dels preus hedònics.

TAULA 1. *Principals mètodes de valoració*

	<i>Observació directa</i>	<i>Observació indirecta</i>
<i>Mercat existent</i>	<ul style="list-style-type: none">• Preus de mercat	<ul style="list-style-type: none">• Cost del viatge• Preus hedònics
<i>Mercat hipotètic</i>	<ul style="list-style-type: none">• Valoració contingent• Ordenació contingent, puntuació, elecció, i elecció entre parelles• Mapa de corbes d'indiferència• Referèndum	<ul style="list-style-type: none">• Cost del viatge hipotètic• Preus hedònics hipotètics

Un exemple clàssic de l'aplicació dels preus hedònics és el mercat immobiliari. Els preus de l'habitatge es consideren una suma de molts factors: grandària, tipus, antiguitat, ubicació, comunicacions i qualitat del seu entorn (proximitat a un bosc, per exemple), entre altres. El preu implícit de cadascun d'aquests components es pot identificar mitjançant una regressió. En concret, es pot avaluar la qualitat de l'entorn mitjançant l'observació dels preus dels habitatges i les seves característiques. En el cas dels incendis forestals, la disminució en el preu de l'habitatge deguda als efectes dels incendis reflectiria el preu implícit de la qualitat de l'entorn, és a dir, la disposició a pagar de la persona per tenir un entorn no afectat per incendis.

Els mètodes directes són aquells pels quals el mercat

ja existeix o, en defecte d'això, el mercat es «crea», i els preus s'observen directament en el mercat. Quan no existeix un mercat directe, es pot valorar el bé mitjançant la creació d'un mercat, que pot ser hipotètic o real. Quan aquest mercat és hipotètic, el grup de mètodes de valoració utilitzat es denomina *grup de preferències declarades*, dels quals el mètode bàsic és el de la valoració contingent (MVC), encara que n'existeixen molts altres. El mercat també es pot «construir» de manera real, com en el cas dels referèndums. Suposem que una administració local vol saber si els contribuents valoren una determinada política ambiental (disminució del risc d'incendis forestals). Es pot portar a terme un referèndum en el municipi per saber si la majoria de la població està disposada a pagar el cost d'aquesta política.

La tècnica de creació de mercats també es pot aplicar a les observacions indirectes, ja que els mètodes del cost del viatge i dels preus hedònics també es poden realitzar en termes hipotètics.

De tots els mètodes de valoració, els més utilitzats han estat els de preferències declarades, en concret el mètode de la valoració contingent. L'MVC no obté el valor monetari mitjançant l'observació de mercats alternatius, sinó que en simula un de directe mitjançant una enquesta.¹

Una modificació de l'MVC consisteix a variar al mateix temps la variable monetària i la variable física, i a més els canvis en la quantitat i la qualitat de la variable físi-

1. El qüestionari fa de mercat, les condicions de com s'exposen clarament als entrevistats. L'oferta se simula mitjançant l'enquesta, que ofereix variacions en la quantitat o la qualitat d'un bé a un preu determinat. L'entrevistat representa la demanda, ja que accepta o rebutja pagar el preu que se li ofereix. S'ofereix un sol preu (també denominat *licitació* i representat per A en notació matemàtica) a cadascuna de les submostres. A partir de models lògic, pròbit o similars, s'estima la màxima disposició a pagar a partir d'aquestes preguntes (per a una anàlisi general del mètode, vegeu Mitchell i Carson, 1989, o, en espanyol, Riera, 1994).

ca no han de limitar-se per força a un únic bé. Exemples de valoració simultània de diverses variables són mètodes com l'ordenació contingent i l'elecció contingent (vegeu Louviere *et al.*, 2000, per a una descripció general dels mètodes de preferències declarades).

4. VALORACIÓ ECONÒMICA DEL RISC D'INCENDIS

El nombre d'estudis que estimen els impactes dels incendis sobre el valor dels béns de no-mercat ofertats pels boscos és

Formalment, donats els preus p i el nivell d'ingressos y , la variació proposada en el qüestionari per al bé públic z des d'una situació inicial 0 fins a una alternativa 1 es pot expressar mitjançant una funció d'utilitat:

$$U(p, y, z^0) = U(p, y - VE, z^1),$$

en què la variació equivalent VE és el valor monetari d'un canvi en qualitat o quantitat del bé z , des de la situació 0 fins a la situació 1, que deixa a l'enquetat amb el mateix nivell d'utilitat si ha de pagar VE per aconseguir z^1 . És a dir, VE és la màxima disposició a pagar (DAP), per exemple, per una disminució en el risc d'incendis forestals des de z^0 fins a z^1 .

La probabilitat (Pr) d'obtenir una resposta afirmativa en demanar una quantitat VE a canvi de la variació proposada es pot expressar d'aquesta manera:

$$Pr \{ \text{resposta afirmativa} \} = Pr \{ U(p, y - VE, z^1, \varepsilon) > U(p, y, z^0, \varepsilon) \} \quad [1]$$

i la probabilitat d'una resposta negativa és:

$$Pr \{ \text{resposta negativa} \} = Pr \{ U(p, y - VE, z^1, \varepsilon) < U(p, y, z^0, \varepsilon) \},$$

on ε és un terme estocàstic —conegut per l'entrevistat, però desconegut per l'enquestador— que comptabilitza les característiques del bé i de l'entrevistat. Per tant, [1] es pot expressar com:

$$Pr \{ \text{resposta afirmativa} \} = Pr \{ VE(p, y, z^0, z^1, \varepsilon) > A \} \quad [2]$$

limitat (taula 2). Un dels primers estudis relacionats amb la influència dels incendis sobre béns públics forestals, en concret sobre la funció recreativa del bosc, és el de Vaux *et al.* (1984). L'objectiu principal d'aquest estudi va ser el de demostrar la viabilitat de l'MVC per a l'estimació d'aquests valors i que la disposició a pagar era una mesura apropiada per valorar els efectes del foc sobre la funció recreativa dels boscos. L'estudi va consistir primer a puntuar diferents fotografies que representaven boscos cremats i no cremats i després a expressar la disposició a pagar pel bosc més preferit. Els resultats van mostrar que els focs d'intensitat elevada afecten negativament els valors recreatius.

És a dir, l'enquestat respondrà afirmativament quan la seva variació equivalent (màxima disposició a pagar) pel canvi des de z^0 fins a z^1 és major o igual que la licitació proposada A . Quan es pregunta a l'enquestat si pagaria A unitats monetàries per disminuir el risc d'incendis forestal des de z^0 fins a z^1 , contestarà afirmativament si la seva disposició a pagar, VE , és major, o almenys igual, a A .

Atès que $VE(\cdot)$ depèn de ε , l'investigador considera la variació equivalent com una variable estocàstica, encara que l'enquestat en conegui el valor. Per tant, la variable seguirà una funció de distribució acumulada GVE i [2] es pot expressar com:

$$Pr \{resposta afirmativa\} = 1 - G_{VE}(A) \quad [3]$$

El model economètric estimat dependrà de la forma de la funció GVE . Per exemple, si GVE segueix una distribució logística estàndard i el model que s'ha de calcular és lineal, [3] es pot expressar com:

$$Pr \{resposta afirmativa\} = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta A}}$$

i resultarà un model lògic. Si la distribució és normal, el model serà pròbit. Una vegada que s'ha desenvolupat el model lògic o pròbit, es pot calcular fàcilment la mitjana o la mediana de la màxima disposició a pagar, que serà la mesura del benestar o l'estimador de VE per a l'enquestat mitjà.

Flowers *et al.* (1985) van dur a terme un estudi similar al del Vaux *et al.* (1984) a les Muntanyes Rocalloses dels Estats Units. A partir dels resultats, no hi ha un consens clar en la manera en què diferents tipus de foc (descontrolat o controlat) i la duració dels efectes del foc afectaven la funció recreativa dels boscos i el seu valor.

Loomis *et al.* (1996) van portar a terme un estudi on utilitzen l'MVC per estimar la disposició a pagar per protegir de grans incendis els boscos centenaris d'Oregon. L'escenari hipotètic plantejat a les persones entrevistades consistia en un programa de prevenció i control dels incendis que reduiria a la meitat el nombre d'incendis i el nombre d'hectàrees de bosc que cada any es cremen a la regió. Per a això van utilitzar una pregunta amb format dicotòmic (si pagarien o no una determinada quantitat de diners per desenvolupar el programa proposat) seguida d'una pregunta oberta (quant pagarien com a màxim). La mitjana de la disposició a pagar en el format dicotòmic va ser d'uns noranta-set euros per família. De manera similar, Loomis i González-Cabán (1998) van utilitzar també l'MVC per estimar el valor econòmic que tindria per als habitants de Califòrnia i Nova Anglaterra adoptar un pla de prevenció d'incendis que permetés reduir el nombre d'hectàrees cremades en els boscos de Califòrnia i Oregon. Mitjançant l'ús d'una pregunta dicotòmica i un model pròbit d'efectes aleatoris per analitzar dades de panell, la mitjana de la disposició a pagar per reduir els focs amb conseqüències catastròfiques en mil hectàrees va ser d'uns seixanta euros per família.

Englin *et al.* (1996) i Boxall *et al.* (1996) utilitzen el mètode del cost de viatge per estimar com variava l'elecció de la ruta que s'havia de fer a l'hora de practicar piragüisme entre una zona on feia deu anys que havia tingut lloc un incendi respecte a una zona de boscos centenaris. La pèrdua en el valor del viatge varia entre quinze i vint-i-dos dòlars

quan hi ha hagut un incendi en la zona en què es practica piragüisme. A partir d'aquests dos estudis, Englin (1997) construeix una funció on el valor del viatge està en funció dels anys que fa que va tenir lloc l'incendi. El valor per viatge augmenta al cap de seixanta anys després d'haver-se produït l'incendi.

Un altre estudi on es contrasta la validesa dels valors obtinguts mitjançant l'MVC per a la reducció del risc d'incendis és el de Winter i Fried (1997). Utilitzant un model de probabilitat conjunta de risc d'incendis a Michigan, van estimar separadament els valors per reduir el risc d'incendis forestals mitjançant accions privades i accions portades a terme per l'Administració pública. Per a ambdues aproximacions, la majoria de les persones entrevistades van expressar valors positius de disposició a pagar, tot i que tenien una assegurança de cobertura de danys, la qual cosa suggeria l'existència de béns de no-mercat a causa de les pèrdues provocades pels incendis forestals. Quant a la disposició a pagar per les accions públiques de reducció del risc dutes a terme per l'Estat i les autoritats locals, aquestes depenen de l'existència de risc, de la percepció del perill del foc, de la importància de la percepció de l'amenaça del foc i de l'actitud cap als impostos de la propietat. Pel que fa als que estan disposats a pagar, aquesta disposició depenia del valor de la propietat i de la renda de l'individu.

Gregory (2000) utilitza l'MVC i un mètode de valoració multiatribut per valorar opcions de control del foc dels boscos centenaris d'Oregon. En el cas de la valoració contingent, i de manera similar al de Loomis *et al.* (1996), estima la disposició a pagar per un programa de prevenció i control dels incendis que reduiria la mitjana anual d'incendis i d'hectàrees cremades. Utilitzant el format dicotòmic, obté que la mitjana de la disposició a pagar es troba entre 41,36 dòlars i 11,70 dòlars per persona en funció del percentatge

de disminució de la mitjana d'hectàrees cremades anualment. En el mètode de valoració multiatribut, els programes de prevenció i protecció dels incendis estaven formats per diferents atributs (preservació de boscos centenaris, nombre de bombers ferits en l'extinció dels incendis, fusta que s'obté dels boscos, llocs de treball de la indústria de la fusta, activitats recreatives que es poden fer en els boscos i el cost del programa). A partir de diferents nivells d'aquests atributs, es va construir tres programes de prevenció i control dels incendis, entre els quals havia d'escollir la persona entrevistada. Els valors obtinguts variaven entre un màxim de 29,88 dòlars i 1,17 dòlars en funció del programa. Aquest segon mètode permetia identificar quins atributs i programes eren preferits per les persones entrevistades, la qual cosa dóna lloc a una major informació sobre la decisió del públic.

Loomis *et al.* (2001) van dur a terme un estudi per determinar si els que realitzen excursionisme i els que van en bicicleta de muntanya (BTT) a Colorado tenien una resposta diferent davant la presència de focs de baixa intensitat i els anys que feia que s'havia produït. Els resultats van indicar diferents efectes sobre les visites dels que fan excursionisme i dels que van en bicicleta com a resultat de diferents tipus de foc. Així, els anys que feia que s'havia produït un incendi tenien un efecte positiu i significatiu en la demanda de visites dels excursionistes. En el cas dels excursionistes, el nombre de visites es veia poc afectat pel fet que haguessin tingut lloc focs de baixa intensitat, però en canvi sí que en quedava afectat el valor del viatge. La presència de focs de baixa intensitat, en canvi, tenia un efecte negatiu en les visites dels que practicaven bicicleta de muntanya: a causa dels arbres caiguts al llarg dels circuits de BTT, els practicants es veien obligats a baixar i a carregar la bicicleta. Aquest resultat implica que, tan bon punt té lloc un incendi forestal, aquestes àrees són atractives per als excursionistes, mentre que no

ho són per als que practiquen BTT. Englin *et al.* (2001) van fer una anàlisi comparativa dels efectes dels incendis al llarg del temps en les Intermountain West.

Hesseln i Alexander (2001) van dur una rèplica del treball de Loomis *et al.* (2001) al National Forest de Nou Mèxic per determinar els efectes del foc sobre les activitats recreatives i el seu valor. El model especificat permetia estimar l'excident del consumidor i determinar si els efectes dels incendis tenien una influència en les visites i en el valor d'aquestes, i si els valors esmentats eren diferents entre els que anaven en bicicleta i els excursionistes. Els resultats que van obtenir utilitzant l'MVC és que els incendis forestals tenien un efecte contrari a l'esperat. Així, tot i que la demanda de visites disminuïa a les zones que havien patit un incendi, hi havia més demanda de visites per motius recreatius en els llocs que havien sofert incendis de més alta intensitat que en els llocs que havien patit incendis ja feia anys. Una possible explicació era la curiositat i el desig de veure els efectes del foc, en particular els dels focs de gran intensitat.

Hesseln *et al.* (2001) van dur a terme entrevistes a trenta-tres llocs diferents durant el 1998 dins dels boscos nacionals de Colorado i Montana per contrastar com els incendis forestals afectaven la demanda d'activitats recreatives en aquests dos estats. Les dades es van recollir utilitzant el mètode del cost de viatge a partir del nombre actual de visites, i el mètode de la valoració contingent, a partir del nombre de visites que es farien segons els diferents tipus d'incendis que s'haguessin produït a la zona visitada. En el cas d'aplicació de l'MVC, als visitants entrevistats se'ls ensenyava tres fotos: una corresponent a un foc recent d'alta intensitat; una altra, a un foc recent de baixa intensitat i controlat, i una darrera, a un foc d'alta intensitat però que va tenir lloc fa vint anys. A partir d'aquí se'ls preguntava com canviaria la seva freqüència de visita si la meitat de la

zona visitada patís un incendi d'acord amb la foto presentada.

Els resultats van ser que el nombre mitjà de viatges d'un excursionista a Colorado, en una situació sense incendis, era de 10,28, amb un benefici net individual i per viatge de 55 dòlars. D'altra banda, els visitants de Montana obtenien un benefici individual d'uns 12 dòlars per viatge amb un nombre de viatges individuals i per lloc similar al de Colorado (10,25 dòlars). Quant als efectes del foc, els resultats van demostrar que els focs violents i els controlats tenien un efecte diferent en la demanda d'activitats recreatives en cada estat. Els focs controlats només incrementaven el valor anual a Colorado, mentre que els focs violents disminuïen el valor anual als dos estats. Aquest darrer resultat evidència un suport als programes de gestió dels combustibles forestals.

En el mateix estudi, i a Montana, la demanda dels excursionistes disminuïa lleugerament en àrees que s'estaven recuperant de focs d'alta intensitat i augmentaven en àrees que s'estaven recuperant de focs controlats. La resposta dels que anaven en bicicleta als dos tipus de foc era oposada a la dels excursionistes. El valor per viatge no es veia afectat pel tipus de foc en el cas dels dos grups d'usuaris d'activitats recreatives. A la vegada, la demanda disminuïa en els dos grups d'usuaris a mesura que augmentaven l'àrea cremada i la quantitat de zona cremada visible des dels camins, la qual cosa suggereix que l'extensió del foc afecta les visites.

5. BOSCOS I RISC D'INCENDIS A CATALUNYA

Els incendis forestals són un component més o menys natural dels ecosistemes mediterranis. Moltes espècies tenen adapta-

cions per poder sobreviure als focs (el suro de les alzines sureres, per exemple) o per poder-se regenerar ràpidament després dels incendis (rebotar des de les arrels). El problema és la intensitat que tenen els focs o el seu període de retorn, és a dir, la freqüència en què es donen en un mateix lloc (Prat, 2003).

Dels anys setanta als anys noranta ha tingut lloc un increment significatiu tant del nombre d'incendis com de la superfície cremada, que pot superar la capacitat dels ecosistemes per recuperar-se. Mentre que el nombre d'incendis segueix una tònica ascendent, les hectàrees cremades varien molt segons els anys. En termes mitjans, cada any prop de 50.000 incendis afecten de 700.000 a 1.000.000 d'hectàrees de bosc en l'àrea mediterrània i hi provoquen elevats danys econòmics, ecològics i fins i tot de vides humanes (Vélez, 1990).

5.1. *Els incendis a Catalunya*

Depenent de la font estadística i de la definició de bosc, es pot afirmar que aproximadament el 44 % del superfície de Catalunya és arbrada, una xifra superior a la mitjana d'Espanya i de la Unió Europea (La Vola, 1995). A Catalunya, a l'igual de la resta dels països mediterranis, el problema del foc s'ha agreujat en els últims anys. Observant les estadístiques sobre incendis forestals (taula 2), s'aprecia que, en un període de quatre a vuit anys, la superfície incendiada s'incrementa notablement. Els incendis forestals van ser particularment intensos el 1986 i el 1994, i una mica menys destructius el 1983, el 1986 i el 1998. A Catalunya, poc més d'un 1 % del nombre d'incendis representen una superfície afectada de més del 95 %. L'increment dels grans incendis forestals es deu en part a la major quantitat i continuïtat de combustible provocat per l'abandonament rural, juntament

amb períodes d'intensa sequera, que compliquen encara més la situació (Plana i Piqué, 2000).

TAULA 2. *Superfície afectada pels incendis forestals entre el 1983 i el 1998 a Catalunya*

<i>Any</i>	<i>Hectàrees arbrat</i>
1983	15.205
1984	3.449
1985	7.566
1986	43.290
1987	1.215
1988	1.002
1989	1.298
1990	668
1991	3.231
1992	757
1993	3.329
1994	62.575
1995	2.202
1996	531
1997	625
1998	13.715
Total	160.658
Mitjana anual (ha)	10.041
Superfície arbrada de Catalunya (ha)	1.332.000

FONT: Departament de Medi Ambient (2002).

Tot i que és impossible (i potser inconvenient en alguns casos) evitar totalment els incendis a la zona mediterrània, s'haurien de preveure totes les mesures que fessin possible la minimització dels seus efectes.

5.2. *Estimació del risc d'incendis*

L'objectiu del treball que es presenta a continuació (Riera i Mogas, 2003) era estimar si la població de Catalunya estava disposada a pagar el cost d'un programa de conservació i

neteja dels boscos de Catalunya que permetria reduir el risc d'incendis forestals. Fins on sabem, no s'ha fet cap exercici de valoració d'aquest tipus en les regions del Mediterrani, si bé, com s'ha explicat en l'apartat quart, n'hi ha precedents als Estats Units.

Per determinar el risc d'incendis a Catalunya, es va tenir en compte la superfície arbrada cremada anualment des del 1983 fins al 1998 (taula 2). En termes mitjans, es cremen cada any unes 10.000 hectàrees, o aproximadament un 1%, de la superfície arbrada de Catalunya. Aquest va ser l'índex de risc que es va presentar a la persona entrevistada, ja que si bé existeixen altres indicadors del risc d'incendis i formes d'expressar-ho, mitjançant diferents discussions de grup es va comprovar que aquest era l'indicador més comprensible per part de la persona entrevistada.

6. MÈTODE DE VALORACIÓ

59

En l'aplicació empírica es va plantejar un augment anual en els impostos per finançar un programa que disminuís a la meitat el risc actual d'incendis forestals. És a dir, passar d'una mitjana de 10.000 hectàrees anuals a 5.000 hectàrees anuals.

6.1. *Qüestionari*

El qüestionari contenia tres parts diferenciades. En la primera es descrivia la zona d'estudi i es formulaven preguntes sobre determinades externalitats que generen els boscos, com la prevenció de l'erosió o l'absorció de CO₂, així com funcions de tipus recreatiu. D'aquesta manera, les persones entrevistades tenien en compte algunes de les principals conseqüències

que els incendis forestals tenen sobre la població. S'acompanyava aquesta part d'un mapa de Catalunya que distingia la superfície de boscos. En aquesta primera part, també se'ls preguntava si estarien d'acord amb un augment de la superfície de boscos o la superfície actual els semblava suficient.

La segona part es concentrava en el procés de valoració. Un paràgraf introductori indicava l'objectiu del programa. Es deixava clar a la persona entrevistada que aquest era un projecte de prevenció d'incendis forestals que, mitjançant un programa de conservació i neteja dels boscos, permetria reduir a la meitat el risc d'incendis. La pregunta de disposició a pagar es va formular utilitzant un format de referèndum. La persona havia d'expressar amb un sí o amb un no si pagaria el cost del programa que s'indicava en el qüestionari. En concret, la pregunta que es va formular a les persones entrevistades va ser la següent:

«A causa dels incendis forestals, a Catalunya es cremen de mitjana cada any unes 10.000 hectàrees de bosc, és a dir, un 1% de tota la superfície de boscos que hi ha a Catalunya.

»Actualment, l'Administració dedica uns tres euros per persona a l'any en conservació i neteja de boscos. Amb un nou programa de conservació i neteja dels boscos de Catalunya, es podria reduir a la meitat el risc d'incendi, és a dir, cada any es cremaria de mitjana un 0,5% de la superfície de boscos. Per realitzar aquest programa, s'haurien de destinar per persona uns nou euros anuals. Estaria disposat/ada a pagar sis euros més a l'any en impostos perquè s'apliqui aquest programa que reduiria a la meitat el risc d'incendis?».

La quantitat que l'Administració destina realment a la prevenció d'incendis es va arrodonir a uns tres euros per persona i any (uns nou euros per hectàrea). Aquesta quantitat és una aproximació del que es destina realment a prevenció, incloent la neteja dels boscos. Per al seu càlcul es van utilitzar dades oficials de l'Administració autonòmica (DARP,

1996) i d'altres institucions relacionades amb el sector forestal com el Consorci Forestal de Catalunya o el Centre de la Propietat Forestal. La quantitat de diners necessària per portar a terme un programa de prevenció d'incendis forestals que permeti reduir a la meitat el risc d'incendis es va estimar a partir de consultes a diferents especialistes en temes forestals i dels objectius prevists en el Pla General de Política Forestal (DARP, 1994). El cost anual per persona es va estimar en nou euros per persona i any, amb el qual es cobririen les despeses anuals en prevenció i neteja dels boscos.

La modalitat de pagament que va aparèixer com a més realista va ser la d'un impost. Tot i que generalment es considera que aquesta forma de pagament provoca un cert rebuig, va aparèixer com la més creïble en les discussions de grup. En la tercera i última part del qüestionari s'inclouïen diverses preguntes sobre les característiques sociodemogràfiques de la persona entrevistada, com l'edat, el nivell educatiu, el nivell de renda i la situació ocupacional. A més d'aquestes preguntes, el qüestionari informava d'altres característiques d'interès, com si la persona entrevistada pertanyia a una organització relacionada amb la naturalesa o les vegades que s'havia desplaçat al bosc durant l'últim any i les activitats realitzades en aquests desplaçaments.

61

6.2. *Mostra*

La població objecte d'estudi es va limitar als habitants de Catalunya majors d'edat. La mostra de cinc-cents individus es va seleccionar de manera que fos representativa d'aquesta població en termes de la grandària del municipi de residència, edat i sexe de les persones entrevistades. Al mateix temps, el repartiment de les entrevistes entre les quatre províncies es va fer de manera proporcional a la població

de cadascuna. A la taula 3 es resumeixen les principals característiques de la distribució del nombre d'entrevistes per províncies, per municipi i per grandària del municipi, mentre que a la taula 4 es presenten les grandàries mostrals segons l'edat i el sexe de les persones entrevistades. El temps de durada de les entrevistes va ser d'una mitjana de deu minuts, i es van dur a terme durant la segona meitat de l'any 1999.

TAULA 3. *Distribució de la mostra per províncies, municipi i grandària del municipi*

<i>Província</i>	<i>Menys 10.000 habitants*</i>	<i>Entre 10.000 i 100.000</i>	<i>Més de 100.000 habitants*</i>	<i>Total (%) habitants*</i>
Barcelona	La Garriga (10) Centelles (10) Santa Coloma de Cervelló (10) Arenys de Munt (10) Alella (10)	Gavà (40) Viladecans (40) St. Andreu (40)	Barcelona (130) Cornellà (30) Sta. Coloma de Gramenet (50)	380 (76%)
Girona	Anglès (10) Bescanó (10)	Girona (15) Banyoles (10)		45 (9%)
Lleida	Torre-serona (10) Mollerussa (10)		Lleida (10)	30 (6%)
Tarragona	Flix (15)	Reus (20)	Tarragona (10)	45 (9%)
Catalunya	105	165	230	500

* Nombre d'entrevistes entre parèntesis.

FONT: Elaboració pròpia.

TAULA 4. *Distribució de la mostra per edat i sexe*

<i>Edat/sexe</i>	<i>Home</i>	<i>Dona</i>	<i>Total</i>
18-29 anys	50	50	100 (20%)
30-44 anys	75	75	150 (30%)
45-64 anys	75	75	150 (30%)
65 anys o més	50	50	100 (20%)
Total	250 (50%)	250 (50%)	500 (100%)

FONT: Elaboració pròpia.

7. RESULTATS

7.1. Anàlisi de la pregunta de valoració

En aquest apartat es presenta l'estudi de les respostes donades per les persones entrevistades a la pregunta de valoració. Per saber si de mitjana la població estaria disposada a pagar els sis euros anuals extres perquè s'adopti el programa proposat, es va formular la pregunta ja esmentada en format de referèndum. És a dir, si almenys el 50 % de la població pagaria el seu cost. Aquest format permet, a més, saber quin és el nivell d'aprovació de la iniciativa, que en aquest cas es va situar en el 60 %. La conclusió és que seria socialment rendible adoptar un programa que donés els resultats esperats de disminuir a la meitat el risc d'incendis forestals, si el seu cost fos l'indicat de sis euros per persona i any. En la taula 5 es presenten els resultats a la pregunta de valoració.

63

TAULA 5. *Respostes a l'acceptació a pagar un cost addicional de sis euros pel nou programa de prevenció d'incendis*

<i>Resposta</i>	<i>Freqüència</i>	<i>%</i>
Sí	302	60,4%
No	177	35,4%
No sap	19	3,8%
No contesta	2	0,4%
Total	500	100%

FONT: Elaboració pròpia.

7.2. Relació entre la disposició a acceptar el projecte i algunes variables rellevants

Per estudiar les possibles relacions entre les variables sociodemogràfiques més rellevants i l'acceptació a pagar per al programa de reducció d'incendis forestals, s'utilitzen les taules de

contingència. La primera columna de cada taula reflecteix si l'individu està d'acord o no amb el projecte, mentre que en les files es mostren els nivells de la variable i s'analitza la relació amb la disposició a acceptar el projecte. En cada casella apareix la freqüència i el percentatge que representa de respostes vàlides. La relació de dependència entre les dues variables es calcula a partir del valor de la khi quadrat. A cada valor de la khi quadrat li correspon una probabilitat d'independència entre les dues variables. Una probabilitat de 1 indica total independència i un valor de 0 significa que estan molt relacionades. Valors de la probabilitat majors de 0,05, per exemple, indiquen que no hi ha relació entre les variables estudiades a un nivell del 95 % de confiança.

La relació creuada entre l'aprovació del programa i el fet de si la persona entrevistada es va desplaçar com a mínim una vegada al bosc durant l'últim any és significativa (vegeu taula 7). Les persones que van gaudir directament del bosc són les que es mostren més d'acord amb el projecte de reducció d'incendis.

TAULA 6. *Caracterització de l'acceptació a pagar segons l'ús recreatiu del bosc*

	<i>Sí accepta pagar</i>	<i>No accepta pagar</i>	<i>Total</i>
Ha visitat el bosc durant l'últim any	200 41,75%	92 19,21%	292 60,96%
No ha visitat el bosc durant l'últim any	102 21,29%	85 17,74%	187 39,03%
Total	302 63,04%	177 36,95%	479

khi quadrat = 9,51886 prob. = 0,00203

FONT: Elaboració pròpia.

Com es mostra en la taula 7, la relació que es dona entre l'acceptació del programa i la pertinença o no a alguna associació relacionada amb la naturalesa no és significativa.

D'aquest fet es dedueix que la resposta donada pels entrevistats no s'ha vist afectada per la seva pertinença a alguna organització ecologista.

TAULA 7. *Caracterització de l'acceptació a pagar segons la pertinença a una organització relacionada amb la naturalesa*

	<i>Sí accepta pagar</i>	<i>No accepta pagar</i>	<i>Total</i>
Pertany a una organització ecologista	12	9	274
	2,5%	1,88%	4,38%
No pertany a una organització ecologista	290	168	205
	60,54%	35,07%	95,61%
Total	302	177	479
	63,04%	36,95%	

khi quadrat = 0,32873 prob. = 0,56641

FONT: Elaboració pròpia.

TAULA 8. *Caracterització de l'acceptació a pagar segons la grandària de la població de residència*

	<i>Sí accepta pagar</i>	<i>No accepta pagar</i>	<i>Total</i>
Municipis de < 10.000 hab.	79	25	104
	16,49%	5,22%	21,71%
Municipis d'entre 10.000 hab. i 100.000 hab.	81	69	150
	16,91%	14,40%	31,31%
Municipis de més de 100.000 hab.	142	83	225
	29,64%	17,33%	46,97%
Total	302	177	479
	63,04%	36,95%	

khi quadrat = 12,71546 prob. = 0,00173

FONT: Elaboració pròpia.

En la taula 8 es mostra la relació entre el grau d'acord amb el programa i la grandària del municipi de residència de la persona entrevistada. Es comprova que aquesta relació és significativa per a un nivell de confiança del 99% i s'observa que es dona una relació positiva entre ambdues variables, ja que a mesura que augmenta la grandària del municipi més gran és l'acceptació. D'aquesta manera, el percentatge d'en-

trevistats que accepten el programa és gairebé el doble en els municipis de més de 100.000 habitants respecte als de menys de 10.000 habitants.

També es comprova (vegeu taula 9) que no existeix una relació significativa de dependència entre el programa proposat i la província d'origen de la persona entrevistada per al 95 % de confiança, la qual cosa suggereix que la província de residència no influeix en la resposta.

TAULA 9. *Caracterització de la disposició a pagar segons la província*

	<i>Sí accepta pagar</i>	<i>No accepta pagar</i>	<i>Total</i>
Barcelona	219 45,72%	148 30,89%	367 76,61%
Tarragona	31 6,47%	8 1,67%	39 8,14%
Lleida	23 4,80%	6 1,25%	29 6,05%
Girona	29 6,05%	15 3,13%	44 9,18%
Total	302 63,04%	177 36,95%	479

khi quadrat = 9,76480 prob. = 0,02067

FONT: Elaboració pròpia.

TAULA 10. *Caracterització de l'acceptació a pagar segons l'edat*

	<i>Sí accepta pagar</i>	<i>No accepta pagar</i>	<i>Total</i>
Entre 18 i 29 anys	78 16,28%	23 4,80%	101 21,08%
Entre 30 i 44 anys	85 17,74%	51 10,65%	136 28,39%
Entre 45 i 64 anys	85 17,74%	49 10,23%	134 27,97%
Més de 65 anys	54 11,27%	54 11,27%	108 22,54%
Total	302 63,04%	177 36,95%	479

khi quadrat = 16,63494 prob. = 0,00084

FONT: Elaboració pròpia.

Finalment, es comprova (taula 10) que els individus de menor i mitjana edat estan més d'acord amb el projecte que els majors de 65 anys. El nivell de significació entre ambdues variables és elevat d'acord amb el valor de la khi quadrat. Les edats intermèdies són les que presenten una major acceptació del projecte, la qual cosa pot estar possiblement interrelacionat amb la renda.

8. CONSIDERACIONS FINALS

Els incendis forestals constitueixen actualment la principal causa de destrucció dels boscos de la regió mediterrània amb un increment significatiu en els últims anys, tant en el nombre d'incendis com en la freqüència dels incendis forestals que adquireixen grans dimensions.

En aquest treball es presenta, en primer lloc, una anàlisi econòmica de la manera en què s'ha de determinar la quantitat socialment òptima de recursos que cal dedicar a la prevenció d'incendis forestals i els principals mètodes de valoració econòmica que des de l'economia ambiental s'han desenvolupat per als béns de no-mercat. En la segona part del treball es presenta un resum dels estudis que han intentat valorar econòmicament els efectes sobre les activitats recreatives del foc o bé la disminució del risc d'incendis forestals. En l'última part es presenta una aplicació per determinar la disposició a pagar per un determinat programa de reducció del risc d'incendis forestals a Catalunya, tenint en compte el cost que comporta aquest programa i els seus beneficis. Per a això s'aplica el mètode de la valoració contingent, que permet valorar béns per als quals no existeix mercat.

El principal resultat és que el 60% de la població estaria disposada a pagar el cost extra estimat en uns sis euros per persona i any per reduir a la meitat el risc d'in-

cendis forestals en els boscos de Catalunya. Això significa que, en termes de consulta o referèndum, la majoria de la població estaria d'acord amb el programa de prevenció d'incendis forestals presentat. Aquest resultat sembla que està d'acord amb la percepció social i política cap al problema dels incendis forestals a Catalunya, tal com es reflecteix en els mitjans de comunicació i en les partides pressupostàries dedicades a la prevenció i l'extinció d'incendis.

De la relació creuada entre l'acceptació a pagar pel programa i algunes de les variables sociodemogràfiques, cal deduir que les respostes declarades pels individus no es veuen afectades significativament per la pertinença a una organització de defensa de la naturalesa i la província de residència de la persona entrevistada; per contra, l'edat, la grandària del municipi i la possibilitat de gaudir de les funcions recreatives dels boscos per part de la persona entrevistada influeixen significativament en el grau d'acord amb el programa.

Finalment, es tracta d'una investigació oberta, per la qual cosa seria interessant la comparança dels resultats obtinguts amb els que s'obtidrien mitjançant altres mètodes.

També es podria, en el futur, analitzar si els resultats obtinguts per la reducció del risc d'incendis es poden transferir, amb encert, a altres boscos espanyols i de la regió mediterrània.

BIBLIOGRAFIA

BOXALL, P.; WATSON, D.; ENGLIN J. (1996). «Backcountry recreationists: valuation of forests and park management features in the Canadian shield region». *Canadian Journal of Forest Research*, núm. 26, p. 982-990.

DEPARTAMENT D'AGRICULTURA, RAMADERIA I PESCA [DARP] (1994). *Pla general de política forestal*. Barcelona: Gene-

- ralitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca.
- (1996). *Resum d'activitats 1996*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca.
- DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT (2002). *Estadístiques d'incendis forestals* [en línia]. Generalitat de Catalunya. <<http://www.gencat.es/mediamb/incendis>>
- ENGLIN, J. (1997). *Review of existing scientific literature on the effects of fire on recreation use and benefits*. [Reno: University of Nevada. Dept. of Appl. Econ. and Statis.] [Document de treball]
- ENGLIN, J.; BOXALL, P.; CHAKRABORTY, K; WATSON, K. (1996). «Valuing the impacts of forest fires on backcountry forest recreation», *Forest Science*, núm. 42, p. 450-455.
- ENGLIN, J.; LOOMIS, J.; GONZÁLEZ-CABÁN, A. (2001). «The dynamic path of recreational values following a forest fire: a comparative analysis of states in the Intermountain West». *Canadian Journal of Forest Research*, núm. 31, p. 1837-1844.
- FLOWERS, P.; VAUX, H.; GARDNER, P.; MILLS, T. (1985). «Changes in recreation values after fire in the Rocky Mountains». *Res. Note. PSW-373*. Berkeley, Calif.: U. S. Department of Agriculture; Forest Service; Pacific Southwest Forest & Range Experiment Station.
- GREGORY, R. S. (2000). «Valuing environmental policy options: A case study comparison of multiattribute and contingent valuation survey methods». *Land Economics*, núm. 76 (2), p. 151-173.
- HESSELN, H.; ALEXANDER, S. J. (2001). «Summary report of the effects of fire on recreation demand in New Mexico» [en línia]. U. S. Forest Service, USDA. <www.fs.fed.us/pnw/woodquality/Results.pdf>
- LA VOLA (1995). *El bosc, més que un club: Radiografia forestal de Catalunya, comarca per comarca*. Barcelona: Proa.

- LOOMIS, J. B.; GONZÁLEZ-CABÁN, A.; GREGORY, R. (1996). «A contingent valuation study of the value of reducing fire hazards to old-growth forests in the Pacific Northwest». A: *Research paper PSW-RP-229-Web*. Berkeley, Calif.: Pacific Southwest Research Station: USDA: Forest Service.
- LOOMIS, J. B.; GONZÁLEZ-CABÁN, A. (1998). «A willingness to pay for protecting acres of spotted owl habitat from fire», *Ecological Economics*, núm. 25, p. 315-322.
- LOOMIS, J. B.; GONZÁLEZ-CABÁN, A.; ENGLIN, J. (2001). «Testing for differential effects of forest fires on hiking and mountain biking demand and benefits». *Journal of Agricultural and Resource Economics*, núm. 26 (2), p. 508-522.
- LOUVIERE, J. J.; HENSHER, D. A.; SWAIT, J. D. (2000). *Stated Choice Methods: Analysis and Application*. Cambridge: U.K. Cambridge University Press.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2001). *Los incendios forestales en España durante el año 2000*. Madrid: Secretaría General de Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza.
- MITCHELL, R. C.; CARSON, R. T. (1989). «Using surveys to value public goods: the contingent valuation method». A: *Resources for the Future*. Washington, D. de C.
- PLANA, E.; PIQUÉ, M. (2000). «Casuística y posibles soluciones a los grandes incendios forestales de la cuenca mediterránea: El caso de Catalunya». A: *Seminario de Política y Sociología Rural*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- PRAT, N. (2003). *Ecologia. Conceptes bàsics i paper de l'home en el funcionament de l'ecosistema* [en línia]. <<http://www.ub.es/ecologiaimediambient/index.htm>>
- RIERA, P. (1994). *Manual de valoración contingente*. Madrid: Instituto de Estudios Fiscales.
- RIERA, P.; MOCAS, J. (2003). «Valoración de riesgo de incen-

- dios forestales en España». *Ciudad y Territorio: Estudios Territoriales*, núm. 135 (35), p. 119-126.
- VAUX, H.; GARDNER, P.; MILLS, T. (1984). «Methods for assessing the impact of fire on forest recreation», *Gen. Thech. Rep. PSW-GTR-79*, Berkeley, Calif.: U. S. Department of Agriculture: Forest Service: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- VÉLEZ, R. (1990). «Los incendios forestales en el mediterráneo: Perspectiva regional». *Unasyva*, núm. 162, vol. 41.
- WINTER, G. J.; FRIED, J. S. (1997). «Assessing the benefits of wildfire risk reduction: A contingent valuation approach». *A: Proceedings of the 1996 Society of American Foresters National Convention*, p. 320-325.



**INSTITUCIÓ CATALANA
D'HISTÒRIA NATURAL
QUÈ CAL FER DESPRÉS
DELS INCENDIS FORESTALS?,
A CÀRREC DE
V. RAMON VALLEJO,
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA**

Hi ha una opinió generalitzada en la ciutadania i en els poders públics que, després d'un incendi forestal, cal fer alguna cosa per tal de mitigar la catàstrofe i restaurar els terrenys cremats. Tanmateix, l'impacte dels incendis depèn no només del foc, sinó també de les propietats intrínseques dels ecosistemes afectats; per tant, no hi ha receptes universals que es puguin aplicar sistemàticament després d'un incendi, i molt sovint els terrenys cremats es regeneren sols, sense necessitat de cap intervenció antròpica. En aquesta conferència es presenten criteris per a avaluar i prioritzar les necessitats de restauració postincendi i exemples de la seva aplicació, basats en experiències realitzades al País Valencià.

1. PLANTEJAMENT

74

El desencadenament de grans incendis forestals sovint genera en el públic i en les administracions una reacció de voler reconstruir els boscos afectats al més aviat possible i fer propostes de grans plans de restauració forestal. Encara és més freqüent que, amb l'esvaniment del fum dels incendis i l'aparició d'altres notícies (altres catàstrofes), les promeses i les demandes de restauració també s'esvaneixen. Evidentment, els incendis de grans dimensions provoquen forts xocs emocionals en la població més afectada i d'ací sorgeix la reacció de voler fer-hi alguna cosa. En aquest capítol intentarem racionalitzar la casuística ecològica provocada pels grans incendis forestals per tal de fonamentar les possibles estratègies de restauració.

La seqüència de preguntes (i dubtes) que cal formular-se sobre la restauració de forests cremades seria la següent:

1. Cal reforestar totes les forests cremades? Una visió intervencionista apostaria en aquesta direcció.

2. O bé no s'ha de fer res i cal deixar que la naturalesa faci la seva feina («la naturalesa és sàvia»)? Davant aquesta opció, molta gent es preguntaria: però mai no s'ha de restaurar?, alguna cosa s'hi haurà de fer, oi?

3. En cas que la restauració sigui selectiva, caldria definir:

a) On?

b) Quan? Amb quines prioritats?

c) Com?

Òbviament, per respondre aquest seguit de qüestions, cal definir prèviament un objectiu clar de les possibles intervencions de restauració i de la gestió de la forest cremada.

La resposta a aquestes preguntes requereix l'anàlisi de quins impactes ecològics pot produir el foc que puguin justificar la realització de projectes de restauració (per tal d'evitar aquests impactes). Aquesta anàlisi de riscos d'impactes s'haurà de basar en la predicció de la resposta dels ecosistemes cremats. Previsiblement, no tots els ecosistemes respondran de la mateixa manera al foc; a més, els focs poden variar molt en la seva severitat (relacionada amb les temperatures màximes i el seu temps de residència), i les condicions meteorològiques en el període postincendi poden ser també molt variables i afectar la regeneració.

El medi forestal que ens ocupa es refereix no només als boscos en sentit estricte, sinó a tots els ecosistemes terrestres seminaturals considerats dins l'espai forestal (no agrícola ni urbà), és a dir, boscos, matollars i prats. Entenem per restauració, en sentit ampli, les accions adreçades a reconstruir els ecosistemes degradats (pel foc, en aquest cas) quan aquesta recuperació no es produeix espontàniament o no es produeix a la velocitat requerida per als objectius plantejats (Vallejo, 1999, vegeu la definició que dóna de *restauració*

ecològica la Society for Ecological Restoration International [<http://www.ser.org>]).

2. ELS OBJECTIUS DE LA RESTAURACIÓ DESPRÉS DEL FOC

Els objectius de gestió d'una forest cremada poden ser diversos i múltiples. El mateix incendi pot suscitar la temptació d'aprofitar per canviar l'ús de la forest. D'antuvi, s'ha considerat que un motiu per cremar els boscos podria ser facilitar el canvi en la classificació del terreny per promoure la urbanització. Deixant obertes les possibilitats que puguin proposar-se diversos objectius de restauració, en funció, per exemple, d'interessos específics dels propietaris de la forest, si assumim que no es proposa canviar l'ús del sòl, els objectius ecològics mínims que s'haurien de considerar serien:

76

2.1. *Conservació del sòl i regulació hídrica*

El sòl és un recurs primari per als ecosistemes terrestres i és no renovable a escala ecològica. Atès que el sòl del bosc cremat corre el risc d'erosió irreversible, la seva conservació és un objectiu primari que cal considerar. De manera semblant, l'aigua és el factor més limitador als nostres boscos i, per tant, la seva captació al bosc és clau per tal de garantir la regeneració de l'ecosistema. D'altra banda, la pèrdua excessiva de sòl i l'escolament de grans quantitats d'aigua que es pot produir després del foc en situacions extremes poden provocar inundacions i danys per l'excés de càrrega sedimentària de les crescudes, a més d'incrementar ràpidament el rebliment dels embassaments.

2.2. *Augmentar la resistència i la resiliència¹ dels ecosistemes*

Els nostres ecosistemes estan exposats de manera natural als incendis forestals. Aquest és un fet consubstancial a la Mediterrània (Naveh, 1990) i probablement es farà més acusat en la perspectiva del canvi climàtic. En aquest context d'alta probabilitat d'incendis forestals, l'objectiu és que els ecosistemes seminaturals siguin menys inflamables i combustibles (més resistents) i tinguin la màxima capacitat d'autoregeneració en el cas que es cremin (més resilients). La inflamabilitat és variable segons les espècies i depèn del seu contingut hídric, de la seva composició mineral i del seu contingut de substàncies orgàniques volàtils, encara que les diferències entre espècies no són enormes. La combustibilitat sí que varia força entre formacions vegetals, així com la seva resiliència, que depèn en gran part de les estratègies reproductives de les espècies dominants.

77

2.3. *Millorar la qualitat dels ecosistemes i del paisatge*

Atès que els paisatges mediterranis han sofert un ús intens i extensiu al llarg de mil·lennis, ús que en molts casos ha comportat la degradació dels ecosistemes, un objectiu de la restauració postincendi ha de ser millorar la qualitat dels ecosistemes degradats en termes de riquesa d'espècies («biodiversitat»), estructura i maduresa, incloent-hi l'escala de paisatge. Gran part dels nostres boscos i matollars van ser explotats intensament fins als anys 1960-1970, de manera

1. La *resiliència* es refereix a l'elasticitat d'un ecosistema afectat per una pertorbació, és a dir, la seva capacitat per retornar a l'estat previ a la pertorbació.

que predominaven formacions en estadis primerencs de la successió secundària. Després de l'abandó extensiu de l'explotació d'aquests ecosistemes i de cultius marginals, i amb la generalització dels incendis forestals, la restauració ha de promoure el desenvolupament d'ecosistemes madurs, que són escassos en els nostres paisatges. Aquests ecosistemes madurs poden ser boscos de planifolis o mixtos en molts casos, però també màquies en condicions de clima semiàrid on no es poden desenvolupar plenament els boscos.

3. ANÀLISI I PREDICCIÓ DE L'IMPACTE ECOLÒGIC DELS INCENDIS FORESTALS

L'impacte ecològic dels incendis depèn, d'una banda, de les característiques del foc, i, de l'altra, de les propietats de l'ecosistema, encara que el comportament del foc no és independent de les propietats de la vegetació (que constitueix el combustible).

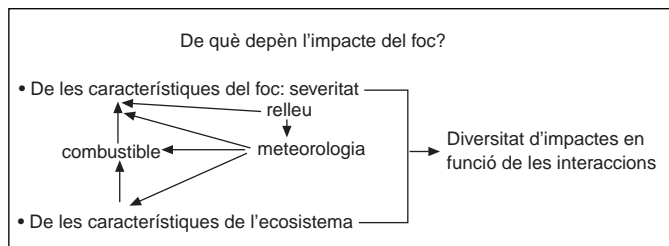


FIGURA 1. Factors que determinen l'impacte ecològic dels incendis forestals.

La severitat descriu l'impacte directe del foc en l'ecosistema. Sovint es determina experimentalment mesurant les temperatures per damunt un cert llindar (generalment 150 °C) i el seu temps de residència al bosc (Pérez i More-

no, 1998). Aquest paràmetre és molt variable a l'espai, entre un punt i un altre del bosc, tant en horitzontal com en vertical. La severitat ve determinada també per les característiques del combustible, la seva quantitat, estructura i humitat. La majoria de les plantes del sotabosc en focs de superfície i els arbres en focs de capçades perden els teixits vius de la part aèria; les que tenen meristemes subterranis generalment conserven la capacitat de rebrotar («plantes rebrotadores») en la mesura que aquests meristemes no siguin afectats per temperatures letals gràcies a la baixa conductivitat tèrmica del sòl. Les plantes que no tenen aquests meristemes subterranis moren completament («plantes germinadores») i només es regeneren a través de les llavors que hi puguin haver al sòl o les que puguin arribar d'indrets propers no cremats. El foc, en funció de la seva severitat, consumeix poc o molt els horitzons orgànics del sòl, i afecta les llavors, la microflora (esterilització) i la microfauna que hi viu. Dins el sòl mineral, els efectes del foc solen ser superficials i de curta durada. La majoria dels incendis forestals en les nostres contrades produeixen el consum de gran part de la virosta i la mortalitat de la vegetació del sotabosc, amb un grau d'impacte en els arbres molt variable. Sovint resten rodals d'arbres no cremats a la copa o afectats només parcialment.

El sòl recent cremat, desprotegit de la coberta vegetal i, sovint, de la virosta, està exposat a la degradació de la seva superfície (Bautista *et al.*, 1996), la reducció de la capacitat d'infiltració d'aigua i, consegüentment, l'augment de l'escolament superficial i l'erosió. El risc d'erosió ha de tenir en compte tant la mateixa degradació del sòl afectat com els efectes aigües avall de l'augment d'escolament (possibles inundacions) i del transport de sediments, és a dir, del valor social de les zones que puguin rebre aquests impactes.

El segon gran factor que condiciona l'impacte dels

incendis es relaciona amb les característiques intrínseques de l'ecosistema, fonamentalment la capacitat d'autoregeneració de la vegetació. Els estudis de la regeneració espontània dels ecosistemes cremats es van iniciar a l'Europa Mediterrània cap als anys 1970, amb els treballs pioners de Louis Trabaud al Llenguadoc (Trabaud, 1974, 1984, 1992; Trabaud i Lepart, 1980). Posteriorment, aquests estudis es van estendre per tots els països mediterranis (vegeu, per exemple, una síntesi a Pausas i Vallejo, 1999). Igual que a Califòrnia (Hanes, 1971), els estudis de Trabaud mostraren que la vegetació mediterrània afectada pel foc es regenerava, en general, seguint el denominat *procés d'autosuccessió*, és a dir, que la vegetació existent abans del foc es torna a recuperar en la seva composició florística poc temps després, de manera espontània. Sobre aquesta generalització hi ha algunes excepcions rellevants. Un cas que ha afectat recentment grans superfícies de boscos catalans és el de la pinassa (*Pinus nigra*), espècie que pràcticament no es regenera després del foc (Retana *et al.*, 2002). També és significatiu el cas de la savina (*Juniperus phoenicea*) (Riera i Castell, 1997). El pi blanc (*Pinus halepensis*) té una alta capacitat de germinació després del foc, excepte quan la massa afectada encara no ha arribat a la maduresa reproductiva, que és aproximadament de quinze a vint anys. Aquest cas és freqüent en plantacions recents o quan un incendi afecta la massa de pins en regeneració d'un incendi anterior.

El bosc cremat es pot regenerar a diferents velocitats (Vallejo i Alloza, 1998) i pot seguir més o menys el procés d'autosuccessió, depenent molt més de les estratègies reproductives de les espècies vegetals cremades (rebrotadores *versus* germinadores) que de la mateixa severitat del foc. Les plantes rebrotadores es regeneren de manera eficient gràcies als òrgans subterranis que han quedat poc o gens afectats pel foc, o a la protecció de l'escorça en el cas de l'alzina surera.

Els òrgans subterranis, a més de ser un reservori de gemmes vegetatives, també tenen reserves de carbohidrats i nutrients. Aquestes reserves, junt amb la persistència del sistema d'arrels, permeten una ràpida rebrotada en un entorn (el sòl recent cremat) fertilitzat per les cendres i amb baixa competència pels recursos bàsics. Fins i tot a l'estiu, sense pluges, en poques setmanes es produeix el rebrot de moltes d'aquestes espècies. Per contra, les plantes germinadores necessiten l'arribada de les pluges per germinar i tenen, al principi, una velocitat de creixement més lenta que les rebrotadores, atès que parteixen d'una petita llavor i han de generar la planta sencera.

Moltes plantes mediterrànies tenen capacitat de rebrotar —la major part de les esclerofil·les, com ara l'alzina (*Quercus ilex*), la surera (*Q. suber*), el garric (*Q. coccifera*), el llentiscle (*Pistacia lentiscus*), l'aladern (*Rhamnus alaternus*) i moltes altres, però també herbàcies com ara el llistó (*Brachypodium retusum*). Espècies germinadores típiques són les estepes (*Cistus* sp.), el romaní (*Rosmarinus officinalis*) o la gatosa (*Ulex parviflorus*), a més dels pins, amb l'excepció del pi de Canàries (*Pinus canariensis*).

81

La velocitat de regeneració de la coberta vegetal després del foc és la clau en la protecció del sòl enfront de la seva degradació superficial, l'augment de l'escolament i l'erosió (Vallejo, 1999). Com més lenta és la recuperació de la coberta, més temps estarà exposat el sòl nu als agents meteorològics. La coincidència de la seqüència temporal dels focs d'estiu amb les pluges torrencials, generalment de tardor, amb poc temps per a permetre una suficient regeneració de la vegetació, suposa sempre un alt risc de degradació en pendents forts i sòls vulnerables.

En definitiva, les possibles combinacions de severitat, relleu, condicions meteorològiques immediatament postincendi, sensibilitat del sòl a la degradació i composició en

espècies amb diverses estratègies regeneratives resulten en una gran diversitat de possibles impactes dels incendis forestals. Tanmateix, la sensibilitat del sòl (especialment la seva erosionabilitat) i les estratègies reproductives de les espècies vegetals dominants acostumen a ser els factors crítics en les nostres forests.

4. L'AVALUACIÓ DE L'IMPACTE DELS INCENDIS FORESTALS I DE LA NECESSITAT DE RESTAURACIÓ

Basant-nos en les anàlisis anteriors, podem intentar donar resposta a les preguntes formulades sobre la necessitat d'emprendre projectes de restauració en forests cremades. Les respostes han de ser suficientment generalitzables perquè siguin aplicables a l'escala de la planificació, utilitzant indicadors que es puguin derivar de la informació cartogràfica disponible. S'assumeixen els objectius ecològics mínims esmentats a l'apartat 2.

4.1. *Cal reforestar totes les forests cremades?*

Clarament, no. Molts boscos, matollars i prats es regeneren seguint el procés d'autosuccessió de manera eficient i, en qualsevol cas, d'una manera més eficient de la que podríem estimular artificialment amb intervencions antròpiques. La majoria de boscos madurs de pi blanc, dominants a les terres baixes mediterrànies, i les formacions d'alzines, suros i roures es regeneren eficientment després d'un sol foc o amb incendis no gaire recurrents. Un altre cas és el de les pinedes de pinassa o de pi roig.

4.2. *O bé no s'ha de fer res i deixar que la naturalesa faci la seva feina?*

La naturalesa probablement és sàvia, però potser no sempre la seva saviesa ens convé, especialment després d'haver alterat els ecosistemes durant mil·lennis i d'haver construït cases i altres estructures en el medi forestal o aigües avall de conques torrencials. Hi ha situacions, d'alt risc d'erosió i d'inundacions després dels incendis, en les quals no fer res pot derivar en danys catastròfics a la societat. Es tracta, evidentment, d'identificar aquestes situacions.

4.3. *Les possibles accions de restauració haurien de ser selectives*

a) On s'ha de restaurar?

En forests on els sòls siguin vulnerables a l'erosió i la vegetació tingui baixa capacitat de regeneració després del foc, majoritàriament comunitats dominades per espècies germinadores. També en boscos on el foc faci desaparèixer les espècies arbòries (vegeu apartat 3) i l'objectiu de gestió sigui recuperar el bosc.

b) Quan? Amb quines prioritats?

En els casos que el risc d'impacte es refereix a l'erosió postincendi, les actuacions restauradores han de ser immediates per tal de pal·liar la degradació del sòl a curt termini, justament quan el risc és més elevat. Aquest cas seria de màxima prioritat des del punt de vista ecològic i de prevenció de catàstrofes postincendi. En els casos que les actuacions afec-

tin la millora de l'estructura i la composició de l'ecosistema en relació amb les espècies llenyoses, les actuacions no són urgents i és millor fer-les tan bon punt s'ha produït una certa recuperació de la coberta vegetal (normalment al cap de dos anys), per tal d'evitar que els treballs de reforestació puguin produir impactes negatius al sòl.

c) Com?

Les tècniques que cal emprar, així com la selecció de les espècies en el cas de revegetació (reforestació en sentit ampli), depenen de l'estat de degradació de l'ecosistema i dels objectius plantejats (vegeu l'apartat 2), objectius que es relacionen amb els riscos ecològics postincendi. En el cas d'elevat risc d'erosió postincendi, les tècniques efectives són les «sembres d'emergència», que consisteixen en la sembra d'herbàcies autòctones, acompanyades d'una coberta orgànica de tipus empallat (*mulch* segons l'anglicisme utilitzat comunament al sector) (Bautista *et al.*, 1996). En el cas de reintroducció de llenyoses, es recomana utilitzar diverses espècies simultàniament, incorporant arbustos rebrotadors autòctons (en el cas que no hi siguin a l'ecosistema) per tal de millorar la resiliència de l'ecosistema al foc, i combinant coníferes amb planifolis, per tal d'aprofitar el creixement més ràpid dels pins amb la resiliència dels planifolis i les interaccions sinèrgiques que s'estableixen entre ambdós grups d'espècies (Pausas *et al.*, 2004). Les tècniques de preparació de terreny, l'addició d'esmenes, el cultiu de les plantes al viver i les tècniques de plantació han d'optimitzar l'aprofitament de l'aigua i la supervivència dels plançons en la fase d'arrelament, moment crític per a l'èxit de les plantacions en clima mediterrani (Vallejo *et al.*, 2003).

5. ANÀLISI CARTOGRÀFICA DE LA FRAGILITAT DELS ECOSISTEMES ALS INCENDIS

Les propostes desenvolupades a l'apartat anterior es poden aplicar a estudis de camp, per tal d'identificar amb detall els impactes del foc, visitant les forests recentment cremades, o es poden elaborar en suport cartogràfic, de manera que es pugui planificar la localització de les possibles actuacions al territori en cas d'incendi forestal. Les dues aproximacions són portades a terme actualment pel Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) per a la Generalitat Valenciana: la primera consisteix a realitzar prospeccions de tots els incendis de superfície superior a les 100 ha, amb l'elaboració d'un informe urgent d'impacte i recomanacions d'accions de restauració, i la segona, a elaborar cartografies de fragilitat de les forests davant dels incendis, cartografies que s'han incorporat al Pla General d'Ordenació Forestal de la Comunitat Valenciana. A continuació detallem els mètodes utilitzats per a l'elaboració d'aquestes cartografies (Alloza, 2003).

La fragilitat dels ecosistemes es descriu a partir de factors físics (limitacions hídriques i risc d'erosió) i de les característiques de la vegetació, sintetitzades pel que anomenem *potencial de regeneració*. Es parteix d'informació cartogràfica de base, generalment disponible en format digital.

A partir de la xarxa d'estacions meteorològiques es calculen les restriccions hídriques del sòl segons Montero de Burgos i González Rebollar (1983), i el risc d'erosió que creua les capes de l'equació universal de pèrdua de sòl (USLE) amb un sistema d'informació geogràfica (SIG). La combinació d'aquests dos indicadors reflecteix les limitacions hídriques per a la vegetació en regeneració (també en el cas d'una reforestació) i el risc de degradació postincendi.

El potencial de regeneració de la vegetació s'avalua utilitzant dos paràmetres, el potencial d'autosuccessió des-

prés del foc i la velocitat de regeneració. El potencial d'auto-successió de les formacions vegetals intenta descriure en quina mesura la fisiognomia de la vegetació es veu significativament afectada pel foc. La capacitat d'auto-successió es considera bona quan les espècies dominants es recuperen espontàniament. Aquest és el cas més general. Aquesta capacitat es veu reduïda quan una espècie dominant no es regenera amb eficiència, com seria el cas de les pinedes de pinassa amb un únic incendi o les pinedes joves de pi blanc. En aquests casos, el foc produeix un canvi dràstic en l'estructura de l'ecosistema i en els seus usos socials. La velocitat de regeneració de la vegetació és el factor crític en el risc de degradació del sòl, tal com s'ha discutit a l'apartat 3. Aquest paràmetre s'avalua segons l'abundància d'espècies rebrotadores (Vallejo i Alloza, 1998); concretament, es considera que la velocitat de regeneració és «alta» quan hi ha més d'un 40% de recobriment d'espècies rebrotadores, «mitjana» amb una presència de rebrotadores inferior al 40% i «baixa» quan només hi ha espècies germinadores. Aquest valor llindar del 40% s'ha derivat del fet que, per sota d'aquest percentatge de recobriment, es considera que el sòl està exposat a un alt risc d'erosió (Thornes, 1995). De la combinació ponderada d'ambdós paràmetres, segons un judici expert qualitatiu, es deriva el potencial de regeneració que integra l'eficiència de recuperació de l'ecosistema, en la seva integritat, després dels incendis. Aquests paràmetres s'obtenen en format cartogràfic a partir dels inventaris forestals i del *Mapa forestal de España: Memoria general* (Ruiz de la Torre, 1990) en les seves versions digitals.

De la integració, mitjançant un SIG, del risc de degradació amb la capacitat de regeneració, ponderant el pes d'aquests dos criteris de nou segons un judici expert, s'elabora la cartografia de fragilitat dels ecosistemes als incendis (figura 2).



FIGURA 2. *Avaluació de la fragilitat respecte als incendis dels ecosistemes forestals (ni agrícoles ni urbans) a la Comunitat Valenciana. El grau de fragilitat resulta de la combinació del risc de degradació de l'ecosistema i de la capacitat de regeneració de la vegetació. La cartografia de base d'aquest mapa s'ha realitzat a escala 1:50.000 (Alloza, 2003).*

Evidentment, les forests més fràgils tindrien la màxima prioritat de restauració en el cas que es veiessin afectades per un incendi. Per a zones no cremades recentment, la prioritització de les actuacions de restauració resultaria de la combinació del paràmetre *fragilitat* amb la capacitat protectora actual de la coberta vegetal, segons que es pot estimar a partir dels nivells de maduresa de Ruiz de la Torre (1990).

El procediment descrit intenta plasmar els coneixements actuals de la resposta dels ecosistemes mediterranis al foc en una metodologia de fàcil aplicació a l'escala de la planificació territorial, per a l'avaluació tant del risc de degradació com de la restauració postincendi. De la mateixa manera, pel fet que a l'avaluació es discriminen els factors de risc, les tècniques de restauració es poden dissenyar per tal de resoldre justament els processos degradatius identificats. Aquesta mateixa aproximació metodològica pot incorporar les millores que es puguin produir en els models i les cartografies de base, com ara nous models d'erosió, i el possible refinament dels criteris per a caracteritzar les respostes de la vegetació.

6. AGRAÏMENTS

La recerca que ha donat lloc a aquest article ha estat subvencionada per la Generalitat Valenciana i Bancaixa, així com els projectes de la Comissió Europea (DG Recerca) REDMED i GEORANGE.

BIBLIOGRAFIA

ALLOZA, J. A. (2003). *Análisis de repoblaciones forestales en la Comunidad Valenciana. Desarrollo de criterios y pro-*

cedimientos de evaluación. València: Universitat Politècnica de València. [Tesi doctoral]

- BAUTISTA, S.; ABAD, N.; LLOVET, J.; BLADÉ, C.; FERRAN, A.; PONCE, J. M.; CATURLA, R. N.; ALLOZA, J. A.; BELLOT, J.; VALLEJO, V. R. (1996). «Siembra de herbáceas y aplicación de *mulch* para la conservación de suelos afectados por incendios forestales». A: VALLEJO, V. R. [ed.]. *La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. València: CEAM, p. 395-434.
- BAUTISTA, S.; BELLOT, J.; VALLEJO, V. R. (1996). «Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem». *Arid Soil Res. and Rehab.*, núm. 10, p. 235-242.
- HANES, T. L. (1971). «Succession after fire in the chaparral of southern California». *Ecological Monographs*, núm. 41 (1), p. 27-52.
- MONTERO DE BURGOS, J. L.; GONZÁLEZ REBOLLAR, J. L. (1983). *Diagramas bioclimáticos*. Madrid: ICONA.
- NAVEH, Z. (1990). «Fire in the Mediterranean – a landscape perspective». A: GOLDAMER, J. G; JENKINS, M. J. [ed.]. *Fire in ecosystems dynamics*, p. 1-20. L'Haia: SPB Academic Publishing.
- PAUSAS, J. G.; BLADÉ, C.; VALDECANTOS, A.; SEVA, J. P.; FUENTES, D.; ALLOZA, J. A.; VILAGROSA, A.; BAUTISTA, S.; CORTINA, J.; VALLEJO, V. R. (2004). «Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: New perspectives for an old practice – a review». *Plant Ecology*, núm. 171, p. 209-220.
- PAUSAS, J. G.; VALLEJO, V. R. (1999). «The role of fire in European Mediterranean ecosystems». A: CHUVIECO, E. [ed.]. *Remote Sensing of Large Wildfires*. Berlín: Springer-Verlag, p. 2-16.
- PÉREZ, B.; MORENO, J. M. (1998). «Methods for quantifying fire severity in shrubland-fires». *Plant Ecology*, núm. 139, p. 91-101.

- RETANA, J.; ESPELTA, J. M.; HABROUK, A.; ORDÓÑEZ, J. L.; SOLÀ-MORALES, F. (2002). «Regeneration patterns of three Mediterranean pines and forest changes after a large wildfire in NE Spain». *Ecoscience*, núm. 9, p. 89-97.
- RIERA, J.; CASTELL, C. (1997). «Efectes dels incendis forestals recurrents sobre la distribució de dues espècies del Parc Natural del Garraf: el pi blanc (*Pinus halepensis*) i la savina (*Juniperus phoenicea*)». *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, núm. 65, p. 105-116.
- RUIZ DE LA TORRE, J. (1990). *Mapa forestal de España: Memoria general*. Madrid: ICONA.
- THORNES, J. B. (1995). «Mediterranean desertification and the vegetation cover». A: FANTECHI, R.; BALABANIS, P.; RUBIO, J. L. [ed.]. *Desertification in a European context*. Luxemburg: European Commission.
- TRABAUD, L. (1974). «Apport des études écologiques dans la lutte contre le feu». *Rev. Forest. Française*, núm. especial, p. 140-153.
- (1984). «Changements structuraux apparaissant dans une garrigue de chêne kermès soumise à différents régimes de feux contrôlés». *Oecologia Applicata*, núm. 5, p. 127-143.
- (1992). «Influence du régime des feux sur les modifications à court terme et la stabilité à long term de la flore d'une garrigue de *Quercus coccifera*». *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, núm. 47, p. 209-230.
- TRABAUD, L.; LEPART, J. (1980). «Diversity and stability in garrigue ecosystems after fire». *Vegetatio*, núm. 43, p. 49-57.
- VALLEJO, V. R. (1999). «Post-fire restoration in Mediterranean ecosystems». A: EFTICHIDIS, G.; BALABANIS, P.; GHAZI, A. [ed.]. *Wildfire Management*. Atenes: European Comission: Algosystems, p. 199-208.
- VALLEJO, V. R.; ALLOZA, J. A. (1998). «The restoration of burned lands: The case of eastern Spain». A: MORENO, J.

- M. [ed.]. *Large Forest Fires*. Lieden: Backhuys Publ., p. 91-108.
- VALLEJO, R.; CORTINA, J.; VILAGROSA, A.; SEVA, J. P.; ALLOZA, J. A. (2003). «Problemas y perspectivas de la utilización de leñosas autóctonas en la restauración forestal». A: REY, J. M.; ESPIGARES, T.; NICOLAU, J. M. [ed.]. *Restauración de ecosistemas mediterráneos*. Alcalá: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, p. 11-42.



**SOCIETAT CATALANA
DE GEOGRAFIA**

**ENDREÇAR EL TERRITORI
PER COMBATRE ELS INCENDIS,**

A CÀRREC DE

RUFÍ CERDAN,

DE LA UNIVERSITAT

AUTÒNOMA DE BARCELONA

Amb una recurrència quasi matemàtica, els grans incendis forestals colpegen moltes comarques catalanes. La protecció del medi natural i del paisatge requereix elements de reflexió, però també propostes concretes per tal de trobar la complicitat de les administracions i del conjunt dels implicats en la materialització d'aquestes propostes. A partir de les experiències al Bages, s'analitzaran idees que considerin els mecanismes necessaris perquè els gestors del territori i les administracions locals emprenguin les accions de gestió silvícola i de millora de les infraestructures de defensa que permetin protegir el medi natural i el paisatge de moltes comarques catalanes.

INTRODUCCIÓ

94

Amb una recurrència quasi matemàtica, els grans incendis forestals colpegen moltes comarques catalanes. L'estiu de l'any 2003 quedarà marcat en la negra estadística com l'any que es va cremar bona part del Parc Natural de Sant Llorenç del Munt i van perdre la vida cinc persones residents en una urbanització propera al bosc. A pesar d'aquest balanç tan negatiu, hi ha hagut un consens notable a afirmar que els esforços esmerçats en el sistema d'extinció han produït bons resultats. Paral·lelament s'ha mostrat com aquesta efectivitat dels dispositius d'extinció es veia minvada per les grans mancances de la lluita contra els incendis procedents de la prevenció i l'ordenació territorial. La continuïtat vertical i horitzontal dels combustibles, la desprotecció dels assentaments humans, la manca de camins adequats, la falta d'equipaments com punts d'aigua i la manca de franges de seguretat per ancorar l'incendi s'han constatat com les principals mancances de la prevenció i l'ordenació territorial.

Al Bages hem acumulat experiències metodològiques diverses en el disseny i l'execució de perímetres de defensa de

les urbanitzacions, en la planificació de línies estratègiques de defensa des de les carreteres per ancorar l'atac contra els grans incendis, en la millora dels camins i de l'accessibilitat del territori i en la distribució dels equipaments de lluita contra el foc, dins un pla de prevenció comarcal. La metodologia de l'inventari de camins que actualment utilitzen els consells comarcals es va gestar al Bages i ha estat homologada per l'Institut Cartogràfic de Catalunya. També estem elaborant en aquesta comarca el Pla de Protecció del Medi Natural i del Paisatge, que ens mostra els efectes dels grans incendis en la modelació del paisatge actual, ens ajuda a delimitar els espais naturals de més interès i ens proporciona una diagnosi dels processos econòmics i socials que hem de tenir presents en les directrius del planejament territorial. La proposta ja s'ha presentat amb èxit als redactors del Pla Territorial Parcial de les comarques centrals.

Aquestes experiències de planificació territorial, recolzades en la reflexió continguda en la tesi doctoral «Planificació territorial i dimensió socioambiental, una lectura geogràfica dels incendis forestals al Bages», han proporcionat arguments per bastir una proposta d'articulació de les figures de planejament forestal (d'ordenació silvícola, de prevenció i d'emergències) amb el planejament del paisatge i els plans territorials. En la proposta es considera un mecanisme per proveir els gestors del territori i les administracions locals dels recursos necessaris per emprendre les accions de gestió silvícola i de millora de les infraestructures de defensa que hem trobat a faltar durant l'estiu del 2003. El contingut bàsic d'aquesta proposta es va presentar en una jornada celebrada a Manresa el dia 16 de setembre de 2003 i va tenir el suport de les dues-centes persones assistents. Després de la jornada, es treballa a difondre la proposta i trobar la complicitat de les administracions i del conjunt dels implicats en la seva materialització.

1. DARRERS CANVIS EN EL SISTEMA DE LLUITA CONTRA ELS INCENDIS FORESTALS

1.1. *Canvis en l'extinció 1998-2003*

Després dels incendis que van afectar el Solsonès i el Bages el 1998, es van generalitzar els retrets al sistema de lluita contra els focs de forest. Pel que fa a l'extinció, eren bastants les veus que, al marge de considerar la suficiència dels recursos, entenen que el cos de bombers, format per les metròpolis i també dirigit des d'aquestes, no estava preparat per lluitar contra un fenomen complex com l'incendi forestal. En el mateix sentit, la manca de coneixement del territori, agreujada per un protocol de treball en el qual pràcticament es prescindia de la cartografia, es convertia en una crítica suficientment fonamentada. Un darrer grup de retrets al sistema de lluita argumentava la manca de coordinació entre els actuants professionals i voluntaris (bombers i agrupacions de defensa forestal, ADF) com una altra de les qüestions no resoltes pel pla INFOCAT.

Els incendis de l'estiu del 2003 han estat un test per verificar si les reformes empreses en els dispositius d'extinció han estat útils. Entre els canvis organitzatius experimentats des d'aleshores, al marge del ball del Cos d'Agents Rurals per diverses conselleries, destaquen la creació del Grup de Recolzament d'Actuacions Forestals (GRAF) dins del cos de bombers i les millores tecnològiques per al posicionament en el territori. Des del seu inici, es va impulsar la producció de cartografia digital i la utilització del GPS, que permet als centres de comandament situats a cada regió d'emergències conèixer la distribució dels vehicles en l'escenari de l'actuació. La cartografia utilitzada, a partir del mapa topogràfic 1:50.000, pot ser suficient per a la gran majoria d'actuacions que són urbanes o de salvament a les carreteres. No obstant això, el posicionament i l'elecció de les millors vies d'accés requeririen una cartogra-

fia més detallada i, per descomptat, una base de dades de camins molt més fiable. Els GRAF, escampats per totes les regions d'emergències, han analitzat la continuïtat dels combustibles proposant actuacions amb foc prescrit o amb mitjans mecànics per reduir les densitats més perilloses. Al Bages han col·laborat amb la Federació de les ADF en la construcció de la franja de defensa de la carretera N-141, emprant els seus propis mitjans. Han estudiat i assajat l'ús del foc com a eina d'intervenció en la mateixa emergència, la qual cosa suposa prendre decisions arriscades, que tot just fa quatre dies eren proscriutes. Pel que coneixem, en els incendis de l'estiu del 2003 moltes vegades la seva feina va ser un bon recurs per aturar l'avenç del front i, sens dubte, va servir per millorar i adquirir experiència de cara al futur. Vist des del Bages, el fraccionament de la brigada de Barcelona en tres regions d'emergències i la creació de la Regió d'Emergències Centre amb seu a Manresa han proporcionat una major proximitat dels bombers al territori i l'oportunitat d'avançar molt en la coordinació. Aquesta no s'ha improvisat; ha partit de la concentració dels recursos de la vigilància mòbil i de les ADF, que han emplaçat el nostre sistema de comunicacions al costat mateix de la sala de control de la Regió d'Emergències Centre, fet que ha optimitzat la distribució d'efectius, ha aportat informació complementària en la presa de decisions per part del comandament, ha donat una major celeritat a les actuacions de suport aportant aigua per apagar foc, combustible o entrepanys, així com també ha ajudat a l'organització del voluntariat.

1.2. *Condicions limitadores de l'eficàcia de l'extinció*

Moltes de les declaracions que vam sentir els dies posteriors als incendis feien referència a l'estat dels combustibles i a la seva gran continuïtat vertical i horitzontal. Aquest ha estat el

factor que ha proporcionat intensitat i velocitat a l'avenç dels fronts, amb la qual cosa ha minvat l'eficàcia de mitjans aeris, que, en certs moments, van fer atacs molt intensos, i que, malgrat tot, no van poder evitar incendis que en les primeres hores s'estenien per centenars d'hectàrees.

Aquesta continuïtat, que per nosaltres és conseqüència de la manca de gestió resultant de la baixa rendibilitat dels productes forestals, per a molta gent s'interpreta com a deixadesa de la propietat i porta a fer propostes poc raonables com la de les neteges sistemàtiques de tot el sotabosc o l'obertura indiscriminada de tallafocs.

Els responsables de l'extinció han trobat a faltar l'existència de franges de defensa de baixa densitat arbòria per procedir a operacions d'anclatge amb contrafocs amb garanties d'eficàcia i seguretat. Aquestes actuacions no es poden improvisar; s'han de planificar en funció de l'anàlisi de la distribució territorial del risc, i un dels llocs més adequats són les carreteres que topogràficament tinguin les condicions adequades, atès que una de les garanties d'èxit és l'accessibilitat de tota la franja, així com un equipament de punts d'aigua suficient. Aquestes actuacions s'han d'executar amb cura per minimitzar-ne l'impacte ambiental i paisatgístic, i presenten l'avantatge que en molts trams els usos inclosos dins de la franja són agrícoles. A tall d'exemple, podem dir que en les franges que separen les principals masses forestals previstes al Pla de Prevenció del Bages, redactat el 1999, es preveia una longitud total de 83,6 quilòmetres; si la franja fos com la que s'ha executat a la carretera N-141 de 100 metres d'amplada per banda, la superfície total seria de 1.672 hectàrees, de les quals els usos que no requereixen intervenció representen 525,4 hectàrees. No obstant això, cal recordar que, per tal que aquestes franges tinguessin la màxima efectivitat, caldria que els camps que fossin inclosos tinguessin cultius verds per evitar que el sembrat o el rostoll actuessin com a propagadors de l'incendi.

Un altre element que ha estat de la màxima rellevància és la vulnerabilitat dels assentaments humans. Desgraciadament, les víctimes mortals en una urbanització i l'evacuació de pobles i urbanitzacions van ser una notícia de gran impacte que ha ajudat a prendre consciència del problema. El cas és que els esforços destinats a l'atenció de les persones i els seus habitatges, com mana el protocol fonamental, distreuen efectius de la lluita contra el front que va avançant pel bosc i posa en perill nous assentaments humans.

Encara que no hagi tingut transcendència mediàtica, els que hem estat encarregats d'organitzar els desplegaments dels efectius hem pogut constatar fins a quin punt la manca d'accessos és un factor limitador de gran transcendència. Es comenta que, davant de la reclamació d'algun responsable del parc natural que s'assignessin més vehicles terrestres als bombers, la resposta va ser: «I per on els fem passar?». Sigui certa l'anècdota o no, és un fet que la manca generalitzada d'accessos en mínimes condicions a la major part de masses forestals dins el parc natural és molt més greu. Distribuir els vehicles de bombers i ADF per apropar-los a cada front i assegurar l'aprovisionament d'aigua ha resultat molts cops lent i difícil i ha obligat a treballar en condicions penoses, la qual cosa sovint ha compromès la seguretat. Donada la falta de punts d'aigua, s'han hagut d'organitzar veritables caravanes per accedir a punts molt freqüentats amb uns accessos infernals.

99

2. EL PLANEJAMENT FORESTAL DESPRÉS DE QUINZE ANYS DE LLEI FORESTAL CATALANA

Totes aquestes condicions que hem trobat a faltar corresponen a actuacions que s'haurien de preveure dins els plans de prevenció, que s'haurien d'incorporar als plans tècnics de millora en les finques afectades i que haurien de formar part de la revi-

sió periòdica dels plans d'emergències previstos en les diverses normes i executats per actors privats i públics, els quals configuren un entramat de responsabilitats difícil de coordinar.

100

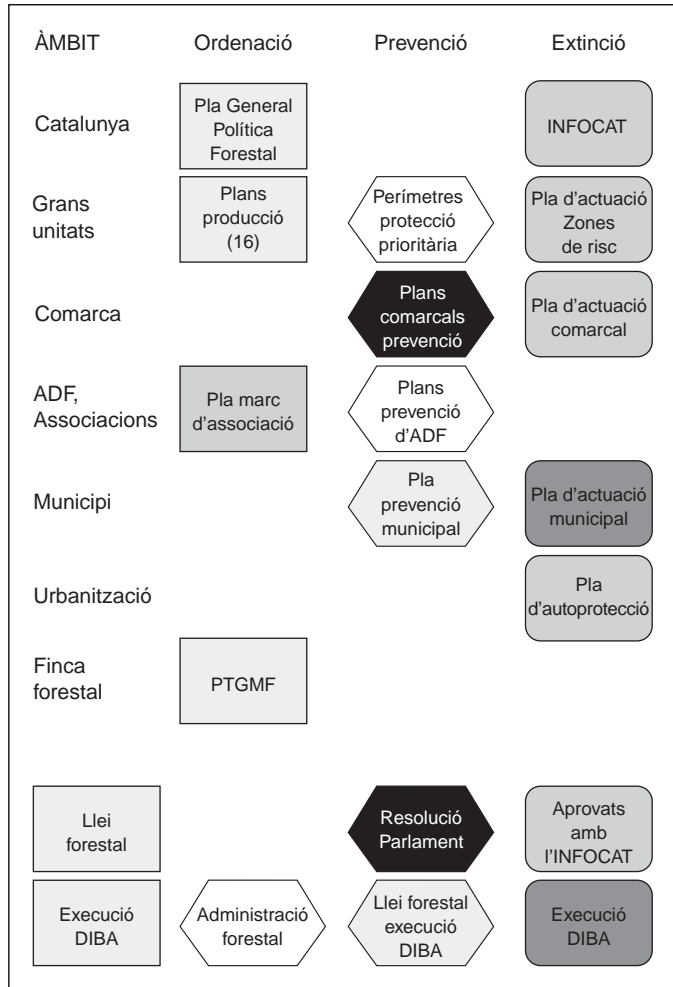


FIGURA 1. *Figures vigents de planejament forestal.*

L'esquema de la figura 1 ens permet visualitzar les figures de planificació existents a diferents àmbits i que afecten la gestió forestal des de les funcions d'ordenació silvícola, de prevenció i d'extinció.

2.1. *Figures de planejament forestal*

La Llei forestal catalana de 1988 va donar una importància a la planificació que no es correspon amb el desenvolupament que l'Administració ha proporcionat al text legal. El Pla General de Política Forestal, peça angular del sistema de planejament, no va ser aprovat fins al 1994. Deu anys després, trobem a faltar gran part de les realitzacions que preveia, especialment les que es corresponen amb els 70.000 milions de pessetes que s'havien d'invertir i que s'han quedat en una tercera part (ICV, 2003). En segon lloc, la Llei va determinar que es realitzessin els plans de producció forestal amb la finalitat d'establir les pautes de gestió racional dels boscos en funció de les condicions de cada zona, de manera que, a partir d'agrupacions comarcals, s'havien de fer setze plans de producció. Solament hem conegut un esborrany del primer pla que l'Administració mai no va arribar a aprovar. Mentrestant, amb moltes dificultats es van afegint noves finques a les que ja disposen de pla tècnic de gestió i millora forestal. Al desembre de 2002, després d'onze anys, la superfície privada ordenada representa el 17,3 % (CPF, 2003).

Pel que fa a la planificació preventiva, l'Administració forestal ha dissenyat els perímetres de protecció prioritària per a la defensa de grans incendis en masses forestals extenses. L'estudi detallat del perímetre de protecció prioritària del Bages nord-oriental mostra —al marge d'inconsistències en el disseny, com una amplada prevista que el pressupost disponible redueix a la meitat— un grau de realització molt baix,

a més d'una manca total de correspondència amb els plans de gestió de les finques forestals en les quals s'ha de concretar el perímetre o, com a mínim, reflectir les seves propostes. La manca de correspondència i continuïtat també es fa palesa en els plans d'emergència de la lluita contra incendis dels municipis afectats per l'àmbit del perímetre de protecció prioritària.

En els casos que s'observa una falta de continuïtat entre figures de planificació dels mateixos àmbits geogràfics redactades per una sola administració, la manca de coordinació és més evident quan la iniciativa de redacció correspon a diverses administracions, com passa entre plans comarcals i plans municipals de prevenció i d'emergències redactats per consells comarcals, ajuntaments o la Diputació de Barcelona (DIBA) (figura 1).

De fet, la falta de coordinació institucional es mostra cruament en l'exemple de la correspondència entre plans de prevenció i plans d'emergències. Com s'ha dit anteriorment, les grans infraestructures de prevenció territorials corresponen a les dissenyades en els perímetres de protecció prioritària que l'Administració forestal dibuixa però no executa. La majoria de plans d'emergència es redacten en àmbits municipals per part de la Diputació de Barcelona, i en aquests plans no es tenen en compte infraestructures de defensa de grans masses forestals, de manera que l'esforç es concentra en l'obertura i la millora de camins, punts d'aigua i recursos materials de lluita. En canvi, l'Administració forestal confia que siguin els propietaris els que, des de les seves finques privades, sol·licitin les subvencions que convoca el Departament de Medi Ambient a fi d'efectuar les línies de defensa en finques de dimensions evidentment poc adequades per dissenyar actuacions pensades per enfrontar-se amb els grans incendis (Cerdan, 2003).

2.2. *Planejament forestal a Catalunya: resultats*

Atenent els resultats i contemplant la dimensió de la superfície cremada, no podem dir que s'hagi complert el primer objectiu de la planificació, que és la pervivència del recurs forestal. L'efecte pràctic d'un sistema de lluita que confia sobretot en els dispositius d'extinció, però que no aborda amb èxit el factor fonamental de la manca de gestió que proporciona continuïtat als combustibles (Plana *et al.*, 2001), és el que comencem a conèixer per *paradoxa de l'extinció* (Bosch, 2003; Piñol, 2003). És a dir, els èxits assolits en els anys de condicions més favorables, en els quals la intervenció directa controla en el seu inici la gran majoria dels focs, en realitat permeten que es vagi acumulant combustible que ningú no gestionarà i que estarà disponible per als grans incendis en els anys que les dures condicions meteorològiques i la simultaneïtat d'ignicions dificultaran el control i faran comptar les hectàrees cremades per milers.

El complex sistema de planejament vigent falla per la seva base. Passen els anys i hi ha molts plans que no es redacten, com és el cas dels plans de producció. Segurament caldrà revisar-ne la funció dins de l'actual procés de redacció del nou Pla General de Política Forestal.

Com hem vist en l'anàlisi del planejament elaborat al Bages, la transversalitat i la correspondència entre els diversos tipus de plans que són complementaris dins del mateix àmbit geogràfic són inexistents. Cal una revisió profunda que, al meu entendre, ha de començar per qüestionar la necessitat de fer plans de prevenció a diverses escales. És cert que l'existència d'una autoritat municipal és una condició que ajuda a garantir que s'executin les mesures proposades. De tota manera, a les nostres comarques, si no fos pel suport de la Diputació provincial, la majoria de municipis rurals no tenen capacitat tècnica ni econòmica per empen-

dre les actuacions dels seus plans municipals de prevenció. Així doncs, aquesta autonomia municipal és més un obstacle que una facilitat per assolir una planificació físicament més coherent des d'un àmbit supramunicipal. Les línies de defensa, les infraestructures viàries i els equipaments territorials de lluita es poden pensar i distribuir millor en una escala supramunicipal.

Hi ha un altre aspecte important que cal considerar, que són les dificultats pràctiques de caràcter legal que ens trobem a l'hora d'aplicar les propostes d'infraestructures de prevenció. Les actuacions en camins estratègics, franges de defensa i perímetres de protecció d'urbanitzacions es troben dificultades per les limitacions urbanístiques i per propietaris, que en un nombre creixent són aliens al món rural i, ja sigui perquè consideren insuficients les compensacions o per insolidaritat, impedeixen la realització d'actuacions molt necessàries. Aquest fet ens fa pensar en la necessitat de relacionar el planejament forestal (especialment el preventiu) amb el planejament urbanístic. La via més fàcil és la incorporació de les infraestructures de prevenció (redactades des d'àmbits supramunicipals) directament en els plans parcials territorials, que són els que han de contenir les delimitacions d'espais en els quals no es poden fer intervencions urbanístiques pels seus valors naturals o agrícoles, o bé perquè es tracta de zones de protecció hidrològica o d'infraestructures viàries. Així doncs, les infraestructures de defensa contra incendis podrien tenir aquest rang de protecció i les determinacions que les afecten serien d'obligat compliment per als plans urbanístics de rang inferior amb els mecanismes d'execució i compensació que estableix la legislació urbanística.

Observem també que és en aquests plans territorials on els redactors intenten incorporar les directrius de conservació del paisatge. Per tant, en aquest context, les masses forestals poden gaudir d'una consideració important com a

part molt fonamental del conjunt paisatgístic en moltes comarques catalanes.

3. NOVES ORIENTACIONS EN LA PLANIFICACIÓ TRANSVERSAL SOBRE EL PAISATGE

3.1. *Planificació transversal sobre el paisatge: condicions socioeconòmiques*

Com hem comentat anteriorment, el despoblament rural, l'envelliment de la població que resta i el deteriorament de la relació treball/renda dels propietaris forestals, combinats amb la tendència a l'escalfament del clima, són les palanques que fan girar la roda del cercle viciós dels incendis forestals. En comarques com el Bages, en les quals els grans incendis han cremat en els darrers vint anys més del 30% de la superfície forestal, constatem que el principal agent que influeix en el paisatge és el foc. D'altra banda, la societat ha atorgat determinats valors a indrets que contenen hàbitats que es consideren especialment interessants, i la majoria d'aquests hàbitats són forestals. Així, la serra de Castelltallat és l'espai PEIN més extens de les nostres comarques interiors, i els incendis de 1994 i 1998 n'han destruït els boscos de pinassa que van motivar la seva declaració com a espai PEIN.

Podem concloure que, vistes les limitacions del sistema de lluita contra el foc, en aquestes comarques de risc la protecció del paisatge passa per plantejar-se a fons la intervenció en el nivell socioeconòmic per invertir la tendència i aconseguir l'objectiu que reclama la societat de protegir els valors principals d'aquest paisatge.

De manera més concreta, caldria estimular totes les accions encaminades a limitar la tendència a l'abandonament rural, ja siguin millores d'infraestructures i de serveis que

facin la vida rural més equiparable als estàndards urbans, ja siguin accions directes encaminades a potenciar el paper dels joves, de les dones o de pobladors urbans que estiguin disposats a arrelar al camp.

En el nivell estrictament econòmic, potenciar el desenvolupament endogen passa no únicament per facilitar la utilització del paisatge com a recurs turístic sinó, sobretot, per estimular la realització d'activitats en el territori directament encaminades a la seva protecció. Algunes d'aquestes activitats, com el control dels combustibles sota les línies elèctriques, que al Bages realitzen en bona part pagesos integrants de les ADF, són finançades per empreses que usen el territori i paguen per minimitzar el risc que la seva implantació provoca. Altres activitats directament i indirecta lligades a la prevenció (tractament de combustibles, manteniment de camins i punts d'aigua, pastures o cultius verds que dificultin la progressió dels incendis) haurien de ser finançades pel conjunt dels beneficiats amb les funcions socials, ambientals i protectores que realitzen els boscos.

Si prenem consciència de les expectatives de futur en l'àmbit de la UE, hem de tenir molt present que la tendència en l'orientació finalista dels fons comunitaris, pressionada per les reivindicacions dels més desfavorits per les regles actuals del comerç mundial, passa per la reducció de les subvencions directes a la producció i el foment de les activitats vinculades a la protecció del medi ambient.

Des de la perspectiva comunitària, s'observen altres tendències coincidents amb aquesta dinàmica que ens porten a considerar, cada vegada més seriosament, la necessitat de vincular la planificació territorial rigorosa dels usos del sòl en els espais lliures amb el desenvolupament rural per fomentar el treball agrari a favor del medi.

En aquest context, a pesar del gran paper que encara tenen els poders estatals i nacionals, també cal tenir en

compte la importància que prenen els projectes que volen atorgar més poder de decisió als ens locals i regionals i que volen donar més èmfasi a les polítiques locals de desenvolupament rural, com és el cas dels projectes LEADER.

3.2. *Planificació transversal sobre el paisatge: orientacions europees*

A títol d'exemple, i sense pretendre ser exhaustiu, s'esmenten algunes de les orientacions europees dels darrers anys i de diversa índole que van en la direcció de considerar la importància del planejament territorial en la protecció del paisatge.

- a) Estratègia Territorial Europea (Postdam, 1999, Comitè de Ministres)

Alguns elements destacats d'aquest document aposten decididament per una nova relació camp/ciutat que consideri la necessitat de fixar la població rural a partir de la igualtat d'accés a infraestructures i coneixement. Igualment, es remarca com a eixos d'aquesta estratègia el desenvolupament sostenible, la gestió racional del territori i la protecció de la natura i del patrimoni natural.

- b) Conveni Europeu sobre Paisatge (Florència, 20/10/2000, Comitè de Ministres)

La definició de *paisatge* que trobem en aquest document equipara els aspectes naturals i culturals del paisatge basats en la relació històrica societat/medi. El Conveni proposa com a fites

la identificació dels paisatges característics, la difusió dels seus valors, i la definició d'objectius de gestió que tendeixen a la planificació i la protecció dels valors que conté el paisatge.

c) Directiva 2001/42/CE sobre avaluació ambiental
estratègica

Aquesta directiva reconeix les limitacions del sistema vigent fins al moment de valorar els efectes de les intervencions en el medi per la via dels estudis d'impacte ambiental, que tenen un caràcter reactiu. L'avaluació ambiental estratègica aniria dirigida a prendre en consideració tot el marc mediambiental abans de promoure determinats plans i programes en sectors clau com els de l'energia i la indústria, entre altres, i també l'ordenació del territori (Departament de Medi Ambient de la Generalitat i CADS, 2002).

d) Principis directors del desenvolupament territorial
sostenible (REC 30/1/2002, Comitè de Ministres)

En aquest document de bases, trobem reflectits principis considerats fonamentals que fan referència a aconseguir la cohesió territorial basada en el desenvolupament socioeconòmic equilibrat, al costat de la protecció dels recursos naturals i culturals.

3.3. *Planificació transversal sobre el paisatge: darreres
iniciatives a Catalunya*

Les inquietuds sobre la relació entre protecció del paisatge i planificació territorial han estat creixents en els darrers temps

al nostre país. Mostrant les tendències actuals en aquest camp a Catalunya, pretenem constatar que el moviment de l'urbanisme que comença a prendre en consideració la importància de reconèixer les funcions del que s'ha anomenat tradicionalment, des de la visió urbana, *espais lliures*, hauria de ser coincident amb la reclamació que estem defensant de donar més rellevància social, econòmica i legal a les actuacions necessàries per a la protecció dels paisatges de base forestal.

Així doncs, un moviment que reconeix que el sòl no urbanitzable és molt més que la reserva dels futurs creixements urbans ha d'obrir les seves perspectives a les recomanacions dels que coneixem la dinàmica dels ecosistemes forestals i els riscos que amenacen la pervivència dels valors que tota la societat està entestada a defensar. Per propiciar aquesta concordança, relacionarem breument les manifestacions més importants d'aquesta tendència.

L'aprovació de la Llei d'urbanisme ha estat una de les fites importants de la reforma del nostre ordenament jurídic i, entre els seus principis bàsics, figuren el desenvolupament sostenible com a orientació rectora de la llei que ha de regular el consum d'un bé no renovable com és el sòl, i la protecció dels espais lliures en el marc de la consideració de les funcions ambientals i territorials que desenvolupen aquests espais. De tota manera, ni la llei ni el primer reglament que l'ha de desenvolupar sembla que resolen clarament com les consideracions ambientals globals poden influir en les decisions urbanístiques per la via de l'informe mediambiental, sense aclarir-ne l'abast i el pes específic respecte dels plans urbanístics de què ha d'informar.

L'aplicació a Catalunya de la Convenció sobre Paisatge que va ratificar al seu dia el Parlament (Resolució 364/VI del Parlament de Catalunya) ha tingut dues visions. L'oposició, que proposava una llei específica que va ser rebutjada al Parlament, i el Govern, que ha decidit aplicar els seus princi-

pis des d'altres normatives i incidint en les polítiques concretes. Per concretar aquestes orientacions en el planejament territorial supramunicipal que es troba en l'elaboració i l'aplicació del Conveni Europeu sobre Paisatge a Catalunya, el Govern ha creat un grup d'experts al qual s'ha cridat els investigadors que treballen en projectes de planificació del paisatge.

El grup de treball, que tot just ha iniciat la seva feina, ha manifestat el seu desig de discutir la terminologia sobre el paisatge, de posar damunt la taula les metodologies per introduir la diagnosi, la gestió i la protecció del paisatge en el planejament territorial, així com la protecció del paisatge en els instruments jurídics i d'ordenació.

Tots aquests fets coincideixen en un moment en què el Govern està treballant en la redacció dels plans territorials parcials pendents i en què l'interès dels professionals de diversos camps com el conservacionisme, el naturalisme, la geografia i l'urbanisme es manifesta en la gran assistència a jornades i cursos, i en la creació simultània de diversos ens com, per exemple, observatoris de paisatge.

4. REFLEXIONS SOBRE ALTRES MODELS DE PLANIFICACIÓ I GESTIÓ TERRITORIAL SOSTENIBLE

Un cop hem centrat la situació dels moviments que pretenen associar a casa nostra la planificació territorial, d'una banda, i la gestió i la protecció del paisatge, de l'altra, pot ser el moment de donar una breu ullada a altres experiències de fora i de casa que s'esforcen a integrar el desenvolupament sostenible en el planejament. Els models considerats són l'*ecosystem management*, desenvolupat des dels anys noranta als Estats Units, les Agendes 21 de casa nostra i els contractes territorials d'explotació francesos.

La gestió d'ecosistemes (*ecosystem management*) està resultant el model de planificació territorial concertada més adoptat per intentar conciliar els beneficis de les activitats econòmiques i la persistència dels valors ambientals singulars associats amb el territori. Hi ha alguns aspectes que val la pena remarcar, com són:

a) El mateix punt de partida que considera clau la implicació dels propietaris.

b) La importància dels aspectes socioeconòmics amb la valoració de pèrdues i guanys de les diferents opcions de gestió.

c) L'anàlisi de diferents escenaris alternatius basats en el coneixement i la modelització de les dinàmiques dels ecosistemes amb el suport dels sistemes d'informació geogràfica.

d) La implicació de les institucions a diferents escales, amb un increment constant d'agències governamentals que adopten el mètode de la gestió d'ecosistemes.

Cal considerar aquest model en el seu context, on la mateixa dimensió (grans extensions poc antropitzades), la història de l'ocupació i la peculiar relació entre els actors privats i les administracions són molt diferents de les que es donen a la vella Europa. Així, en un territori molt més esquarterat, amb densitats d'ocupació molt més altes i amb una història mil·lenària de vinculació a la terra (com Catalunya), han estat les ciutats les que han pres la iniciativa de la planificació territorial per a la sostenibilitat, adaptant els mètodes útils per analitzar els ecosistemes al metabolisme de la urbs. Encotillada en els límits del municipi, l'ecoauditoria en què es basa l'Agenda 21 Local troba dificultats per tractar els problemes ambientals que tenen dimensions supra-municipals en un territori on els fluxos de recursos, de persones, de mercaderies, de residus, etc., són determinats per unes activitats que es mouen en xarxes de molt diverses dimen-

sions. Demés, la iniciativa dels ajuntaments agrupats en la xarxa de pobles per a la sostenibilitat ha assolit una empena notable en la millora ambiental dels serveis i de les actuacions que depenen de la mateixa institució, però en canvi no ha reeixit en l'intent de comprometre els actors privats implicats en la transformació de les pràctiques econòmiques que afecten especialment els espais no urbanitzables (Cerdan, 2002).

A França —on es troba molt més arrelada la concepció social de l'estat protector—, és l'Administració estatal qui incentiva les administracions locals i els actors privats, establint les regles del joc mitjançant un contracte marc. Així, el contracte territorial d'explotacions col·lectiu fa la diagnosi de la problemàtica ambiental d'un territori per tal de subvencionar els compromisos de millora d'aquells actors locals que accepten les regles del joc; d'aquesta manera, doncs, veuen recompensada econòmicament la seva contribució a la preservació del paisatge i a la protecció del patrimoni natural col·lectiu (Cerdan, 2003a).

5. EXPERIÈNCIES DE PLANEJAMENT TERRITORIAL AL BAGES

Després de les experiències de planejament sostenible descrites, i amb la clara intenció de mostrar que les metodologies de treball que relacionen els plans de prevenció, la diagnosi per a la protecció del paisatge i el planejament territorial han estat provades, relatarem breument les experiències de planejament desenvolupades al Bages en els darrers anys.

5.1. *Pla Comarcal de Prevenció d'Incendis Forestals*

Els incendis de 1998 van estimular la creació d'un grup format per geògrafs de la UAB que vam disposar del finançament atorgat pel premi de la Fundació Caixa Manresa de 1998 (Cerdan *et al.*, 1999). Precedit per un detallat estudi de les explotacions forestals del Bages i de l'evolució del sistema de lluita contra els incendis de Catalunya, el treball es va fonamentar en dos pilars: la detallada anàlisi de les condicions del territori en relació amb els incendis i la participació social dels actors implicats per donar validesa a les propostes. Quant a l'estructura metodològica, el Pla va començar per estudiar la localització de les ignicions i les causes directes, es va analitzar la diferenciació territorial del risc, l'accessibilitat de les masses forestals per valorar la dificultat de l'extinció, la capacitat de detecció amb la vigilància fixa i la distribució dels recursos de lluita. La utilització dels sistemes d'informació geogràfica, després de la producció prèvia de bona part de les bases cartogràfiques, i dels programes de simulació del comportament del foc va ser la peça angular d'un mètode que es proposa definir la prevenció com un vestit a mida per a cada territori. Quant a les propostes, totes es van orientar a la internalització de les externalitats per convertir la inversió en prevenció en un recurs per a la dinamització de les economies rurals. Sens dubte, la proposta més reeixida va ser la signatura d'un conveni amb la companyia elèctrica per al manteniment dels combustibles i la millora de les línies elèctriques, que ha servit per reduir dràsticament els focs ocasionats per aquesta causa, que havia arribat a representar el 14% de les causes d'ignició. La proposta de línies de defensa, ja comentada, tan sols s'ha realitzat en un mínim percentatge. I les millores organitzatives del sistema de lluita que s'han adoptat també han mostrat resultats molt positius quant a la coordinació.

5.2. Plans d'autoprotecció d'urbanitzacions

Seguint les prioritats marcades en el Pla de Prevenció, el Consell Comarcal del Bages ha impulsat la redacció de plans d'autoprotecció d'urbanitzacions (Can Servitge, al municipi de Rajadell) i de perímetres de protecció (Canet de Fals, a Fonollosa; la Quintana, a Talamanca; Coll Cabiró, a Monistrol de Montserrat, i la citada Can Servitge).

El disseny dels perímetres de protecció s'ha realitzat amb el suport de tècnics del GRAF, que han efectuat exercicis de simulació de la propagació per valorar les condicions de l'incendi que suposarien una major amenaça, i en funció d'aquest estudi, segons les condicions orogràfiques i la densitat de les masses forestals, es defineix la posició i l'amplada del perímetre. En molts casos, es dissenya un perímetre d'amplada variable que pot arribar fins als 100 m i que, com en el cas de Canet de Fals, s'aconsegueix amb una crema controlada des dels 25 m estassats amb tècniques mecàniques fins a l'amplada total.

Les subvencions atorgades pel Departament de Medi Ambient cobreixen aproximadament una cinquena part del cost de l'actuació, i aquestes subvencions no es concedeixen quan el perímetre proposat trepitja sòl legalment qualificat d'urbanitzable, com ha passat en el cas de la urbanització de la Quintana. Aquest és un dels aspectes confosos en la interpretació de l'actual marc legislatiu. L'aprovació d'una llei per si mateixa que consolida el Decret existent des de 1995, tot i ser condició necessària, no és la garantia de la solució del problema. Molts ajuntaments que encara s'enfronten amb greus problemes urbanístics i de serveis no tenen recursos tècnics ni econòmics per abordar aquest problema com a únics responsables.

A partir d'aquesta experiència, fem aquestes consideracions:

a) Les administracions locals supramunicipals, tal com estableix la Llei, poden donar suport tècnic per realitzar els plans d'autoprotecció i el disseny dels perímetres amb més recursos que molts municipis.

b) Cal revisar l'apartat de la Llei que fixa l'amplada en 25 m per donar marge fins a les amplades que l'estudi corresponent consideri suficients. I cal obrir l'exigència de l'autodefensa per a nuclis urbans que també estiguin amenaçats pels incendis forestals.

c) S'haurien de revisar els criteris d'atorgament de subvencions (quantitativament insuficients) que deixen fora perímetres que s'han d'emplaçar en sòl urbanitzable.

d) La normativa urbanística que reguli els patrons constructius de les urbanitzacions hauria de facilitar la seguretat dels habitatges i les persones.

5.3. *Inventari de camins*

La Llei d'accés motoritzat al medi natural de 1995 va establir l'obligació compartida entre ajuntaments i consells comarcals de realitzar un inventari de camins. La manca de recursos i la indefinició metodològica han ajornat la realització d'aquesta obligació durant molt temps. Un conveni signat entre l'Institut Cartogràfic de Catalunya i el Consell Comarcal del Bages ha permès suplir la deficiència metodològica, proporcionant les especificacions tècniques que serveixen com a model per a tots els consells comarcals i la base per als requeriments que ha posat el Departament de Medi Ambient per a una subvenció encara molt insuficient per realitzar el treball.¹

1. La direcció metodològica d'aquest projecte la realitza l'autor d'aquest treball des del Consell Comarcal del Bages.

El mètode dissenyat permet capturar, amb sensors i equips informàtics portàtils, la geometria dels camins i les dades en forma d'elements puntuals i lineals, que omplen una base de dades que permetrà diverses explotacions de la informació generada. D'una banda, es compleixen les determinacions de la Llei i del Decret 166/98 que la desenvolupa; de l'altra, es recopila informació per a la millora i el manteniment dels camins (drenatges, estat del ferm, talussos i terraplens...), però també es disposa d'informació útil per a l'emergència en cas d'incendi (amplades, giradors, limitacions de pas...). Amb tota la informació generada i des del treball de gabinet, es determina la funció de cada camí per jerarquitzar la xarxa segons la seva funció territorial. Aquesta feina permet identificar pistes estratègiques en la defensa contra incendis, com han estat la carretera BV-1221, de Navarcles al coll d'Estenalles, i la B-124, de Monistrol de Calders a Sant Llorenç Savall, que han estat estratègiques en l'incendi d'enguany. Tot seguit, i en coordinació amb el Pla de Prevenció Comarcal d'Incendis, s'hauria de determinar el pla de millora d'aquesta xarxa viària.

5.4. *Pla de Protecció del Medi Natural i del Paisatge*

Impulsat per un conveni entre el Consell Comarcal del Bages i tots els ajuntaments de la comarca, el 1997 es va iniciar com un estudi dels valors del medi natural, de les activitats que el poden malmetre i de la seguretat que el planejament urbanístic ofereix per a la seva protecció. Per tal d'aconseguir la informació amb suficient detall per caracteritzar el medi natural, va ser necessari produir una cartografia dels hàbitats naturals a escala 1:5.000 que ha permès el coneixement exhaustiu de tot l'espai no urbanitzat. Utilitzant les capacitats analítiques dels sistemes d'informació geogràfica, hem

treballat en dues direccions: la identificació dels paisatges més representatius amb la seva caracterització ecològica i la identificació dels espais naturals i els corredors biològics, juntament amb la zonificació del medi natural.

L'anàlisi territorial confirma com els canvis econòmics han comportat importants transformacions territorials i han creat expectatives de creixement urbà de sòl residencial i sobretot industrial, que s'han de situar tenint en compte el paper que té cada parcel·la en el conjunt del territori comarcal. Aquestes transformacions econòmiques ja han deixat la seva empremta al Bages; la pitjor ha estat la negra petjada dels incendis forestals. En els camps abandonats, hi van créixer uns boscos de pins (molt més valorats en l'àmbit de la Unió Europea que a casa nostra —sobretot la pinassa—) que no s'han treballat prou per manca de rendibilitat econòmica dels aprofitaments forestals i han donat lloc a masses contínues de bosc que han propiciat incendis de dimensions catastròfiques. Un dels resultats pràctics del Pla ha estat la delimitació d'espais en els quals encara hi ha una presència important de boscos de pinassa. El conjunt dels espais anomenats *nuclears* per la seva importància representen el 25 % del territori bagenc.²

Els agents —promotors privats, ajuntaments i comissions d'urbanisme— que prenen decisions sobre l'ocupació d'un nou espai per construir un nou barri d'habitatges, un polígon industrial o una nova zona comercial tenen en compte, entre altres factors, la demanda del mercat i la proximitat a una carretera, així com la cessió d'espais públics per a equipaments o zones verdes i altres exigències establertes per la llei.

2. La direcció tècnica d'aquest projecte és a càrrec de l'autor d'aquest treball des del Consell Comarcal del Bages, amb la realització del Laboratori d'Informació Geogràfica i Teledetecció de la Universitat Autònoma de Barcelona.

Però quan es miren aquestes propostes d'actuació des d'un àmbit superior al municipi, ens adonem que, si no es para de construir al costat de les carreteres, acabem per produir fractures que impedeixen el contacte entre tot el teixit complex d'espais agrícoles, forestals i d'ambients humits que formen l'entramat d'un territori viu.

Per evitar que les actuacions puntuals acabin produint efectes negatius irreversibles, és necessari disposar d'una radiografia del territori bagenc, interpretar els principals riscos territorials i anar fent propostes de millora per gestionar els paisatges singulars sense escanyar les expectatives raonables de creixement. El primer pas s'acaba de donar amb el document de treball del pla que s'ha presentat darrerament a tots els actors implicats, en el qual es troben les propostes d'espais d'interès natural i connectors biològics jerarquitzats segons la importància dels hàbitats que contenen i del paper que tenen en el conjunt del territori. Aquest document s'ha generat a partir del reconeixement detallat de les unitats de relleu i dels hàbitats que hi han crescut a sobre, classificats segons sistemes europeus (directiva Hàbitats i mapa Corine). S'ha mesurat la seva biodiversitat i la relació entre els diferents hàbitats, amb procediments que combinen les operacions d'anàlisi espacial pròpies dels sistemes d'informació geogràfica amb les tècniques de classificació estadística multivariant, tot plegat amb una metodologia que no tenia precedents en treballs d'aquesta magnitud a casa nostra.

Amb aquest treball, ara disposem d'un instrument molt important que s'ha posat en mans dels que prenen decisions sobre el territori. El document encara provisional s'ha lliurat als redactors del Pla Parcial Territorial de les Comarques Centrals i del Pla Director de Coordinació Urbanística del Pla de Bages, acompanyat de la proposta de línies de defensa contra grans incendis forestals elaborades en el Pla Comarcal de Prevenció. El treball, encara inacabat, aprofun-

deix en la diagnosi de les principals disfuncions territorials per proporcionar orientacions estratègiques que han de marcar les actuacions dels actors institucionals i privats, per tal d'assolir els objectius fixats en la protecció dels valors naturals i culturals identificats en els paisatges estudiats.

5.5. *La gestió forestal integrada en la planificació territorial*

Pel que hem vist en l'apartat anterior, el Pla de Prevenció d'escala supramunicipal, amb les seves infraestructures de defensa; el Pla de Camins, amb la seva determinació de pistes estratègiques i principals vies de penetració, i el Pla de Protecció del Paisatge, amb la diagnosi dels processos socioeconòmics que modelen el paisatge, són elements interrelacionats que haurien de reflectir-se en el planejament territorial, ja sigui per donar protecció formal a les seves determinacions davant del planejament urbanístic, ja sigui per incorporar al planejament la dimensió de cohesió territorial que aquests plans han de tenir, més enllà de la seva funció de dictar normes de protecció del sòl en els espais lliures.

El gran repte que han d'afrontar aquestes eines de planificació és assolir una dimensió que vagi més enllà de la determinació d'usos i activitats permesos dins de determinades àrees. Es tracta d'incorporar estratègies, objectius i propostes que incideixin en la gestió dels espais valorats per les diverses delimitacions geogràfiques del pla. En el cas que ens ocupa, i per a les comarques centrals de Catalunya, observem dues línies estratègiques fonamentals. La primera és la implicació de les administracions supramunicipals, especialment els consells comarcals, en la realització dels plans de prevenció, de camins i d'anàlisi del paisatge a què ens hem referit, i per descomptat la seva determinació en la realització de les

actuacions programades, sempre que disposin de recursos suficients, de què fins al moment no han gaudit. Les administracions locals s'enfronten, a més, amb el repte de constituir organismes supramunicipals de compensació de càrregues i beneficis per evitar la marginació econòmica que suposa adoptar l'opció ambientalment més racional, concentrar els creixements industrials i residencials en municipis on el seu impacte sigui menor. La segona línia és aconseguir la participació dels actors privats, sobretot dels titulars de les explotacions agroforestals, en activitats considerades prioritàries en els plans elaborats. Uns exemples il·lustraran gràficament de què estem parlant. Les línies de defensa necessiten manteniment, i també necessiten cultius verds per mantenir la seva efectivitat durant tota l'època de risc. Així doncs, activitats com mantenir cultius verds en zones estratègiques, la pastura extensiva per al control dels combustibles, el manteniment de camins (que no siguin de la xarxa pública) per a l'accés a les masses forestals i als punts d'aigua o el manteniment dels equipaments de lluita (sobretot els punts d'aigua) haurien de ser activitats definides en un instrument amb el caràcter dels contractes territorials d'explotació de França, que reguli el pacte entre la societat que necessita uns serveis de protecció del territori i el gestor més capacitat per fer-ho (Cerdan, 2003b).

6. CONCLUSIONS

Per tal de recopilar allò més important del discurs que s'ha anat desgranant, es formulen aquestes conclusions. La reorientació del sistema de lluita contra els incendis forestals en la direcció de millorar l'ordenació territorial passa per potenciar aquestes línies de treball:

a) La gestió silvícola s'ha d'integrar en una dimensió més àmplia de gestió del mosaic agroforestal i aquesta dimensió ha d'estar molt present en els plans d'ordenació silvícola.

b) Cal simplificar les figures de planificació relatives a la prevenció i l'emergència, potenciant els plans de prevenció comarcals, coordinats amb els inventaris de camins, per relacionar-los amb la protecció del medi natural i del paisatge i facilitar-ne la integració en els plans territorials parcials.

c) S'han de revisar les orientacions del planejament territorial parcial per integrar-hi els riscos ambientals, especialment els incendis forestals, però també les inundacions. Aquestes figures de planificació han d'assumir els condicionants que realment modelen el paisatge, com són les variables socioeconòmiques i les seves conseqüències desfermades, que són els incendis forestals. Cal incorporar als plans territorials les orientacions estratègiques que facilitin la interacció entre les administracions i els gestors privats que poden canviar el curs dels esdeveniments per fer més efectiva la protecció del territori.

d) Un nou enfocament de la lluita contra els incendis situada en aquest context de les activitats de defensa del territori i del paisatge ha de tenir molt present el desenvolupament rural en una perspectiva més àmplia que la de les activitats turístiques com a únic complement de les rendes agràries.

e) Els principals gestors del territori, que demostrin una gran capacitat de cooperació amb voluntaris i professionals en la lluita contra el foc, han de potenciar l'associacionisme per respondre col·lectivament davant dels reptes socials de defensa del territori que comporta la seva activitat.

f) Es fa imprescindible la canalització de recursos

per pagar les funcions ambientals que desenvolupen i que haurien d'incrementar els que millor coneixen el territori, però cal implantar nous mecanismes, diferents dels actuals basats en la subvenció individual al propietari, per garantir els nivells de renda, i aplicar uns sistemes que visualitzin clarament les funcions ambientals que es volen impulsar, així com els contribuents beneficiats, i que determinin les activitats objecte de contracte, després d'una diagnosi territorial que concreti les opcions estratègiques adequades a cada territori.

g) Creiem que ens trobem davant d'una conjuntura excepcional i cal aprofitar les possibilitats actuals. Si no s'aconsegueix introduir en aquestes reformes la visió de la «gent del territori», s'hi haurà d'arribar més tard i potser, una vegada més, es farà des d'una perspectiva excessivament urbana.

7. PROPOSTES

7.1. *Replantejament de les funcions i escales de les diferents figures de planejament*

7.1.1. Àmbits

- Planificació de l'emergència (urbanització, municipi, comarca, INFOCAT).
- Prevenció d'incendis (àmbit comarcal).
- Planificació del paisatge (àmbit comarcal o supra-comarcal).
- Ordenació territorial integrada (àmbit supracomarcal).

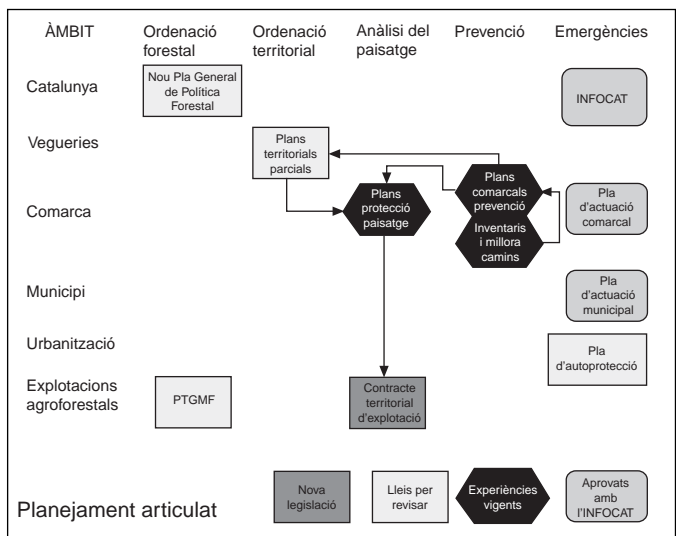


FIGURA 2. Proposta d'articulació de planejament forestal i territorial.

7.1.2. Plans d'emergències

Són redactats des dels ajuntaments amb el suport de les altres administracions i estan dedicats a aquestes funcions:

- Anàlisi del risc i de la vulnerabilitat.
- Infraestructures disponibles en el moment de l'emergència.
- Perímetres de protecció d'urbanitzacions.
- Protecció de la població.
- Inventari de recursos.
- Responsabilitats en la mobilització.
- Funcions en el desenvolupament de l'emergència.
- Coordinació dels actuants.
- Implementació.

7.1.3. Plans de prevenció d'incendis (àmbit supramunicipal)

Són redactats des d'administracions locals supramunicipals, idealment consells comarcals, per vincular el pla de prevenció a l'inventari de camins:

- Integració del mosaic agroforestal en la gestió silvícola: rompudes, cultius verds, tallades, esporgues, aclarides, pastura...
- Anàlisi de la causalitat i de la seva distribució territorial: propostes de reducció de causes directes.
- Anàlisi de la vulnerabilitat: sensibilitat de les masses forestals potencialment afectades i dels assentaments humans.
- Propostes de ruptures de continuïtat: reduccions de densitat amb cremes controlades i línies de defensa.
- Accessibilitat: xarxa de camins jerarquitzada a partir de l'inventari de camins i del pla de millora consegüent.
- Capacitat de detecció amb vigilància fixa i organització de la vigilància mòbil.
- Equipament del territori: hidrants, basses, equips per a les ADF.

7.1.4. Anàlisi i gestió del paisatge

- Identificació de les unitats de paisatge a partir de la cartografia d'hàbitats i de les unitats de relleu consistents.
- Identificació d'àrees d'interès i zonificació del medi natural.
- Diagnosi d'amenaques i oportunitats en la gestió i la conservació dels valors identificats.
- Definició d'estratègies de gestió. Exemples aptes

per al Bages: pastura extensiva, cultius verds en línies de defensa, manteniment de camins i punts d'aigua...

— Implicació dels actors administratius, econòmics i socials.

1) Contractes territorials d'exploració per a la implicació dels actors privats en l'acompliment de les estratègies.

2) Organismes de caràcter supramunicipal per a la intervenció de la gestió pública en el repartiment de càrregues i beneficis fruit de la concentració del creixement en determinades àrees.

7.1.5. Ordenació territorial integrada

— Delimitació de zones d'interès segons l'anàlisi del paisatge.

— Infraestructures viàries i grans equipaments.

— Infraestructures territorials de prevenció d'incendis.

— Definició d'activitats i usos permesos.

— Integració d'estratègies de protecció del paisatge.

— Directrius per al planejament urbanístic.

— Planejament articulat.

125

7.2. Proposta de finançament

Les actuacions de prevenció d'incendis que s'han realitzat en els darrers anys a les nostres comarques han estat finançades per la Diputació de Barcelona des del Servei de Prevenció d'Incendis Forestals i pel Departament de Medi Ambient, que en els dos darrers anys ha obert línies d'ajut per a perímetres de defensa d'urbanitzacions, per a l'arranjament de camins i per a punts d'aigua. La realització dels plans muni-

cipals d'emergències i de prevenció és a càrrec de la Diputació, que també ha impulsat la creació d'associacions de propietaris en àrees afectades per incendis per promoure plans integrals que consideren la comercialització col·lectiva dels productes forestals, mesures de gestió silvícola, infraestructures, caça i turisme. Malgrat aquest increment de les línies d'ajut, és molt evident que els recursos esdevenen del tot insuficients, més si tenim en compte que hi ha força veus que reclamen un replantejament del sistema d'ajuts per part de la Generalitat, que actualment es concentren en un grup reduït de finques.

D'altra banda, el sector forestal fa molt temps que reclama mesures destinades a internalitzar les externalitats ambientals que genera el bosc. Si la comercialització dels productes forestals és insuficient per mantenir la gestió que ha de garantir la pervivència del recurs bosc, és no solament lògic sinó imprescindible que el conjunt dels beneficiats de l'existència dels boscos es facin càrrec dels costos del seu manteniment. Es pot objectar que els recursos públics que es canalitzen avui dia ja tenen aquesta orientació, però el sistema de subvencions actualment vigent no permet visualitzar socialment quins són els beneficis i els beneficiats que hi han de contribuir. Per això, a més de la finalitat recaptatòria de la proposta que tot seguit presento, cal tenir molt en compte que la seva intenció és precisament que els actors socials implicats coneguin exactament els contribuents i l'objecte de la seva contribució per prendre consciència del que costa mantenir el medi ambient.

7.2.1. Fons de protecció del paisatge

La creació del fons de protecció del paisatge mitjançant una llei del Parlament de Catalunya és la peça angular d'aques-

ta proposta que hauria de fer viable la realització dels plans proposats i l'execució de les actuacions que contenen. A grans trets, comentarem els contribuents del fons, les actuacions que hauria de finançar, els perceptors i el sistema d'administració.

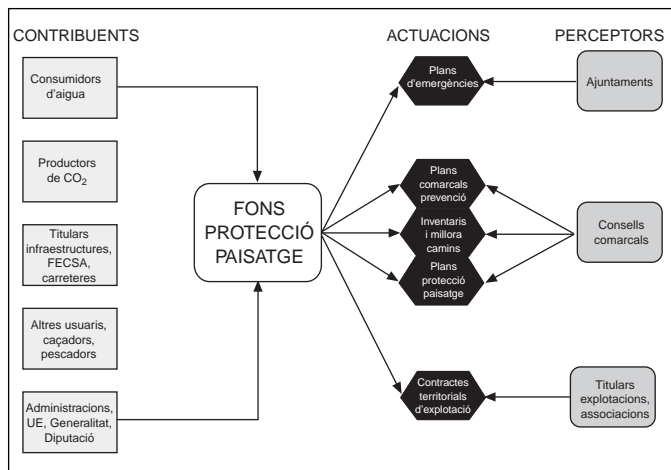


FIGURA 3. *Finançament de la proposta.*

Pel que fa als contribuents, les propostes que presentem, en major o menor mesura, es troben en experiències vigents en altres països o estan recollides en mecanismes correctors mediambientals a escala internacional:

— La important funció de regulador del cicle hidrològic que fan els boscos justifica totalment que els consumidors d'aigua paguin per la via dels cànon existents, una quantitat (a determinar amb els estudis corresponents) per la permanència del bosc, que està indissolublement associada amb la disponibilitat d'aigua. Caldrà diferenciar entre diversos tipus de contribuents, distingint per exemple, entre empreses comercialitzadores d'aigua mineral (que són uns beneficiats

directes); indústries que tenen un gran consum, encara que disposin d'instal·lacions de tractament i depuració, regants i consumidors urbans.

— Els productors de CO₂ també es beneficien de l'existència del bosc en la mesura que la seva existència garanteix l'absorció de bona part del contaminant que es genera. El protocol de Kyoto ha formalitzat l'existència del mercat de CO₂ i ha fixat un rang de preus, i atès que l'Estat espanyol supera en un 33% (Gràcia, 2003) l'increment d'emissions que estableix el protocol citat, es fa molt evident que tenim molts pecats ambientals per perdonar i és just que es pagui la penitència corresponent.

— El territori forestal és el suport de moltes infraestructures que el travessen i que l'afecten —la qual cosa incrementa el risc d'incendi—, ja sigui procedents de les mateixes infraestructures com dels usuaris que les utilitzen. Ens referim sobretot a línies elèctriques, carreteres i ferrocarrils, però es podria ampliar a canalitzacions de diversos tipus. Si bé és cert que ja existeix una reglamentació que estableix l'obligació de mantenir les condicions dels conductors i dels combustibles que es troben immediatament sota les línies elèctriques, també és molt cert que la infraestructura pública i privada de prevenció que apaga els incendis també beneficia les empreses elèctriques que pateixen els efectes del foc en les seves infraestructures en les zones incendiades. D'altra banda, pel que fa a l'aportació de les infraestructures viàries, el Parlament català ja ha discutit darrerament alguna proposta en aquest mateix sentit amb motiu de la discussió del projecte de llei sobre paisatge.

— Els beneficis socials del bosc són cada cop més generalitzats i evidents, tot i que, no cal negar-ho, és difícil identificar contribuents pel fet que al nostre país ha existit una tradició, no clarament fonamentada en cap dret legal, d'ús públic i gratuït dels espais forestals. Hi ha, però, situa-

cions en les quals seria fàcil identificar usuaris associats com a caçadors, pescadors o excursionistes, i relativament fàcil canalitzar aportacions d'usuaris del turisme rural, molt directament beneficiats de l'existència del paisatge forestal. La controvèrsia recent sobre les ecotaxes per a turisme no pot contradir l'argument de la seva justificació i necessitat.

— Finalment, a falta d'altres contribuents directes que més endavant es podrien escatir, cal citar les administracions, que haurien de mantenir, i segurament incrementar, els seus fons actuals. En aquest sentit, cal recordar que la reorientació de la política agrària comunitària cap a aquesta direcció d'incloure la intervenció dels pagesos en la protecció del medi ambient pot aportar nous recursos, al marge dels que ja arriben per la via dels programes de desenvolupament rural.

Pel que fa a les actuacions finançables amb el fons, no cal dir que serien la redacció dels diversos plans i les actuacions dissenyades en aquests. Tot plegat al marge d'altres destinacions futures de protecció del medi natural i del paisatge que el legislador pogués determinar.

Quant als perceptors, haurien de ser-ho les administracions locals, les quals actualment és evident que no disposen de recursos per a aquesta finalitat, i els altres destinataris haurien de ser els gestors del territori. La futura llei hauria d'especificar els mecanismes concrets d'aquesta percepció. A diferència dels sistemes actuals de subvencions universals, que, a tot estirar, poden distingir beneficiaris per les seves localitzacions singulars (espais PEIN) o pel seu esforç de planificació (existència del Pla Tècnic de Gestió i Millora de Finques Forestals), els perceptors haurien de signar (preferentment de manera col·lectiva) un contracte territorial d'explotació amb actuacions concordants amb les orientacions estratègiques fixades en el Pla de Prevenció i en la diagnosi del paisatge de la seva zona, posteriorment recollides en el Pla Territorial Par-

cial corresponent. Mentre s'implanten els mecanismes de recaptació i de planificació, la llei podria disposar, de manera transitòria, la signatura de contractes per a algunes actuacions que actualment ja resulten òbvies, com aquelles citades en els exemples del Pla de Prevenció del Bages.

Pel que fa a la gestió dels fons, es fa inevitable comptar amb la participació dels sectors implicats, sigui com a contribuents o com a beneficiaris, per descomptat, sota la tutela de l'Administració.

7.3. *Propostes legislatives*

Així doncs, simplement a tall de resum del que s'ha exposat, aquestes serien les propostes de tipus legislatiu; com hom pot suposar, algunes són poc transcendents i altres resultarien més laborioses.

— Reforma de la llei forestal:

1) Adequar els plans de prevenció i d'emergències a les escales apropiades.

2) Compatibilitzar plans tècnics de gestió amb contractes territorials d'explotació (en aquest sentit, caldria seguir la discussió que faci d'aquestes qüestions el nou Pla General de Política Forestal).

— Reforma llei del Pla Territorial General de Catalunya.

1) Incorporar els plans de protecció del paisatge com a element del Pla Territorial Parcial amb la diagnòsosi d'amenaques i oportunitats i les estratègies de gestió.

2) Incorporar els plans de prevenció (tallafocs) com a infraestructures bàsiques de protecció.

— Redacció de la Llei dels contractes territorials d'explotació i del fons de protecció del paisatge.

7.4. *Propostes d'execució del planejament*

— Accelerar la redacció dels inventaris de camins i dels plans de millora de camins.

— Desenvolupar la redacció de plans comarcals de prevenció.

— Desenvolupar la redacció de plans de protecció del medi natural i del paisatge.

— Accelerar la redacció dels plans territorials parcials amb la integració dels plans de prevenció i dels plans de protecció del paisatge.

7.5. *Creació d'un grup de treball per desenvolupar les propostes*

En la presentació pública d'aquesta proposta, es manifesten bona part dels suports que ha estat capaç de recollir, procedents dels àmbits tecnicientífics i dels agents socials implicats. Creiem que, malgrat el poc temps de preparació i les circumstàncies estivals que han envoltat la gestació de la proposta i la seva projecció, els interlocutors de l'Administració i els diversos grups polítics que haurien d'impulsar-ne la consolidació des del Parlament i des del Govern també han pogut conèixer-ne el contingut i valorar-ne l'oportunitat.

És, però, un document inicial que requereix un primer desplegament abans d'arribar a les instàncies que el poden convertir en els instruments efectius en els quals la proposta es vol transformar. Aquesta feina es pot fer encara des del món acadèmic a través d'un grup de treball interdisciplinari emparat en l'àmbit universitari, on la recerca està demostrant que pot intervenir amb èxit en aquesta direcció. Seria imprescindible la participació dins el grup de treball de representants designats pels departaments d'Inte-

rior, Medi Ambient i Política Territorial, i una selecció d'actors tecnicocientífics i socials que permetés compaginar agilitat i participació social de manera que no s'eternitzessin els treballs. El suport formal i econòmic del Govern seria imprescindible.

I el que subscriu, que es considera un pur intèrpret a qui les circumstàncies han posat en situació d'assajar els instruments proposats, d'escoltar i sintetitzar les necessitats sentides per tots els protagonistes d'aquesta lluita social, es creu amb el suport necessari per intentar portar la proposta al punt en el qual els representats legítims de la societat l'haurien de materialitzar.

BIBLIOGRAFIA

132

- CASTELLNOU, M.; RODRÍGUEZ, L.; MIRALLES, M. (2004). «Replantant-se el futur de la prevenció i extinció d'incendis forestals». A: *Incendis forestals, dimensió socioambiental, gestió del risc i ecologia del foc*. Solsona: Xarxa ALINFO, p. 44-49.
- CERDAN, R. (2002). «Les responsabilitats asimètriques i els problemes de la sensibilització i la participació social en la planificació per la sostenibilitat». *De Río a Johannesburg: Les Agendes 21*. Sabadell: Sabadell Universitat, p. 2-12.
- (2003a). *Planificació territorial i dimensió socioambiental: Una lectura geogràfica dels incendis forestals al Bages*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- (2003b). *Planejament forestal, planejament territorial i desenvolupament rural: una visió des del Bages*. V Fòrum Internacional de Política Forestal. 2003, Solsona.
- CERDAN, R. [et al.] (1999). *Planificació territorial i organització de la lluita contra els incendis forestals al Bages*. Premi Fundació Caixa Manresa.

- CONSELL ASSESSOR PER AL DESENVOLUPAMENT SOSTENIBLE (2002). *Els reptes de l'aplicació de la Directiva sobre avaluació ambiental estratègica*. Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient. (Documents; 8)
- CPF (2003). *Memòria d'activitats del Centre de la Propietat Forestal*. Santa Perpètua de Mogoda: Centre de la Propietat Forestal.
- GRÀCIA, C. (2003). «Hay que planificar el territorio pensando que probablemente se va a quemar». *El País* [Barcelona], (21 d'agost), p. 3.
- ICV (2003). *Reflexions després dels greus incendis de principis d'agost a Catalunya*. Iniciativa per Catalunya-Verds.
- PIÑOL, J. (2003). «Acumulació de combustible i la paradoxa de l'extinció». A: *Incendis forestals, dimensió socioambiental, gestió del risc i ecologia del foc*. Solsona: Xarxa ALINFO, p. 39-43.
- PLANA, E. [et al.] (2001). «Análisis de la problemática de los incendios forestales de gran dimensión: un enfoque integral.» *Montes para la sociedad del nuevo milenio: III Congreso Forestal Nacional, 2001*, p. 846-851. Vol. 5.



AMICS DE L'ART ROMÀNIC

EL FOC I LA LLUM

A LA VIDA DIÀRIA I ARTÍSTICA

DEL ROMÀNIC CATALÀ

(SEGLES X-XIII),

A CÀRREC DE

JOAN-F. CABESTANY I FORT,

DE L'INSTITUT

D'ESTUDIS CATALANS

El foc és l'element més notable de la història social i econòmica medieval, al marge de la seva simbologia artística.

Les manifestacions artístiques que apareixen en el període romànic (segles X-XIII) presenten repertoris iconogràfics essencialment simbòlics. Dins d'aquesta simbologia, un dels elements representats és el del foc, el qual trobem figurat de diferents maneres, des de la simple manifestació física del foc fins a expressions que adquireixen sovint un determinat context simbòlic.

La nostra contribució en aquestes jornades es basarà en l'exposició d'aquells elements de foc i de llum que hem constatat en l'observació en les diferents manifestacions artístiques (pintura, escultura, arts de l'objecte) del període medieval català. No hem d'oblidar que aquestes representacions gràfiques responen a una realitat que podem documentar en els diferents oficis i comerç de l'època.

Així doncs, un dels nostres objectius en aquestes jornades serà també aproximar l'art romànic català a les altres disciplines.

1. VIDA I ART A LA CATALUNYA ROMÀNICA

A la Catalunya romànica hi havia dos grups socials molt ben estructurats: el laic i l'eclesiàstic, agrupats entorn de dues autoritats: els comtes i els bisbes. Cada un d'aquests grups socials estava dividit en diferents estaments. Aquesta organització social i econòmica medieval tenia el seu origen en la intervenció política dels monarques carolingis, que aportaren els fonaments legals del feudalisme que va desenvolupar-se en els comtats catalans —Catalunya Vella— a partir de l'inici del segle IX. Ara bé, el triomf total del sistema feudal i romànic no va tenir lloc fins a la segona meitat del segle X, moment en què es va començar una gran activitat tant a l'e-

dificació civil o militar com a la religiosa, que es complementava amb una decoració que va utilitzar tant l'escultura com la pintura o les arts decoratives. Aquest desenvolupament artístic va tenir el seu punt culminant en el pas del segle XI al XII i va perdurar fins als començaments de la cultura gòtica a mitjan segle XIII.

Per dissort, d'aquests dos mons que conviuen en l'època romànica se'n conserva un gran patrimoni artístic de tipus eclesiàstic, no així del grup social laic. Del patrimoni clerical en resten esglésies amb més o menys restauracions però, per contra, molts pocs castells, cases o masos que ens puguin apropar a la realitat de la seva arquitectura i decoració. La majoria d'aquestes edificacions militars i civils solament es poden documentar o per les excavacions arqueològiques o pel text dels inventaris del contingut dels seus patrimonis mobles, dels quals en conservem pocs d'època romànica.

Podem utilitzar l'escultura i la pintura religiosa no solament des d'un punt de vista de pensament religiós, sinó com a informació gràfica que ens permet documentar i explicar millor un objecte que el relat d'un text literari o notarial.

Per exemple, el martiri de santa Julita i el seu fill sant Quirze¹ pintat en un frontal procedent de sant Quirze de Durro² ens descriu no solament el martiri d'aquests dos sants, sinó detalls propis de la vida en l'època medieval. Una

1. Santiago de la VORÁGINE (1989), «San Quirce y su madre santa Julita», cap. LXXXIII, a *La leyenda dorada*, vol. 1, Barcelona, Alianza Forma, p. 330-331: «Acto seguido el prefecto Alejandro mandó que desollaran viva a su madre y que una vez desollada la metieran en una caldera llena de pez herviendo.»

2. «Sant Quirc de Durro» (1996), a *Catalunya romànica*, vol. XVI, *La Ribagorça*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 206. Al compartiment inferior esquerre, els màrtirs Julita i Quirze dintre de l'olla amb la pega, aquesta penjada.

de les escenes és el martiri de santa Julita dintre d'una caldera amb pega. Aquesta escena de martiri ens presenta un conjunt d'instruments i elements propis d'una llar de foc que ens permet conèixer millor com era aquest instrumental que una descripció escrita. El martiri de sant Llorenç³ amb l'escenografia de la graella és un altre exemple que ens permet pensar que el pintor que tenia unes nocions, potser de tradició oral i fins i tot amb alguna sinòpia de les escenes del santoral, o simplement era assessorat per eclesiàstics fossin o no els comitents, copiava els objectes d'ús diari del seu entorn, com en aquest cas una graella. L'artista medieval, generalment, en crear una obra pintura o escultura no ho feia amb la intenció de fer un calc arqueològic, no intentava apropar-se a la realitat del món romà, sinó que s'inspirava en el dia a dia de la seva època, que està representat amb naturalisme i fidelitat, com és el cas del vestit dels dos botxins o el conjunt dels ferros de la llar de foc, amb una tipologia que era una realitat fins als nostres dies. Aquesta valoració realista ens permet, moltes vegades, mancats com estem dels detalls més corrents dels objectes d'ús diari, poder conèixer en aquest cas com era la ferramenta de la llar de foc. Aquesta doble funcionalitat o utilització de les obres d'art és la que hem valorat com una de les aportacions de la cultura romànica amb relació al coneixement de la vida diària de la seva època i, més concretament, en aquest cas, de la llar de foc.

Utilitzarem una segona font d'informació, aquesta documental, com és *Vocabulario del comercio medieval*,⁴ en el qual Miguel Gual Camarena va fer un estudi exhaustiu dels aranzels de les duanes (lleudes) dels regnes de la Corona d'A-

3. «Sant Llorenç Dosmunts» (1986), a *Catalunya romànica*, vol. III, *Ausona. II*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 468.

4. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario del comercio medieval: Colección de aranceles aduaneros de la Corona de Aragón (siglos XIII y XIV)*, Barcelona, Ediciones El Albir.

ragó, en els quals figuren molts dels productes relacionats amb el foc durant l'alta i la baixa edat mitjana. Aquests els relacionarem amb els objectes que il·lustren les obres d'art.

Al llarg d'aquest parlament, utilitzarem l'escultura i la pintura romàniques o els objectes conservats, la majoria de tipus religiós, com a fonts d'informació per a l'estudi del foc. Aquesta doble funcionalitat i utilització de les obres d'art o dels objectes conservats és considerada com una de les possibles aportacions de la cultura romànica relacionada amb el coneixement de la història del foc en el període altmedieval a Catalunya, tot i que la majoria d'aquests exemples són, també, vàlids arreu de l'Europa occidental.

2. EL SOL: LA NATURALESA I LA RELIGIOSITAT

El món de la naturalesa, sigui animal o vegetal, té com a centre de la seva vida i motor del seu desenvolupament la projecció del Sol sobre la Terra: sense la seva acció de calor i de llum no seria possible la vida en el nostre planeta. Ara bé, aquesta realitat del Sol com a font de calor i llum queda vinculada a la seva relació amb els moviments de rotació i translació de la Terra, la qual cosa implica, en el primer cas, l'existència dels dies i les nits, i en el segon, l'existència de les quatre estacions anuals. El primer cas és general a tota la Terra amb una major o menor duració del dia i de la nit; per contra, el segon té una gran importància a les latituds pròpies de la Mediterrània per la seva incidència a la climatologia. Aquesta realitat climàtica determina les quatre estacions, que queden perfectament encerclades pels equinoccis i la celebració litúrgica romana de les tèmpestes. Aquest pas d'una altra estació ha quedat molt ben explicat i representat en diferents obres artístiques.

La problemàtica generada pels canvis de temperatura

i de llum ha estat solucionada per la mateixa naturalesa de diverses maneres, com per exemple amb l'emigració de les aus o la hibernació d'animals i plantes. Ara bé, l'home, com a ésser viu de tipus animal, que viu a zones de la Terra amb canvis climàtics i de llum importants, no té la possibilitat de defensar-se d'aquests canvis de tipus cíclic, siguin diaris o anuals, com ho fan els animals o les plantes; la defensa de l'home contra aquests canvis ha estat possible creant o organitzant un «Sol» artificial, el qual aportí calor i llum en els moments mancaça pels produïts pel Sol. Aquesta font d'energia supletòria és el foc. Aquesta realitat de la seva existència s'ha documentat pels estudis arqueològics i documentals, a partir de la prehistòria, amb diferents sistemes de producció i utilització segons els moments culturals viscuts per l'home al llarg de la seva mil·lenària existència.

Les diferències determinades per la climatologia han quedat molt ben representades i explicades en diverses obres artístiques, les quals ens permeten considerar el valor que li donaren els seus contemporanis; citarem, solament, com a exemple molt conegut les escultures que es troben a la malmesa portalada romànica del monestir de Santa Maria de Ripoll,⁵ en la qual, en dotze medallons, es representen sengles mesos de l'any, uns pocs en bon estat de conservació. Tenen, emperò, una gran importància documental. La temàtica que predomina a aquestes escenes són, quasi exclusivament, tasques de tipis agrícoles; hem de considerar, emperò, que aquestes no eren les úniques en el romànic, però sí les més importants i destacades. No vol dir això que no es representi alguna escena de treball de menestrals; una de les poques que existeixen i, a més, en bon estat de conservació és la fabricació de les bótes, representació del mes d'agost, moment en el

5. «Santa Maria de Ripoll» (1987), a *Catalunya romànica*, vol. x, *El Ripollès*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 234-258.

temps anual en què es feia aquesta tasca de preparació dels estris necessaris per afrontar el resultat de la tasca de processament de la producció generada per la pròxima verema. Una temàtica de representació dels mesos de l'any la trobem brodada en el tapís de la Creació, conservat a la Catedral de Girona,⁶ en el qual es conserven les escenes de les estacions i els primers mesos de l'any; els mesos restants estaven brodats a la part malmesa del tapís. El Sol és la figuració protagonista en el tapís.⁷

La importància del Sol queda reflectida en el pensament religiós de l'antiguitat i del mateix cristianisme medieval. N'és un exemple l'escena de la crucifixió del Sagramentari del monestir de Sant Cugat del Vallès, en la qual figuren, de manera destacada, les representacions del Sol i de la Lluna presidint l'escena de la crucifixió segons el pensament evangèlic.⁸

3. EL FOC: UN DELS QUATRE ELEMENTS DEL PENSAMENT CLÀSSIC

No entrarem en la polèmica de quin dels quatre elements fou el més important o significatiu en la vida de l'home medieval. Tots quatre van tenir el seu camp d'actuació a l'alta edat mitjana; per tant, no és la nostra intenció fer una valoració de la major o menor importància de cada un d'ells, moltes vegades

6. Pere de PALOL (1986), *El tapís de la Creació de la Catedral de Girona*, Barcelona, Proa, col·l. «Artstudi: Quaderns d'estudis medievals», núm. 2, p. 76, fig. 62, suplement.

7. Pere de PALOL (1986), *El tapís...*, 1986, p. 60, fig. 46.

8. Mateu 27, 45; Marc 15, 33; Lluc 23, 44. Aquest fet figura com a profètic a l'Antic Testament (Amos 8, 9): «Aquell dia, diu el Senyor Jahvè, faré que el sol es pongui a migdia i en ple dia hi haurà tenebres sobre la Terra.»

condicionada als diferents graus de l'actuació de l'home dintre del marc propi del seu grup ètnic o social. Ara bé, en línies generals d'occident a orient de l'Europa occidental cristiana, existien condicionants tant científics com tecnològics semblants i, en conseqüència, aquesta valoració és semblant i la seva representació a les obres d'art té els mateixos paràmetres de representació.

Pot ser que, pels seus molts aspectes tant de necessitat natural com la generada pel mateix home, l'element més valorat fos, segurament, l'aigua, la qual assegura la continuïtat de la vida a la Terra. L'aigua a l'Occident europeu va adquirir una gran importància econòmica i social en ésser utilitzada com a eina de treball, en substitució de la força de la sang sigui humana o animal, mitjançant la construcció de molins hidràulics, fet que li va donar una destacada possibilitat de treball a l'home medieval a partir del segle X, en què va generalitzar-se la seva construcció i utilització.⁹

El vent va adquirir cada vegada més importància, especialment a partir del moment en què la navegació comercial va fer-se a vela, i desplaçà el rem. La força de l'home no serà, a partir d'aquest moment, l'element essencial per a la navegació. La utilització conjunta del rem i la vela va quedar vinculada a un tipus molt concret d'embarcació que tenia quasi una única dedicació, la militar, com era la galera, navili capdavanter en qualsevol estol.¹⁰ A partir del segle XII,

9. Joan-Ferran CABESTANY (1975), *Textos comentados de época medieval (siglos V al XII)*, Barcelona, Teide, p. 534-539. Concessió de dos feus, un castell i dos «monades» d'aigua, concretament a la pàgina 537: «[1162] Damos a ti, Guillem de Pia y a toda tu descendencia, dos monades de agua [...] a fin de mover con ella dos molinos, que puedes construir en el sitio que creas más oportuna.»

10. Jaume el Conqueridor (1982), *Crònica o Llibre dels Feits*, Barcelona, Edicions 62 i La Caixa, col·l. «Les Millors Obres de la Literatura Catalana», núm. 86, p. 96 i 97. «Ordonam l'estol en qual mane-

mercadors i comerciants navegaren quasi exclusivament a vela, sistema que no era ni més ràpid ni més lent que l'utilitzat per la galera, però amb una millora important com era un casc tancat i un nombre reduït tripulants, el qual reportava un estalvi no solament en el menjar, sinó també en la despesa del sou de la tripulació.¹¹

Per acabar, la Terra potser l'hem de pensar com a centre de la vida tant social com econòmic i cultural. Si fem un repàs de la informació que ens aporten tant les fonts documentals escrites com gràfiques, l'home de l'època altmedieval era, socialment, un senyor de terres, laic o eclesiàstic, o un camperol. Existien uns pocs menestrals, moltes vegades més agricultors que artesans, al servei dels senyors territorials, la majoria amb una personalitat social de servidor o serf del senyor establerts i vinculats a castells o monestirs. Uns altres, potser amb un estatus més lliure, però també artesans i a la vegada camperols, treballaven a les sagreres generades per les parròquies i tenien com a finalitat proporcionar les seves habilitats de treball com a ferrer o fuster als camperols del terme parroquial. Moltes d'aquestes primitives sagreres en els seus orígens tenien un nombre reduït de pobladors, però l'augment demogràfic les va beneficiar, i a partir del segle XII van generar nous nuclis de població que es convertiren en les viles baixmedievals. Aquest desenvolupament fou una realitat sempre que les possibilitats de rendiment econòmic dels

ra iria: primerament que la nau d'en Bovet en que anava en Guillem de Montcada que guiàs [...] e mogueu lo dimecres mati de Salou ab l'oratge de la terra [...] feren vela, e faia-ho bell veer a aquells que romanien en terra e a nós [Jaume I], que tota la mar semblava blanca de les veles, tan era gran l'estol. E nós mogueu en la darrerria de l'estol, en la galea de Montspetller [...] e aconseguí's la nau, prop del primer son, d'en Guillem de Montcada que tenia la guia [...]

11. Arcadi GARCÍA SANZ (1977), «Els vaixells medievals catalans», a *Història de la Marina catalana*, Barcelona, Aedos, p. 43-74.

termes de les parròquies proporcionessin prou recursos per poder assolir el nombre d'habitants i el nivell de riquesa necessaris per obtenir aquesta categoria política i administrativa.

4. LA CASA MEDIEVAL: LA LLAR DE FOC

El foc serà el centre de la vida medieval. La llar de foc no és solament la materialitat del foc, sinó també el fonament d'una institució social i econòmica bàsica com és el fogatge. Aquest cens fiscal valorava la casa no pels seus habitants, sinó pel fet de tenir una llar de foc amb continuïtat, no de manera accidental o temporal com podia tenir-se el foc d'una borda o cabana utilitzada pels agricultors o ramaders en la temporada de treball per plantar i collir els camps o pasturar el ramat.

El foc és quelcom essencial en la vida social i econòmica medieval; era el centre de l'habitació principal de la casa i al seu entorn tenia lloc la vida del grup familiar que habitava aquest espai, com ho podem estimar en l'estudi arqueològic del mas o casa medieval, com és el cas del mas de Vilosiu.¹² Aquest foc central havia d'utilitzar un sistema de ferros i penjadors semblant al que està representat en el martiri de santa Julita¹³ per poder-lo aprofitar com a element bàsic per a la cocció dels aliments. En excavar una llar de foc altmedieval trobem, en el seu entorn, una crescuda quantitat de cendres i fragments de ceràmica totalment cremada, conjunt de restes que ens permeten valorar el temps

12. «Mas "A" de Vilosiu» (1985), a *Catalunya romànica*, vol. XII, *El Berguedà*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 238-241.

13. «Sant Quire de Durro» (1996), a *Catalunya romànica*, vol. XVI, *La Ribagorça*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 206.

llarg o curt en què es va utilitzar la llar de foc. A més, moltes vegades podia existir, en un espai secundari dintre del mateix casal, una segona habitació, en la qual hi ha una altra llar de foc, adossada, i en el mateix espai també hi podia haver un forn. En aquest espai secundari del mas, que no era l'habitació familiar, existien els focs de tipus utilitari, com és el mateix forn.

La llar de foc tenia al seu entorn seients, bancs o escons per a les persones que menjaven i s'escalfaven al seu voltant. Aquesta utilització de l'espai de la llar de foc ha continuat vigent fins avui dia. El banc de Taüll, en part, podria recordar els bancs de les llars de foc de l'alt clergat o de la noblesa. A la lleuda de la ciutat de València (1271?) hi ha la informació que els bancs no paguen la imposició de la lleuda.¹⁴

La llar de foc tenia una funció elemental i bàsica, que era cuinar els aliments, els líquids en peroles i les carns amb graelles, que hem pogut apreciar com a document gràfic en els martiris de santa Julita i de sant Llorenç. A les seves brases i cendres, amb olles i tupins podien coure o escalfar líquids de menys entitat i consum.

A part de l'escalfor que podia aportar la llar de foc, hi havia els brasers, que donaven el seu escalf, quasi personal, i aprofitaven com a mitjà de calefacció les brases que podien sostraire's d'una llar de foc, moltes vegades secundària. La representació de l'hivern en el tapís de la Creació de Girona és un senyor vestit amb gran solemnitat i assegut en un escambell, escalfant els seus peus en un brasero.¹⁵ Aquests brasers eren de ferro forjat i de diferents formes i mides, segons les persones que podien o havien d'estar al seu vol-

14. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 116 i 117: «[101] [...] banchs [...] nullum pedaticum donent.»

15. Pere de PALOL (1986), *El tapís...*, p. 47, fig. 33.

tant. Un dels brasers tardoromànic millor coneguts i conservats és el del Museu Episcopal de Vic.¹⁶

Tant la llar de foc com el forn o el braser necessitaven llenya, de què en els masos o les cases de les viles es podia disposar en més o menys facilitat, sempre que l'artifatge que comportava els conreus no hagués donat lloc a una escassetat de bosc. Aquest fet era l'origen de greus problemes en l'ús i l'explotació del seu principal i més preat producte: la llenya. Recordarem solament el cas succeït, l'any 1366, en el bosc de Poblet, en què una discussió, ocasionada pel robatori de llenya, va finalitzar amb l'assassinat, pels homes de Prades, del convers fra Guillem Tort, granger de Castellfollit, que fou enterrat amb tot honor i en lloc destacat del claustre, i no de manera anònima en el cementiri de monjos com corresponia a la seva jerarquia monacal.¹⁷

Els propietaris de la terra procuraven mantenir zones de bosc com a zones productores de fusta i de llenya per cobrir les seves necessitats domèstiques i poder vendre'n els excedents als vilatans i artesans propers. Els habitants de les ciutats i viles havien de comprar llenya; tot i poder-ho fer en certes quantitats a les seves proximitats, aquesta llenya i fusta no era suficient per a les necessitats d'una munió de consumidors com és el cas, per exemple, de la ciutat de Perpinyà. Aquesta població, com la majoria de les existents a l'Europa medieval, estava obligada a importar llenya, per la

16. «Ferro forjat. 5.A. Diversos» (1986), a *Catalunya romànica*, vol. XXII, Museu Episcopal de Vic. Museu Diocesà i Comarcal de Solsona, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 238 i 239.

17. Agustí ALTISENT (1974), *Història de Poblet*, Abadia de Poblet, p. 246: «A l'ala de la sala capitular, entre l'escala del dormitori i el locutori de monjos hi ha, a terra, la pedra tombal del convers fra Guillem Tort, amb la seva imatge en relleu. Una inscripció al mur explica que fou mort per gent de Prades, per demanar justícia en defensa del bosc de Poblet, l'any 1366.»

qual es pagava el dret de lleuda (1250). Aquest dret, en el cas de Perpinyà, era el següent: per cada saumata (somada era una mesura de pes de tres quintars) es pagava, com a impost, una quantitat de difícil valoració: un tros de llenya o una ascla (estella grossa) de la llenya importada.¹⁸

5. LA ILLUMINACIÓ

La llar de foc no tenia com a finalitat il·luminar els espais d'habitació, que corresponia a les espelmes i les llànties. Les espelmes podien ésser de cera, producte relacionat amb la lleuda de Barcelona (1222), en virtut de la qual per una càrrega (càrrega d'abast de tres quintars) de cera es pagava dos sous i set diners, que era l'equivalent a quasi tres jornals d'un oficial artesà.¹⁹ Les espelmes d'inferior qualitat eren elaborades amb sèu, que tenia un valor molt inferior a la cera. Pel sèu es pagava, solament, cinc diners, quantitat molt inferior, que representava un 16% de la lleuda de la cera.²⁰ A part del comerç de les matèries primeres, com la cera i el sèu, existien en el mercat candeles o espelmes comercialitzades amb caixes.²¹

Les espelmes i les candeles necessiten un sustentacle; l'home les pot portar a la seva mà, però la major part de les vegades la seva funció d'il·luminació, en una habitació, és

18. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 83: «[80]. Item de qualibet saumata de lenya que aportetur ab hominibus forensibus, unum troceum vel unam asclam.»

19. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 58: «[22]. Carga de cera dat II solidos, et VII denarios et obolum.»

20. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 72: «[49]. Carga de seu quinque denarios.»

21. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 160: «[8]. De caxeta de candelas de sevo, IIII dineros, p. 181. «[59]. Carga de cadeles obrades.»

estàtica, hi ha uns punts de col·locació. Aquesta exigència fa que l'espelma o candela hagi d'estar relacionada amb un aparell sustentador, i aquests són els canelobres i els candelers de ferro forjat i més o menys amb dissenys elegants i rics segons que l'espai en què havien d'estar col·locats era laic o no: al tinell o altres sales d'un castell, en un palau o casal i a obradors i cases de ciutats o viles, fins i tot a les humils llars dels camperols o eclesiàstics, fos una catedral o una humil parròquia rural. El Museu Episcopal de Vic en conserva una rica col·lecció, quasi tota procedent d'esglésies i capelles d'aquest bisbat.²² Aquesta procedència no exclou l'existència de peces semblants per ésser usades per l'estament laic. Hi havia un comerç de canelobres, la tardana lleuda de València (1271),²³ que ens documenta que els candelers no pagaven cap mena d'imposició; pot ser que fossin considerats com a ferro fos i que paguessin lleuda en aquest concepte i no com un objecte de ferro forjat, amb un valor no artístic però sí artesà o d'art menor o decorativa.

Hi havia un altre productor de llum: el gresol d'oli, la llàntia o la llumenera, que eren de més fàcil utilització en els desplaçaments per la seva major resistència a apagar-se per un cop de vent. Aquestes peces eren de ceràmica. Per consegüent, l'oli, a més de la seva missió alimentària, tenia una importància molt destacada com a productor de llum, especialment a partir d'un cert moment, en què fou la llum obligatòria per a la il·luminació de la reserva eucarística. Citarem la valoració de l'oli feta per la lleuda de Colliure (1249?), en la qual destaca

22. «Ferro forjat. 5B, Canelobres i candelers» (1986), a *Catalunya romànica*, vol. XXII, *Museu Episcopal de Vic. Museu Diocesà i Comarcal de Solsona*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 240-248.

23. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 117. «[102] [...] canelobres [...] nullum pedaticum donent» i p. 124. «[110] [...] canelobres [...] non donen alcun peatge.»

en dues classes, una primera de més qualitat i una segona, segurament, més pobre.²⁴ La diferència de la lleuda entre una gerra i un barril o un bot o un odre no pensem que estigui en relació per la quantitat d'oli que contenien, que es justifica pel fet de pagar aquesta diferència entre dos o tres diners, sinó per la diferència de qualitat.

En els espais oberts, s'utilitzava per fer llum dos sistemes: la combustió de matèries olioses o bé la de matèries resinoses, les quals originaven una notable fumera, amb la mala olor corresponent. Aquest fet és el que ens explica el seu ús a l'exterior dels espais tancats.²⁵

6. EL FOC ARTESANAL

El foc és essencial en el treball artesà, pocs són els oficis que no el necessiten. Els artesans tindran una creixent importància social i econòmica al llarg de l'edat mitjana, especialment a partir del segle XII, en organitzar-se l'artesanat a les ciutats i viles, i en produir i consumir la producció de les manufactures. Calia disposar de forns o fornals per a una producció reduïda; per contra, els grans centres d'elaboració dels metalls i de la ceràmica estaven ubicats a les zones de producció de les matèries primeres minerals i vegetals, la llenya.

El ferro és el metall amb un ventall més ampli d'aplicacions. Les fargues, a les diferents contrades dels Pirineus i prePirineus, són properes als jaciments de minerals de ferro i a la vegada tenen a les seves proximitats una gran massa

24. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 79. «[172]. Gerra d'oli, II diners. [176]. Hodre d'oli, bot o barral, III diners.»

25. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 117. «[102] [...] tea [...] nullum pedaticum donent.»

boscosa, així com abundosa aigua, sigui o no necessària per a la hidràulica en el treball del ferro. Els jaciments d'argila, la llenya i l'aigua són necessaris per fer la massa o pasta de fang de la ceràmica. Hem de recordar que, quan aquests dos elements, mineral i bosc, van esgotar-se o empobrir-se, moltes vegades d'una manera paral·lela va tenir lloc l'abandonament de l'explotació i el treball dels productes minerals.

La producció del ferro, a l'època medieval, va tenir una gran dispersió a Catalunya²⁶ i s'ha documentat un comerç reflectit a les lleudes: de ferro obrat i sense obrar.²⁷ A més dels grans centres de producció, a les ciutats i viles hi havia ferrers. Fins i tot a les sagres de les més petites parròquies hi havia un artesà, home d'almenys dos oficis —ferrer i fuster— que aportava el seu treball als camperols del lloc o vilatge. Aquests artesans alternaven els seus oficis, moltes vegades, amb el treball del camp. Aquests ferrers tenien una principal dedicació, ferrar els equins i altres animals de peu rodó, la qual cosa queda reflectida per l'existència d'un comerç de ferradures, segurament per la dificultat de fabricar-les lluny d'una farga. A la lleuda de València (1271) no pagaven cap mena d'imposició.²⁸

Hi havia un segon mineral, l'argila, que va adquirir una gran importància en generalitzar-se l'ús de la ceràmica, a partir de la darrerïa del segle XII, per elaborar els atuells del parament de la llar que no estaven en contacte amb el foc i desplaçà la fusta, amb què a l'alta edat mitjana es fabricaven peces com ara escudelles, plats, talladors, servidores i anaps, entre altres, que eren les peces apropiades per al servei de la taula de la llar. Les primeres recerques arqueològiques fetes a

26. Pere MOLERA I SOLÀ (1980), *La farga*, Barcelona, Dopesa, p. 47-58, distribució geogràfica i històrica.

27. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 313-316.

28. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 113-125.

centres productors de ceràmica, a peu de l'argila i del bosc, foren els forns de Casa en Ponç (Berga)²⁹ i més tard va estudiant-se els forns del castell de Cabrera d'Igualada (l'Anoia).³⁰ Els objectes de ceràmica també els documentem a les lleudes, encara que en època tardana, com per exemple a la lleuda de València (1271?)³¹ i de Colliure (1300?).³² En la primera, la ceràmica no paga lleuda; per contra, a Colliure es fa un pagament amb objecte ceràmic: una olla. No tenim una explicació lògica per justificar aquesta diferència de tracte fiscal entre aquestes dues poblacions. Potser s'hauria de relacionar aquesta diferència amb la relació legal entre el poder sobirà i la població, que no era la mateixa al regne de València, recentment conquerit, que al comtat del Rosselló, un dels comtats d'origen franc i vinculat a les estructures legals de la Catalunya Vella.

La fabricació del vidre l'hem documentat per primera vegada, també, a peu de terres i sorreres, així com d'aigua i bosc. Aquest és el cas del forn de vidre proper a Vimbodí, documentat en el cartulari del monestir de Poblet.³³ L'any 1189, l'abat Esteve III de Poblet va concedir a Guillem, vidrier, que pogués establir-se a l'artiga de la font de Nerola, propera a granja de Riudebella.³⁴ Aquest pagava un elevat arrendament

29. «Forns de ceràmica de Casa en Ponç» (segle XI-XII), a *Catalunya romànica*, vol. XI, *El Berguedà*, p. 129-130.

30. «El taller i els forns de ceràmica grisa del castell de Cabrera» (1992), a *Catalunya romànica*, vol. XIX, *El Penedès. L'Anoia*. Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 387-388.

31. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 116: «[101] [...] anaps, escudeles, talyadors, morters, jarras [...] nullum pedaticum donent.»

32. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 174: «[8] Item pren lo senyor rey de somade de olles o de tota altra obra de terra: una olla.»

33. Cartulari de Poblet. *Edició del manuscrit de Tarragona* (1938), Barcelona, Institut d'Estudis Catalans, p. 25, doc. 49.

34. Agustí ALTISENT, *Història de Poblet...*, p. 162.

ment, part en «taules» (vidre pla) que podien haver estat utilitzades per construir els vitralls cistercencs de Poblet, avui perduts, i els de Santes Creus, per sort conservats,³⁵ elaborats en el traspàs dels segles XII a XIII. A les lleudes de Perpinyà (vers 1250?)³⁶ o de Tortosa (1252)³⁷ hi ha documentat el comerç del vidre, que devia tenir un transport molt complicat per la seva fragilitat. A la lleuda es fa referència a un embalatge del qual no sabem l'entitat —grop o grob—, el qual era fet, segurament, amb un sistema que permetés oferir una major protecció i salvar la fragilitat del vidre. Aquest embalatge era necessari per transitar pels camins de ferradura o per navegar per la Mediterrània.

L'esmalt és un vernís vitri aplicat sobre una superfície metàl·lica mitjançant la fusió de silicats o fluorosilicats, acolorits amb pigments metàl·lics, que actua o bé com a protecció del metall per la seva resistència als elements corrosius o bé amb una finalitat decorativa. Hi ha un nombre important de peces conservades; citarem les col·leccions del Museu Episcopal de Vic, que no figuren a les lleudes segurament perquè eren objectes de luxe tant a la vida diària com a la litúrgia i que no circulaven pels canals normals de l'intercanvi mercantil i comercial. Entre aquests objectes citarem concretament els encensers,³⁸ que no estan documentats a les

35. Joan AINAUD DE LASARTE (1992), «Pròleg», a *Els vitralls del monestir de Santes Creus i la catedral de Tarragona: Corpus Vitrearum Medii Aevi* – Espanya, 8 – Catalunya, 3. Barcelona, Institut d'Estudis Catalans, p. 14.

36. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*: p. 83, «[76]. Item de cifis de vitro, et de ampollis et de omni opere vitreo: XXXV [diners].»

37. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*: p. 99, «[127]. Gorb de veire, donet II enaps.»

38. «Orfebreia. †D. Encensers» (1986), a *Catalunya romànica*, vol. XXII, *Museu Episcopal de Vic. Museu Diocesà i Comarcal de Solsona*, Barcelona, Fundació Enciclopèdia Catalana, p. 216-229.

lleudes, a diferència de l'encens.³⁹ Per aquest es pagava un alt aranzel, cinc sous (cinc jornals o sous), tot i que la càrrega podia ésser d'un crescut pes d'aroves fins a deu amb un pes aproximat d'un centenar de quilos. Aquests cinc sousensem que no és una quantitat crescuda, si valorem que es tracta d'un producte de luxe, i a més procedent del comerç d'Orient. L'encens era necessari per al cerimonial de la litúrgia, ja fos a una catedral o a una petita parròquia rural.

7. ELS ARTESANS DEL FOC A LA CIUTAT

La importància dels artesans a partir del segle XII, i concretament els que utilitzaven el foc a la ciutat de Barcelona, és notable i ha deixat el seu testimoni a la toponímia urbana i a la llista de les confraries, més tard gremis que els varen agrupar. La confraria que documentem com a més antiga és la de Sant Marc dels sabaters (23 desembre 1203).⁴⁰

Els primers testimoniatges de l'existència del treball artesà i que necessitava el foc està centrat a la Barcelona alt-medieval, la qual ocupava el recinte de la ciutat romana. El creixement de la ciutat no solament va obligar a construir un segon recinte de murs —els murs de Jaume I (segle XIII)—, sinó a afegir un tercer espai murallat, els murs de Pere el Cerimoniós (segle XIV). Aquest desenvolupament de l'espai urbà va obligar a institucionalitzar un magistrat: l'obrer (1301),⁴¹

39. Miguel GUAL CAMARENA (1976), *Vocabulario...*, p. 299. La referència més antiga a la lleuda de Barcelona, 21 gener 1222. «[10]. Carga incensum dat V solidos, tam de empcone quam de uendicione.»

40. Joan-F. CABESTANY FORT (1967), «Els mestres sabaters i la confraria de sant Marc (segle XIV)», a *Homenatge a Jaume Vicens Vives*, Barcelona, Facultad de Filosofía y Letras, vol. II, p. 75-84.

41. Joan-F. CABESTANY FORT (1964), «Privilegi fundacional dels obrers de Barcelona (1301)», a *Anuario de Historia Medieval de España*, Barcelona, núm. 1, p. 589-591.

que tenia l'obligació de controlar el desenvolupament de les obres públiques i privades. La gestió dels obrers es va codificar, en el mateix segle XIV, amb la redacció d'un codi, *Les Consuetuts de Sanctacília*, en les quals s'ordenava, entre altres ordenances municipals, que els forns no estiguessin adossats a les parets mitgeres, sinó a una distància de tres pams de destre (0,70 m); s'hi establí que calia construir un altre mur i deixar una cambra d'aire com a protecció d'una possible expansió de la calor o del foc, que podia ésser causa d'un incendi. Aquests eren molts temuts, a les ciutats medievals, per la gran quantitat de fusta existent a les edificacions, que en facilitava la propagació, i també per una gran manca d'aigua per apagar-lo.

Entorn del Palau Comtal els carrers conserven el nom de diferents oficis propis del que es pot dir el «vestit» de cavaller: daguers, brocaters, freners, trompeters o sivellers. Tots aquests artesans necessitaven el foc per al seu treball; ara bé, moltes vegades hem pensat en la possibilitat que fossin simples comerciants i no fabricants. Coneixent, emperò, el treball artesà, hem de pensar que eren, a més, artesans que podien reparar els desperfectes de qualsevol d'aquests objectes, i per això els calia un mínim de foc.

Potser en aquest mateix moment de naixença o creixement de l'activitat artesana, als burgs, ravals o viles noves tancades i protegides pels murs de Jaume I i de Pere el Cerimoniós s'hi establiren, com a mesura de «bon govern», els oficis que podien donar lloc a molèsties als restants ciutadans. Entre aquests, els artesans del foc, com podien ésser agullers, argenters, escudellers (ceramistes), espasers, ferrers, rajolers, vidriers escampats pels quatre quaters de la ciutat, amb una concentració de ceramistes i vidriers al quarter de Sant Francesc, als voltants de l'actual plaça Reial, zona en la qual hi ha el testimoniatge dels carrers d'escudellers, d'escudellers blancs i del vidre i de la vidrieria.

Tots aquests oficis i altres que no han quedat reflectits a la trama urbana tenien les seves confraries, les quals segles més tard, a la darrerria de l'època medieval i a l'inici de la moderna (segles XV a XVII), van tenir més activitat gremial sense deixar d'ésser confraries pietoses i assistencials.⁴² Una de les més importants, la primera documentada, fou Sant Marc dels sabaters. Serà, emperò, la de Sant Eloi dels ferrers (els «elois») la que va diversificar-se amb el pas dels anys, i es va constituir en diferents confraries però amb el mateix patró, senyal inequívoc del seu comú origen: agullers, ballesters, calderers, cuirassers, daguers, ferrers, ferrovellers, flasquers, llanterners, manyans, mestres d'obra negra i de tall i llimers. No formaven part dels «elois» ni els espasers ni els llancers, que tenien com a patró sant Pau, sant que a la iconografia baixmedieval, moment de la constitució de les confraries, té com a símbol l'espasa,⁴³ signe parlant dels menestrals que treballaven a la fabricació i la venda d'espases i altres armes de tall.

155

El foc com a signe d'identitat de la casa, com a llar de foc o llum o activitat artesanal va estar present a la vida de l'home medieval, concretament des de l'època romànica. Ens ha deixat un nombre important de testimoniatges que ens permeten estudiar la importància social, econòmica i cultural en el món romànic català i europeu en general, i va tenir, especialment com a activitat dels artesans, el seu gran desenvolupament en el món gòtic, amb el triomf de noves tècniques de treball i de producció, que van continuar millorant fins a produir-se la revolució industrial en l'època moderna.

42. Joan-F. CABESTANY I FORT (1990), «Confraries i gremis a Barcelona: Segles XIII a XVI», a *Finestrelles*, Sant Andreu de Palomar, Barcelona, núm. 2, p. 141-145.

43. Louis RÉAU, (1998), *Iconografía del arte cristiano: Iconografía de los santos: De la P a la Z: Repertorio*, Barcelona, Ediciones del Serbal, p. 6-13. «Su atributo personal es una espada, instrumento de su martirio. Este emblema apareció en su iconografía hacia el siglo XIII.»



SOCIETAT CATALANA
D'ESTUDIS HISTÒRICS
EL FOC COM A FACTOR
DE PRODUCCIÓ,
A CÀRREC DE
JOSEP M. BENAUL BERENGUER,
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA

L'atenció se centrarà en aquells processos de producció on el foc era un element imprescindible. En primer lloc, s'analitzarà el foc com a factor de producció en l'economia orgànica, on el foc s'obtenia fonamentalment a partir de la combustió de llenya i altres matèries orgàniques. En segon lloc, s'estudiarà el foc com a factor de producció en l'economia d'energia de base mineral, on el foc s'aconsegueix bàsicament a partir de la combustió de minerals (carbó, petroli, etc.).

1. INTRODUCCIÓ

1.1. *El descobriment del foc, un dels primers grans avenços en la història de la tecnologia*

L'*Homo erectus*, segons les restes trobades a la Xina, ja coneixia el foc ara fa 600.000 anys. Tanmateix, s'ha de distingir entre usar el foc i fer foc. En el primer cas, el foc podia haver estat causat per un factor extern a l'home (un llamp, una explosió volcànica, una combustió espontània, etc.) i aquest es limitava a conservar-lo i a usar-lo. En el segon cas, el foc hauria estat creat per l'home, és a dir, que podia produir-lo quan volia. L'home va aprendre a fer foc de dues maneres. En primer lloc, colpejant una pedra foguera contra un mineral que contingués metall de ferro (pirita de ferro) i fent que les espurnes provoquessin la flama d'herba seca. En segon lloc, mitjançant la fricció d'un bastó de fusta dura contra una peça de fusta més tova.

Algunes de les aplicacions del foc no es van produir fins molt més tard que l'home hagués après a fer foc. Mentre va ésser un caçador i un recol·lector, amb el foc va trobar escalfor, va aprendre a cuinar alguns aliments i a adobar pells, va obtenir protecció enfront dels animals salvatges i caliu per a la vida social i el va usar per foradar tronc i fer

així les primeres barques. Més endavant, quan l'home va esdevenir agricultor i ramader i es va sedentaritzar, van sorgir noves necessitats i el foc va permetre l'obtenció de productes ceràmics per a ús domèstic i per a la construcció i, finalment, l'entrada a l'era dels metalls. Hi ha una distància temporal més que notable entre el temps del foc de l'*Homo erectus* (600000 aC) i l'edat del coure (5000 aC) o del bronze (3000 aC).

1.2. *Dues etapes en la història del foc com a factor de producció*

La història del foc com a factor de producció es pot dividir en dues etapes segons el combustible usat per produir-lo. Fins al segle XVIII de l'era cristiana, el combustible ha estat aclaparadorament orgànic: la llenya, les plantes o els seus derivats. Al marge de l'energia hidràulica i l'eòlica, el gruix de l'energia procedia de la transformació d'elements orgànics, ja fos en forma de combustible pel foc o d'aliment transformat metabòlicament per les espècies animals, especialment per l'home i pel bestiar de tir. Per això, seguint Wrigley, podem parlar de *economia orgànica*. La segona etapa, molt més curta, va de la revolució industrial fins als nostres dies, però el canvi ha estat radical. Hem passat d'una economia de base orgànica a una altra de base mineral, en la qual els minerals han esdevingut els combustibles bàsics i també han substituït moltes de les primeres matèries orgàniques.

En aquesta anàlisi, tot i que farem referència a les activitats agràries i extractives, ens centrarem en el foc com a factor de producció a la indústria. Això vol dir que no abordarem, fora que sigui imprescindible, l'ús del foc en la vida domèstica o en l'activitat militar. D'altra banda, si bé farem referència a l'elaboració de productes per a l'enllumenat,

aquest aspecte serà marginal en aquesta síntesi. L'enfocament sectorial se centrarà en les indústries més importants i, per tant, es defuig qualsevulla pretensió d'exhaustivitat.

2. EL FOC EN L'ECONOMIA ORGÀNICA

2.1. *Els combustibles*

Tal com hem dit, els combustibles bàsics han estat la llenya, procedent d'arbres o, per defecte, d'altres plantes. La fusta es pot transformar en carbó vegetal, el combustible sòlid gairebé perfecte, atès que crema a alta temperatura i produeix poc fum i cendra. Això l'ha fet decisiu per a usos domèstics i industrials. El carbó vegetal s'obté de la crema de la fusta mitjançant unes condicions que limiten l'aire, cosa que n'evita la combustió total. Les carboneres per produir carbó vegetal, especialment a partir de roure o alzina, han estat una activitat tradicional de l'explotació del bosc. I aquí convé notar que l'oferta de combustible ve determinada per la disponibilitat de boscos.

2.2. *El foc en les activitats agràries i extractives*

Atesa la importància d'aquestes activitats en les economies preindustrials, recordarem molt breument alguns usos del foc. En l'agricultura, el foc s'emprava en les rompudes, sobretot quan eren el producte del desboscament. S'utilitzava tant en les rompudes definitives com en les itinerants, les artigues. Hom recorria també al foc com a procediment de fertilització de la terra, ja fos el foc somort que es feia en els formiguers o el dels rostolls.

El foc s'usava també en la pesca. La pesca a l'encesa

es feia amb teies. El foc —en aquest cas, el fum— s'utilitzava també en activitats com l'apicultura. Els pobles que encara es dediquen a l'apicultura predatòria utilitzen el fum per apaivagar les abelles, de la mateixa manera que l'apicultor actual fa servir el fumigador.

En l'extracció de minerals també s'emprava el foc, seguit d'un ruixat d'aigua freda, per trencar les roques. D'aquesta manera, s'obtenia una contracció que produïa grans forces internes que fracturaven la roca.

2.3. *El foc en les activitats manufactureres*

2.3.1. Ceràmica, materials de construcció, ceràmica i vidre

La ceràmica usa materials abundants i és molt fàcil de fer. La invenció del torn, pels volts del 3000 aC, va comportar un fort augment de la producció i, en conseqüència, una forta expansió dels forns. La temperatura de cocció era decisiva per aconseguir que la ceràmica esdevingués més resistent i menys porosa i fins i tot que es pogués vitrificar. Per això calia obtenir temperatures superiors als 750-800 °C. La cocció és un procés llarg i molt intensiu en combustible. A partir del quart mil·lenni aC es va començar a utilitzar el forn, que va substituir els focs oberts i els focs coberts amb terra anàlegs al model de la carbonera. Amb els forns s'aconseguien temperatures més altes i s'economitzava combustible. Més endavant, hom va aïllar el fogar de la resta del forn per tal d'obtenir l'escalfament indirecte i evitar que es malmetessin les peces a causa dels fums i les sutges.

Pel que fa a la construcció, el forn es va usar originàriament per a la fabricació de maons, quan es requeria que fossin impermeables, i de rajoles per a paviments. El maó

cuit s'emprava en els temps clàssics a Egipte; els ziggurats es revestien de maó cuit, i a Mesopotàmia i a Babilònia trobem maons vidrats. Finalment, convé recordar que bona part de Roma va ser construïda amb un quasi ciment revestit de maó. Després de la caiguda de l'Imperi romà, la fabricació de maons es va mantenir a Bizanci, al nord d'Itàlia i a l'Espanya musulmana. En aquest darrer cas, també s'ha de fer esment de l'ús de la rajola vidrada. Entre els segles XI i XII, el maó es va difondre des del sud de França fins a l'est d'Anglaterra i va esdevenir la base principal de l'arquitectura a la franja del mar del Nord i Bàltic, des de Bèlgica fins a Rússia. Tanmateix, fins a la baixa edat mitjana no es va produir un resorgiment remarcable de la fabricació de maó a Europa.

Altres materials també requerien l'ús del foc. Així, la calç viva i el guix es produïen mitjançant la calcinació. La pedra calcària i la pedra de guix eren calcinades en forns, de manera que expulsaven el diòxid de carboni. La combinació de la calç amb determinades sorres i amb aigua permetia obtenir el morter. Si la sorra tenia característiques especials com les de Pozzuoli, usada a Roma, llavors podia esdevenir un quasi ciment.

Si els materials de construcció fins ara descrits s'obtenien mitjançant la cocció o la calcinació, el vidre s'obtenia mitjançant la fusió. El vidre era elaborat mitjançant l'escalfor d'una mescla sense impureses de sosa, calç i sorra (silici) fins que es fonia en un fluid vitri, que s'havia de refredar lentament per evitar trencaments o cristallitzacions. El procés de producció es va mantenir gairebé sense canvis des de l'època romana fins a la revolució industrial. La producció de vidre requeria una temperatura de 1.000° C, que era la que es podia obtenir amb el foc de carbó vegetal. D'altra banda, la tècnica de bufar el vidre va provenir de Sírria i es va difondre pel món romà a partir del segle I dC.

2.3.2. Productes alimentaris i begudes

El foc va permetre la cocció dels aliments i transformar-los en determinats casos. Podríem citar, en primer lloc, el pa. El primer tipus de pa, sense fermentació, era una massa cuita en forma de galeta. Cap al 2600 aC, els egipcis ja feien pa amb mètodes semblants als actuals. Fins a èpoques recents, com sabem, el pa era produït a l'àmbit domèstic i la producció no estava separada del consum.

Les tècniques més antigues de la preservació del peix i de la carn han consistit a assecar, salar i fumar aquests aliments. De les tres tècniques, la del fumat és la que utilitza el foc i, en el cas d'Europa, ha tingut una importància creixent des de l'edat mitjana. Tot i que, en determinats casos, l'elaboració dels fumatges podia ser una activitat domèstica, l'expansió de l'activitat pesquera li va donar un caire cada cop més industrial.

Altres activitats, entre les quals destacava la fermentació de la cervesa, també van adquirir un caràcter industrial. A Europa es va començar a posar llúpol a la cervesa, per motius de conservació, a partir dels segles XIII-XIV dC. En el procés de producció el foc intervenia en la cocció del most. A partir del segle XVIII, també s'usava en la torrefacció del malt, per obtenir, juntament amb l'addició de caramel, la cervesa negra.

Els àrabs van introduir a Europa la destil·lació d'alcohols per tal d'elaborar productes medicinals. La tècnica, que va permetre aconseguir també begudes amb alt contingut d'alcohol, consisteix a vaporitzar la mescla líquida (fent-la bullir) fins a separar-ne els constituents segons la diferent pressió de vapor, condensar els vapors i recollir el condensat separatament del residu. La destil·lació simple s'efectua en alambins quan interessa, com és el cas dels aiguardents, només una separació parcial de la mescla.

Una altra activitat industrial era la fabricació del sucre de canya. El mètode tradicional va ser introduït pels àrabs. Els sucres obtinguts de la molturació de la canya passaven per successives calderes, on eren sotmesos a cocció, per clarificar-los i concentrar-los. Aquesta solució concentrada cristal·litza-va en refredar-se. El xarop o melassa que quedava com a residu podia ser destil·lat per obtenir-ne el rom. La producció de sucre va adquirir una escala encara més industrial quan es van desenvolupar les plantacions al continent americà. El sucre americà acostumava a ser sotmès a un darrer procés de refinació a Europa, consistent a bullir el sucre amb aigua amb calç fins que quedava completament clar. Després es filtrava, es concentrava per evaporació i es deixava cristal·litzar.

2.3.3. La fabricació de metalls

164

La separació del metall dels altres elements amb els quals està combinat químicament i la seva elaboració posterior requereixen la intervenció del foc. Per tal de separar el metall, és necessari fondre'l amb un material que formi una escòria amb els altres elements (oxigen, sofre, etc.). Abans del segle XVIII, el carboni del carbó vegetal era el més satisfactori d'aquests materials. Atès que la reacció química només es produeix amb altes temperatures, el forn és decisiu en els processos d'extracció dels metalls. Per tant, el carbó vegetal no solament proporciona l'alta temperatura de la fusió sinó que forma, en menor o major mesura, les escòries amb els altres elements.

Pel que fa a l'elaboració del metall, hi havia dues possibilitats. La primera era donar forma al metall pur, que no necessitava ser fos, mitjançant un martell i una enclusa. El martelleig enduria el metall, però es va descobrir que es podia estovar novament mitjançant escalfament. La segona

possibilitat era refondre novament el metall per purificar-lo, vessar el metall líquid en un motlle i, una vegada refredat, retocar-lo amb el martell.

El bronze procedeix d'un aliatge del coure amb l'estany (3000 aC). El llautó era un altre aliatge, obtingut en aquest cas mitjançant el coure i el zinc. El problema del ferro era que requeria una temperatura de fusió més elevada (1.535 °C) que el coure (1.063 °C). Fins a la introducció dels alts forns no hi va haver manera d'aconseguir ferro colat. Per tant, des del 2000 aC fins al 1500 dC només es va obtenir fonamentalment ferro forjat mitjançant un forn baix, en el qual només s'aconseguia una pasta de ferro, que després era treballada a cops de martell. La farga catalana va ser un d'aquests forns més reeixits.

Els alts forns es van establir a partir dels segles XIII-XV a Lieja i a partir del 1500 es van difondre per Europa. Els avantatges eren clars: podien treballar amb minerals menys rics, produïen a més gran escala i consumien proporcionalment menys combustible. Ara bé, la construcció del forn era cara i el ferro colat tenia un contingut molt més alt de carboni, de manera que era més fort en compressió i més feble en tensió, més trencadís, que el ferro forjat. Els alts forns necessitaven, atesa l'escala —determinada per la grandària i per l'operació constant—, més combustible i força mecànica —energia hidràulica— per moure les manxes. El ferro colat es podia convertir en ferro forjat mitjançant una nova fusió en un altre forn, que extreia el carboni del ferro. Atès que aquest sistema d'obtenir el ferro forjat comportava dues operacions, ha estat denominat *procediment indirecte*.

2.3.4. Les beceroles de la indústria química

La indústria química moderna s'origina en el segle XVIII, quan es va dotar d'una base científica moderna, però hi

havia una sèrie d'activitats transformadores que en poden ser considerades els precedents. En totes el foc era un factor de producció decisiu.

La producció de sabó es pot considerar indústria química, tant pels elements que hi intervenen com pel procés que comporta. El producte s'obtenia mitjançant l'ebullició de greix animal o vegetal (oli d'oliva) amb un fort àlcali. El sabó dur s'obtenia amb la sosa, la qual s'obtenia de la calcinació de la barrella. El sabó tou s'obtenia amb la potassa càustica, obtinguda a partir de cendres de fusta i calç.

Un altre dels precedents de la indústria química és la tintura, en la qual també intervenia el foc. En primer lloc, s'havia d'obtenir l'alum (sulfat d'alumini i potassi), que era utilitzat com a mordent. Els minerals s'havien de purificar per processos de cristallització fins a obtenir l'alum. En segon lloc, els tints eren tots productes naturals, majoritàriament vegetals, tot i que també n'hi havia d'animals com la cotxinilla i la porpra. En el cas de l'indi, un dels més usats, la planta s'havia de deixar fermentar perquè fos soluble en l'aigua. El teixit o la fibra es bullia primer en una solució amb el mordent i després es bullia amb el tint.

També s'obtenien productes a partir de la fusta. Les pegueres, per exemple, eren els forns on es cremava llenya de pi per fer pega, usada pels boters, en la construcció de naus i en el marcatge del bestiar. El procés de combustió era lent, ja que es tapaven amb terra per evitar l'entrada d'aire. La pega emanava lentament i en refredar-se se solidificava.

2.4. Els límits energètics de l'economia orgànica

La demanda de calor va augmentar de manera molt considerable a l'Europa del segle XVI al XVIII, alhora que es feien evidents les limitacions de l'oferta de combustible. Les fonts de

l'augment de la demanda industrial i domèstica de calor eren l'increment de la població i, en uns llocs més que en d'altres, els ingressos per habitant. En canvi, l'oferta de combustible estava bàsicament limitada a la llenya, és a dir, als recursos forestals.

Els recursos forestals no solament no augmentaven en resposta a la demanda, sinó que fins i tot disminuïen allí on eren més evidents el creixement demogràfic i l'econòmic. L'expansió de l'agricultura i de la ramaderia es feia a còpia de desforestar, i la creixent demanda domèstica i industrial de combustible accelerava encara més aquesta desforestació.

L'escassetat de combustible orgànic començava a ésser palesa en molts llocs i això es traduïa en l'encariment del combustible, que calia anar a cercar a llocs cada vegada més distants que els de consum. Però això no feia altra cosa que anunciar que el creixement tenia un sostre pel que fa a la disponibilitat de combustible a les economies de base orgànica. De fet, en algunes zones, sense anar més lluny al País Basc en el segle XVIII, es va tocar aquest sostre. El creixement només podia continuar si es canviaven els fonaments energètics de l'economia.

3. EL FOC EN L'ECONOMIA DE BASE MINERAL

3.1. *L'economia de base mineral*

Amb la revolució industrial es va produir el trànsit d'una economia basada en el combustible orgànic a una economia basada en el combustible mineral. Els diferents tipus de combustible mineral (la torba, l'hulla, els lignits, el petroli...) eren coneguts i usats des de feia temps, però de manera molt limitada. No tots aquests combustibles tenien el mateix

potencial calòric, com ho palesen les diferències entre l'hulla i la torba. Tampoc no tenien el mateix potencial de reserves, que podien considerar-se gairebé il·limitades a l'hulla i molt més limitades a la torba.

La pressió del sostre de l'energia de base orgànica, que abans hem assenyalat, va portar a l'explotació dels combustibles de base mineral, especialment a partir del segle XVII. Tanmateix, l'explotació d'aquests recursos plantejava diversos problemes. Primer, no tots els països estaven dotats amb aquests tipus de jaciments. Segon, l'extracció podia ser relativament simple si el jaciment aflorava a la superfície i molt costosa si l'explotació es feia per mitjà de galeries profundes, que, a més, comportaven tota una sèrie de problemes tècnics de difícil resolució. Finalment, el consum d'energia tèrmica —a partir de la combustió del carbó mineral— podia experimentar una forta expansió si s'aconseguia transformar-la en energia mecànica. Fins llavors això no havia estat possible i l'energia mecànica depenia de la força hidràulica, del vent i de l'energia animada.

El convertidor de l'energia tèrmica en mecànica va ser la màquina de vapor, que ens va alliberar de l'energia animada i dels límits de les energies eòlica i hidràulica. Amb la màquina de vapor vam entrar de ple en l'era dels motors de foc i també en l'era de l'escalfor i de l'enllumenat a partir de combustibles minerals o fòssils. I a partir de l'explotació d'aquests combustibles abundants i més barats, es va obrir una nova era en què gran part de les primeres matèries orgàniques (la fusta, les matèries tintòries, els lubricants d'origen vegetal o animal, etc.) van ser substituïdes per primeres matèries minerals. D'aquesta manera, el sòl es va veure alliberat de la restricció que suposava la necessitat de disposar de llenya per a la combustió.

3.2. *Les fonts del foc i els motors de foc*

Com ja hem dit, l'explotació dels combustibles minerals va permetre disposar de noves i abundantíssimes fonts de foc. La primera i més explotada va ser el carbó mineral. L'era del carbó va presidir tot el període que va des de les darreres dècades del segle XVIII fins a les primeres dècades del segle XX. A partir de llavors, han anat prenent més relleu altres combustibles fòssils com el petroli i el gas natural.

La màquina de vapor va ser el primer dels motors de foc. Aquesta invenció va estar lligada a l'explotació de la mineria del carbó, que requeria sistemes per bombar l'aigua de les mines. I aquest va ser l'ús de la primera màquina de vapor reeixida, la de Newcomen, en els segles XVII i XVIII. El foc intervenia en l'escalfament de l'aigua de la caldera per produir vapor. La màquina de vapor no va sortir d'aquest ús limitat a la mineria del carbó, fins que Watt fer dues grans innovacions. La primera, el condensador separat, que comportava un gran estalvi d'energia; la segona, el moviment rotatori, que la va convertir en un veritable motor.

Les màquines de Newcomen eren convertidors molt ineficients, ja que convertien en treball menys de l'1% dels recursos tèrmics consumits. Eren més ineficients que els convertidors orgànics, però ni l'home ni els animals no podien alimentar-se amb carbó i no hi havia cap manera d'organitzar amb tanta eficàcia la força equivalent d'una d'aquestes màquines. El 1870 la força de vapor a Anglaterra era de 4 milions de CV, equivalents a la força de 6 milions de cavalls o de 40 milions d'homes.

L'eficiència de les màquines va millorar progressivament: dels 13,6 kg de carbó per CV/h que consumia la màquina de Newcomen es va passar als 3,4 de les màquines de Watt i als 1,13 de les màquines de mitjan segle XIX. Paral·lelament, també es van desenvolupar calderes que

aconseguien la producció de vapor amb un menor consum de combustible.

La màquina de vapor va ser seguida per altres motors de foc molt més eficients. Ens referim als motors d'explosió o de combustió interna, basats en el principi d'explosió controlada. L'explosió ràpida d'un gas en un espai delimitat, per exemple un cilindre, permetia el desplaçament d'un pistó en la direcció desitjada.

Els primers motors d'explosió van ser els de gas. Eren motors més eficients i nets que les màquines de vapor, comportaven un notable estalvi en mà d'obra i podien ser molt petits i adients per a petits tallers. El combustible també podia ser més barat. Si era produït *in situ*, el gas es podia fabricar a partir de carbons de poca qualitat i altres materials. El gas també podia provenir de la xarxa de gas d'hulla o bé del gas com a subproducte d'un alt forn siderúrgic. El foc era necessari per fer el gas en els gasògens de gas pobre o en les grans plantes de producció de gas d'hulla amb retortes. Finalment, cal considerar també l'encesa i la combustió del gas en el motor. La principal limitació d'aquests motors era precisament la falta de mobilitat, ja que depenien de la font de subministrament, ja fos el gasogen o bé la xarxa.

La solució es va trobar en l'ús de combustibles líquids, especialment el petroli i els seus derivats. Cremaven de manera gairebé tan eficient com el gas, feien el doble de treball per unitat de pes que el carbó i ocupaven molt menys espai. Amb aquests combustibles els motors d'explosió podien ser aplicats a la navegació i també al transport terrestre. A la navegació comportaven un gran estalvi, en relació amb les màquines de vapor, no solament en termes d'eficiència de combustible sinó també de personal, ja que es podia prescindir completament dels fogoners.

Els motors de foc no van acabar aquí. Podríem esmentar, entre altres, les turbines de vapor, usades en les centrals

tèrmiques, o els motors de reacció en l'aviació. De tota manera, hem considerat els més essencials per a l'època que va de la revolució industrial a mitjan segle XX.

3.3. *La disponibilitat de calor i l'obtenció de metalls*

3.3.1. La siderúrgia

Un dels grans problemes tècnics en l'ús del carbó mineral es trobava a la siderúrgia, ja que fins al segle XVIII no es va descobrir el sistema per fer servir el carbó mineral en els alts forns de ferro. A diferència del carbó vegetal, que no contenia impureses, el carbó mineral en tenia moltes. Això ja s'havia detectat en la coccio del most en la producció de cervesa, on les impureses del carbó mineral es transmetien a la coccio i espatllaven el sabor d'aquesta beguda. Van ser els cervesers britànics els primers que van pensar a destil·lar el carbó mineral per eliminar les impureses, és a dir, en la coquitzió. En començar el segle XVIII, Abraham Darby va aconseguir una fosa de ferro de qualitat mitjançant l'ús del coc a Coalbrookdale. El 1790 quatre cinquenes parts de tots els alts forns britànics ja funcionaven amb coc.

D'altra banda, aquest cas mostra els lligams entre les innovacions de la revolució industrial. Com que el coc cremava amb més dificultat que el carbó vegetal dins de l'alt forn, era necessari injectar-hi més aire. Això feia que els alts forns haguessin de situar-se prop de cursos d'aigua per disposar de rodes que impulsessin les manxes. Les màquines de vapor que impulsaven cilindres bufadors d'aire van posar punt final a aquesta dependència. La nova doble dependència del carbó (combustible del forn i de les màquines de vapor) va canviar també la localització dels alts forns, que es van situar prop dels jaciments d'aquest mineral.

Els altres dos grans canvis de la indústria siderúrgica van ser, primer, els nous sistemes de producció de ferro forjat i, més tard, la producció massiva d'acer. Gràcies a la innovació abans descrita, es disposava d'un gran volum de ferro colat. El ferro colat tenia uns usos limitats i calia convertir-lo en ferro forjat per tal que pogués satisfer les necessitats majoritàries del consum industrial. Per fer-ho, calia reduir el carboni del ferro colat. El repte novament era usar el carbó mineral per aconseguir-ho. El britànic Henry Cort va trobar la solució amb el procediment de la pudelació a la fi del segle XVIII. La pudelació consistia a passar el ferro colat a un forn de reverber (on el combustible no estava en contacte directe amb el mineral) i a remoure, apartar, batre i separar successivament la fosa, de manera que l'aire accedia amb gran quantitat i rapidesa al ferro fos, s'assolia la descarbonització i s'obtenia un ferro mal·leable. A més, Cort va combinar la pudelació amb l'ús dels corrons en lloc dels martells de la forja. La massa pastosa que sortia del forn de reverber passava a un tren de laminació, on una sèrie de corrons compríen la massa i n'extreien més impureses per pressió. A més, els darrers corrons podien tenir formes determinades, de manera que el ferro sortia ja com a producte acabat (rails, perfils quadrats o circulars, etc.).

Més va tardar, fins a la segona meitat del segle XIX, la producció de l'acer en massa, l'acer barat. Fins llavors l'acer, un producte que té més carboni que el ferro forjat i menys que el ferro colat i que és superior en prestacions a aquests dos ferros, només es podia produir a petita escala amb procediments laboriosos i cars i també incerts, ja que depenien de l'experiència dels operaris.

La primera innovació va ser el convertidor Bessemer, el procediment del qual consistia a insuflar aire damunt i a través del metall fos, utilitzant la calor que despenia el mateix procés d'oxidació. Això permetia una descarbonitza-

ció molt ràpida (de tres a cinc tones d'acer en un quart d'hora). El procediment alternatiu era el sistema Martin-Siemens. Es tractava d'un forn de recuperació de calor, que permetia aconseguir temperatures més elevades i usar carbó de qualitat inferior. La tècnica pretenia l'oxidació del ferro colat, i la barreja del ferro colat amb ferralla facilitava el procés de descarbonització. El procés era més lent que el Bessemer, però més controlable, i permetia obtenir acers de més qualitat. Ambdós procediments només podien usar ferro fos de mineral no fosfòric, que era el menys abundant i més car.

La solució va venir, el 1875, dels cosins Sidney G. Thomas i Percy Gilchrist, que van descobrir que, si s'afegia pedra calcària al convertidor, aquesta es combinava amb el fòsfor per formar escòria bàsica. A més, aquesta escòria, polvoritzada, esdevenia la base dels adobs fosfatats. A partir d'aquesta invenció, es va entrar en l'era de l'acer bàsic i, a partir de llavors, l'acer va substituir el ferro dolç o forjat.

173

3.3.2. Els metalls no ferrosos

Després d'una certa hegemonia del plom, el coure va esdevenir el metall no ferros més important. La intervenció del foc en la transformació del mineral de coure —molt carregat d'altres elements, predominantment sofre— en metall era decisiva. Amb la tecnologia de la primera meitat del segle XIX, el mineral era sotmès a sis operacions (de les quals dues eren calcinacions i tres, foses) fins a obtenir el coure *blister*, que necessitava encara una darrera fosa de refinació. Més endavant, es va introduir el forn de torrefacció amb diverses soleres, que eliminava molt més ràpidament el sofre. Finalment, la mata de coure era convertida en *blister* mitjançant un convertidor molt semblant al Bessemer. D'altra banda, s'ha de tenir en compte que, en els minerals sulfurats,

els més rics en sofre, molt abundants a Espanya, aquest era el producte principal destinat a la indústria química. En aquest cas, el procés de dessulfuració realitzat a les plantes químiques deixava uns residus —escòria (*cinders*)—, dels quals també s'extreia metall de coure.

Altres metalls com el plom, el zinc, l'estany i el mercuri s'obtenien també per procediments de fosa, amb adaptacions d'alts forns i de forns de reverber.

Alguns dels processos, com el de producció de zinc amb retorta horitzontal, descobert a Lieja a començaments del segle XIX, es van mantenir vigents fins a mitjan segle XIX. En canvi, amb el desenvolupament de l'electricitat, el nou procediment de l'electròlisi va esdevenir decisiu en la refinació del coure i del níquel i en la fabricació de l'alumini a partir de les darreres dècades del segle XIX.

3.4. *Una indústria nova: la química*

3.4.1. Les grans innovacions

El foc, basat principalment en la combustió del carbó, també va intervenir en els processos productius que van revolucionar la indústria química. Aquesta indústria va substituir les primeres matèries orgàniques per les minerals, va descobrir nous productes i va crear una cadena d'aprofitament de diversos subproductes. Tot plegat fa que es pugui considerar una indústria nova. No cal dir que l'augment de la producció química va ser esperonada per la demanda d'altres indústries, com era el cas dels tints i els blanquejadors consumits per les indústries tèxtils.

En primer lloc, cal destacar la química inorgànica, que va conèixer la primera revolució en la química de la sosa. Gràcies a Leblanc, es va poder obtenir aquest producte a

partir de la sal, un mineral molt abundant, en lloc dels vegetals que contenien sosa (barrella, determinades algues). L'ús de procediments calòrics comportava un elevat consum de carbó. La sal comuna es tractava amb àcid sulfúric i el sulfat sòdic resultant es cremava barrejat amb carbó i carbonat de calci (pedra calcària). La sosa s'extreia per lleixivació de la cendra de sosa o cendra negra resultant i la solució s'evaporava en recipients oberts. El producte sintètic, fabricat en massa amb els procediments abans descrits, era més homogeni que el natural.

La producció de sosa va incrementar la demanda d'àcid sulfúric, de manera que si ja en el segle XVIII s'havia abaratit la destil·lació del sulfat ferrós, ja que va passar a fer-se en cambres de plom en lloc de petites campanes de vidre, en el segle XIX es van desenvolupar nous procediments d'obtenció de l'àcid sulfúric a partir de nous minerals (pirites, salnitre), de nous forns i de cambres de plom molt més grans.

Un nou procediment per a la producció de sosa va ser inventat pels germans Solvay el 1861. En aquest cas, es tractava d'obtenir bicarbonat sòdic mitjançant el pas d'anhidrid carbònic per salmorra saturada amb amoníac. El bicarbonat sòdic es converteix fàcilment en sosa amb l'escalfor i allibera anhidrid carbònic, que es pot reutilitzar en la primera etapa. Els Solvay van introduir la torre de carbonatació, que va fer continu el procés. A més, es van fer altres millores, com els forns per produir l'anhidrid carbònic a partir de la pedra calcària i els forns per calcinar el bicarbonat sòdic. El preu de la sosa es va reduir a la meitat, i en les darreres dècades del segle XIX la sosa Solvay va substituir la Leblanc. De la química lligada a la sosa, en van sortir algunes de les empreses químiques més grans del món.

Dins de les indústries de la química inorgànica pesada s'ha de fer esment de la manufactura d'explosius, amb innovacions com la nitroglicerina i la dinamita, que van resultar

decisives en la mineria. Una altra indústria important va ser la de fertilitzants, especialment dels nitrogenats, fosfòrics i potàssics.

L'altra gran revolució de la química va ser el desenvolupament de la química orgànica, que engloba tota la química del carboni i els seus derivats. En primer lloc, cal destacar la química dels colorants sintètics a partir del carboni. Del quitrà de l'hulla es poden obtenir moltes substàncies: el nitrobenzè i, per reducció d'aquest, l'anilina, anomenada així perquè abans s'aconseguia a partir de l'anyil. Des de llavors, es van obtenir per oxidació altres colorants sintètics, que van fer abandonar el recurs a les plantes tintòries com la roja, l'indi, etc.

L'altre gran subsector de la química orgànica és la petroquímica, que utilitza productes derivats del petroli. I això ens porta a aquest hidrocarbur, que va tenir una explotació molt més tardana que el carbó, tant perquè la demanda dels seus derivats era molt limitada com perquè existien problemes d'oferta que anaven des de les fonts de subministrament del cru fins als costos de refinació.

De 1850 a 1880, la refinació del petroli es feia amb alambins cilíndrics i horitzontals, escalfats amb vapor d'aigua (o, posteriorment, per vapor reescalfat); el vapor d'aigua evitava el perill d'un flama viva. Refinacions ulteriors s'obtenien mitjançant l'ús de productes químics com l'àcid sulfúric o la sosa. En la refinació se separaven tres fraccions a partir dels diferents punts d'ebullició. La gasolina, que era la primera en ésser destil·lada, era considerada perillosa i inútil; la fracció mitjana proporcionava el querosè, el producte més útil en el segle XIX, ja que era usat en l'enllumenat; la fracció final o més pesada va esdevenir valuosa com a lubricant i va substituir els obtinguts a partir d'olis animals o vegetals.

La refinació va passar de ser un procés discontinu, ja que inicialment s'havia de retirar la tercera fracció i deixar re-

fredar l'alambí, a ser un procés continu, la qual cosa suposava un major estalvi de combustible. Amb la invenció dels automòbils, va augmentar i va canviar radicalment la demanda de productes del petroli, i de resultes d'això la gasolina es va col·locar en primer pla. Aquest fet va afavorir la difusió del mètode del *cracking*, consistent a escalfar el petroli a pressió per obtenir una major proporció dels olis més fluids, a causa de la ruptura de les llargues cadenes d'àtoms de carboni que formen les molècules de les fraccions més pesants i menys volàtils. La Standard Oil Company va ser la primera a utilitzar, des de 1913, el *cracking* tèrmic per a la producció de gasolina.

El *cracking* va permetre també la producció d'olefines per a la indústria petroquímica. Tot i que només eren una part molt petita de la refinació del petroli, cap a 1900 ja representava un terç de la indústria de la química orgànica. El ventall de productes petroquímics, molt limitat abans de 1913, es va ampliar moltíssim a partir de la comprensió dels processos de polimerització, que van permetre a partir dels anys d'entreguerres i, sobretot, després de 1945, la producció de nous productes sintètics, els quals van superar les fibres artificials (derivades de la cel·lulosa), els plàstics semisintètics (cel·luloide, baquelita) i el cautxú natural. Així va desenvolupar-se la producció de fibres (poliamides, polièsters), plàstics (PVA, PVC, polietilè...) i cautxú sintètics.

177

3.4.2. El foc a la indústria química

Al llarg del segle XIX, les unitats d'equipament essencials a totes les branques de la indústria química van ser el forn i —entesa en un sentit ampli (tines, alambins, autoclaus, etc.)— la caldera.

El forn era bàsic en la fabricació dels productes que intervenien, per exemple, a la indústria de la sosa: forn per a

la refinació del sofre, forn per a la combustió del sofre barrejat amb nitrat per alimentar en continu les cambres de plom per a l'àcid sulfúric, forns per a la calcinació de les pirites...

D'altra banda, gràcies a la disponibilitat de productes siderúrgics més resistent i al desenvolupament de materials refractaris, van poder-se aplicar forns mecànics, generalment rotatius, especialment en operacions on convenia que la massa fos remoguda.

En nombroses fabricacions, la utilització del vapor d'aigua, o l'aire calent, era el mitjà més apropiat per a les destil·lacions, les concentracions i les dessecacions. El cas del petroli, abans analitzat, és prou significatiu en aquest sentit. Però també podem assenyalar el cas de l'alcohol, on els nous usos industrials (productes farmacèutics, perfumeria, vernissos, cautxú...) van créixer de manera notable, sense oblidar els alimentaris, i això va portar al perfeccionament dels aparells de destil·lació i de rectificació. L'alambí d'Aeneas Coffey, desenvolupat i patentat entre 1830 i 1831 utilitzat la resta del segle, permetia obtenir un alcohol pràcticament pur. Amb aquest alambí es podia dur a terme la destil·lació i la rectificació contínues.

Al mateix temps que se substituïa el carbó vegetal pel mineral i que els minerals esdevenien les primeres matèries bàsiques de la química, es trobaven nous usos químics a la fusta. El primer que podem destacar és la fabricació de pasta de paper. El procediment químic permetia d'obtenir la cel·lulosa en estat pur. En el darrer terç del segle XIX es va desenvolupar aquesta fabricació química amb el procés alcalí, que usava lleixius alcalins càustics, i el procés àcid, que usava hidrogensulfits de calci o de magnesi. En ambdós casos, es requerien els *inputs* químics esmentats i temperatures elevades per escalfar els autoclaus on la fusta desfibrada era sotmesa a la lleixivació. A partir de la cel·lulosa, com ja hem esmentat abans, també es van produir plàstics (cel·luloide) i fibres artificials (viscosa, raíó). En segon lloc, a partir

de la destil·lació seca de la fusta —amb escalfament mitjançant vapor d'aigua— es va obtenir àcid acètic, metanol, acetona, quitrans...

3.5. *Els materials de construcció, la ceràmica i el vidre*

Al marge de les noves possibilitats obertes per la producció massiva de ferro, que va possibilitar l'anomenada *arquitectura de ferro* i l'ús més general d'aquest material en la construcció (pilars, jàsseres, formigó armat, etc.), la revolució industrial va incidir de manera decisiva en la producció de materials de construcció. Un primer efecte va ser l'extensió de l'ús del maó a la construcció i dels envasos i l'utilatge ceràmics als àmbits industrial i domèstic. A les llars de les economies de l'Europa nord-occidental, per exemple, la ceràmica va substituir la fusta i el peltre (plom i estany). El carbó i les noves facilitats per al seu transport va ser decisius, juntament amb el fet que els jaciments d'argila estaven molt difosos.

En això va ser decisiva la combinació de la mecanització (molins, trituradores i mescladores per tractar les primeres matèries; premses mecàniques per donar-li forma) i de formes més eficients de cocció basades en els forns de reverber. En la fabricació de maons convé destacar, per exemple, el forn de Hoffman.

Entre els nous materials de construcció, convé destacar el ciment, obtingut de la mixtura de determinades argiles i calç mitjançant calcinació. Per això, en el cas del ciment Pòrtland, es van desenvolupar forns mecànics rotatoris a la fi del segle XIX, que van eliminar el treball manual fins llavors imprescindible en la calcinació.

La indústria del vidre es va beneficiar dels perfeccionaments de la indústria siderúrgica (forn de regeneració Siemens), de la indústria química (ja que l'oferta de sosa bara-

ta —sobretot la Solvay— era clau en l'expansió de la indústria i dels procediments mecànics (maquinària moguda per màquina de vapor, aire comprimit, etc.). L'aplicació dels forns Siemens va ser determinant, ja que proporcionava una temperatura més elevada, eliminava les bombolles d'aire i permetia una fosa contínua.

Així doncs, els forns de reverber van ser adoptats a totes les operacions on un producte havia d'estar molt escalfat però sense estar sotmès a calcinació, com era el cas de la indústria de la ceràmica i els maons i la del vidre.

3.6. *Foc i escalfor a la indústria alimentària*

El foc i la calor han estat decisius en el desenvolupament de la indústria alimentària moderna. D'una banda, hem d'assenyalar els processos de destil·lació, que ja han estat analitzats en tractar la indústria química. A més de la indústria de l'alcohol, la indústria sucraera va utilitzar intensament l'escalfament per mitjà del vapor d'aigua. L'extracció i la refinació del sucre, tant de canya com de blada-rave, es va mecanitzar. En aquesta indústria el vapor impulsava el motor que movia la maquinària i escalfava calderes, on es transformava el producte.

Segonament hem d'esmentar aquells productes que requereixen processos de cocció i de fosa (mescla i amassament d'ingredients en calent). Entre els primers, podríem esmentar la fabricació de galetes (forns de solera, després forns de cadenes, finalment forns elèctrics de cintes). Entre els segons, la xocolata.

Per acabar, cal considerar els usos del foc i la calor en els avenços en la preservació dels aliments, que han estat bàsics en el desenvolupament de la indústria alimentària moderna. En primer lloc, podem destacar la producció de gel

industrial, obtingut precisament per mitjà de la calor. En segon lloc, la fabricació per procediments calòrics de diversos tipus de llet: condensada, deshidratada, esterilitzada, pasteuritzada, etc. En tercer lloc, gràcies a la producció massiva de sucre, la fabricació de melmelades, on també intervenen la cocció i l'ebullició (bany maria). Finalment, els aliments enllaunats, escalfats per destruir els enzims i els bacteris perjudicials i amb recipients tancats hermèticament. La producció de conserves hermètiques va tenir una gran expansió a partir de la fi del segle XIX.

4. LES DUES CARES DEL FOC

No hi ha dubte que el foc com a factor de producció ha estat bàsic en la generació de riquesa i de millora dels nivells de vida. Especialment en els dos darrers segles en què, entrats de ple en l'economia de base mineral, hem explotat els abundants combustibles fòssils i hem aconseguit incrementar de manera exponencial la nostra capacitat de produir foc i escalfor com a factors productius. Ara bé, com planteja Buchanan, la tecnologia que ha permès assolir els actuals nivells de benestar a les societats més desenvolupades i que ha de permetre assolir-los en altres països en vies de desenvolupament també planteja serioses incerteses sobre el conjunt del planeta.

Avui hi ha pocs dubtes que, al llarg dels darrers dos-cents anys, la nostra activitat en la producció de foc ha contribuït a crear contaminació i a generar efectes més durables com l'efecte hivernacle i les seves repercussions en els canvis de la climatologia del planeta. Mentre que la població mundial es va triplicar entre el 1850 i el 1970, el consum d'energia es va multiplicar per dotze. Tot i que, des de les crisis energètiques de la dècada de 1970, ha disminuït la intensitat energètica, és a dir,

la quantitat d'energia per unitat de producció expressada en termes monetaris (1 euro o 1 dòlar), el consum d'energia no para d'augmentar. I el 95 % d'aquesta energia prové de fonts no renovables, és a dir, dels combustibles fòssils. Tot i alguns entusiastes de nous paradigmes, a curt termini no és previsible el canvi d'aquesta base energètica. La gran qüestió és, doncs, si és viable —i, per tant, sostenible— un consum mundial d'energia que generalitzi les elevades cotes de consum dels països avançats al conjunt del planeta, tant si es considera la disponibilitat de recursos com els efectes sobre el canvi climàtic i altres desafiaments ambientals.

BIBLIOGRAFIA

182

- BUCHANAN, R. A. (1992). *The power of the machine: the impact of technology from 1700 to the present*. Londres: Viking.
- DAUMAS, M. [dir.] (1962-1979). *Histoire générale des techniques*. París: Presses Universitaires de France.
- DERRY, T. K.; WILLIAMS, T. I. (1977). *Historia de la tecnología*. Madrid: Siglo XXI. [Edició anglesa original de 1960]
- LANDES, D. S. (1979). *Progreso tecnológico y revolución industrial*. Madrid: Tecnos. [Edició anglesa original de 1969]
- MCMEIL, I. [ed.] (1996). *An encyclopedia of the history of technology*. Londres: Routledge.
- SINGER, C. [et al.] [ed.] (1954-1978). *A history of technology*. Oxford: Clarendon Press. 7 v.
- WORLDWATCH INSTITUTE (2004). *L'estat del món 2004*. Barcelona: Centre Unesco de Catalunya.
- WRIGLEY, E. A. (1990). *Continuity, chance and change: The character of the industrial revolution in England*. Cambridge: Cambridge University Press.

SOCIETAT CATALANA
D'ESTUDIS CLÀSSICS
FOC SEMPRE VIU,
A CÀRREC DE
JAUME PÒRTULAS,
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA

Por el fulgor del fuego, que ningún ser humano puede
mirar sin un asombro antiguo [...].

J. L. BORGES, «Otro poema de los dones»

Se sol parlar dels «quatre elements» en contextos molt distints i referint-se a èpoques i teories molt divergents: des de la cosmologia fins a la medicina, des de la física fins a la poesia; i a propòsit dels antics, de la ciència medieval, de les especulacions renaixentistes, etc. Poques vegades es recorda que la seva primera formulació es produí a la Grècia clàssica, i que obsedí una sèrie de personatges molt significatius d'aquesta cultura, com ara Empèdocles d'Agrigent, alhora metge, físic, xaman, visionari religiós i polític actiu. Es mirarà de parlar d'aquesta fascinació per l'element igni, evitant de caure en tecnicismes fora de lloc.

184

* * *

La veritat és que, en el moment d'encetar la meva participació en aquest cicle,¹ sento una mena d'incòmoda perplexitat; això em sol passar, com a tothom, quan m'adreço a un públic que conec poc. Cal suposar aquest públic honestament interessat en la matèria (si no, no es trobaria avui aquí, suposo), però no hi ha cap motiu per a pressuposar en ningú uns coneixements especialitzats. D'una banda, el meu tema d'avui, amb raó o sense —i el cas és que a mi em sembla que amb raó—, té fama d'obscur. D'altra banda, jo mateix he canviat —parcialment— d'argument sobre la marxa. La meva intenció primera era fer un resum de la vella i prestigiosa teoria dels quatre elements,

1. El text present no és una transcripció gaire fidel de l'exposició oral, però he mirat de conservar la ficció de l'oralitat tant com he pogut.

prenent com a autor de referència Empèdocles d'Agrigent, el xaman, metge i pensador i també teòleg del segle V aC, que fou el primer (almenys que nosaltres sapiguem) que va donar-li una articulació orgànica i coherent. Després, reflexionant-hi amb calma, m'ha semblat més interessant de fer-vos entrar de manera directa en el laboratori de la filologia (de la filologia clàssica, en aquest cas) i de la seva manera d'operar, perquè la gent —i sovint nosaltres mateixos— tendim a fer-nos-en tota mena d'idees extravagants i molt inexactes.

Recordo bé que, quan el diccionari de l'Institut d'Estudis Catalans (DIEC) va sortir al carrer, alguns gasetillers es van mofar amb molt poca gràcia de la definició de *filologia* que s'hi donava, i que, tot s'ha de dir, tampoc no era perfecta; més ben dit, resultaba bastant discutible en alguns extrems: «Disciplina que estudia l'estructura i l'evolució d'una llengua principalment per mitjà de l'anàlisi i la interpretació de textos i llurs relacions amb les cultures on s'han originat». Tanmateix, hi ha dues coses a dir en defensa d'aquesta definició. Primer, que millora notablement la del diccionari Fabra, que conté diversos errors significatius, contaminada com és d'un curiós (i anacrònic) idealisme d'arrel humboldtiana: «Ciència que estudia les llengües com a òrgans de la vida intel·lectual dels pobles; estudi científic del llenguatge, ciència lingüística». No és aquesta, realment, una definició gota afortunada. Però és que ningú, entre les moltes persones a qui vaig plantejar el repte, no fou capaç de donar-me una caracterització que realment ens satisfés de la filologia, i això que la majoria (i jo mateix!) eren, som, filòlegs de professió. L'únic que m'agrada de veres de la definició del DIEC és que contingui la paraula *text*. Una qüestió diferent és si sabríem posar-nos d'acord sobre què significa aquesta paraula; però, en canvi, difícilment es podria rebutjar la premissa: la filologia, les filologies solen ocupar-se, de preferència, «de l'anàlisi i la interpretació del text» —es defineixin aquests darrers (els textos) com es vul-

gui, o més aviat com es pugui. Llavors, per contribuir modestament a la causa de la filologia, he triat quatre fragments (només quatre, i força breus) d'un altre pensador una mica anterior a Empèdocles, Heràclit d'Efes, i em proposo donar-hi unes quantes voltes. Tots quatre parlen de l'element igni, que sens dubte ocupava un lloc central en la reflexió d'Heràclit l'Obscur. (En dic *reflexió* perquè *teoria* o *sistema* em semblen paraules massa modernes i no sabia aplicar-les de cap manera a un pensador anterior a Plató.) Els quatre textos que he retingut són, doncs, els següents:²

[30 DK] Aquest agençament (*kosmos*), el mateix per a tots, cap dels déus no l'ha fet, ni cap dels homes; sinó que ha estat sempre, i és, i serà —foc sempre viu que s'encén amb mesura i amb mesura s'apaga. [31 a + b DK] Revirades (*tropai*) del foc: de primer, el mar; del mar, la meitat terra, la meitat buf ardent. Terra es desfà en mar, i es mesura segons el mateix compte (*logoi*) que abans d'esdevenir terra. [76 DK] Mort de la terra esdevenir aigua; mort de l'aigua esdevenir aire, i de l'aire, foc —i així de bell nou. [90 DK] Del foc, tota cosa n'és bescanvi, i de tota cosa, el foc —com de l'or les riqueses, i de les riqueses, l'or.

Sense entrar en tecnicismes, convé destacar, altra vegada, que, a despit de com l'he presentat, el conjunt no és

2. Aquesta reflexió, per ésser ben feta, s'hauria de conduir sobre el grec original, evidentment. Per pal·liar una mica el problema, he transcrit entre parèntesis els mots grecs que em semblaven clau; val més això que no res. Per a la meua traducció, he emprat sense modificacions l'edició canònica de Hermann Diels i Walther Kranz; n'he donat la numeració entre parèntesis, sota les sigles habituals de DK. Un darrer detall tècnic, que pot semblar poc important, però que no ho és: l'ordre dels fragments és responsabilitat meua (DK es limiten a disposar-los convencionalment per l'ordre alfabètic de les *fontes*) i no pot pretendre reflectir de cap manera l'ordre perdut de l'original.

un discurs seguit, sinó que es tracta de quatre fragments, d'ordre i col·locació bon tros incerts. Es tracta d'una tasca de reconstrucció, doncs. Encara que amb tota versemblança pertanyien a un mateix context, no és gota segur que vinguessin seguits. La font del primer i del segon és un pare de l'església, Climent d'Alexandria (*Stromata*, v. 104, 1-3); hom el completa, pel que fa al fragment 30 DK, gràcies a Simplicí i a Plutarc; i a través d'Eusebi de Cesarea, pel que fa al fragment següent. Dels mots literals de Climent es desprèn que tots dos fragments, en l'original, venien, com he dit, molt a prop l'un de l'altre. Els altres dos fragments els coneixem sobretot gràcies a un tractat mig teològic mig erudit de Plutarc de Queronea, el *De Ei apud Delphos*. N'hi ha alguna font més, d'importància secundària. Però deixem ja les *fontes* i passem a comentar-ne, sumàriament, el contingut.

Hom haurà remarcat, sens dubte, que he traduït el compromès terme *kosmos* per 'agençament' —i no pas sense haver-hi donat moltes voltes. La cosa menys arriscada hauria estat, evidentment, no traduir-lo de cap manera, com hom fa sovint: «Aquest cosmos, el mateix per a tots...»; però això constitueix una trampa, perquè dona al terme un sentit «filosòfic» consolidat, que és, precisament, allò que en l'època d'Heràclit *encara* no tenia, i que probablement anava camí d'adquirir, tot just. Un bon diccionari grec ens indicarà que el sentit més antic del terme és el de 'arreglaments d'un exèrcit en ordre de batalla' (Homer); no gaire després, en un passatge de Safo, passarà a significar 'els ornaments amb els quals s'agença una dona'. Aproximació significativa, sens dubte, però que no té gaire relació amb la filosofia, almenys en el sentit que els moderns solem donar-li... Hi hauria, certament, una manera convencional i respectable de plantejar «en termes filosòfics» el problema —però es tracta d'una solució, al meu entendre, espúria i que, per tant, no

ens hem de permetre. Consistiria senzillament a dir (com fan tants manuals, inclosos alguns de seriosos) que Heràclit planteja aquí per primera vegada la teoria del foc còsmic, posteriorment vinculada al seu nom, i promesa a una fortuna tan dilatada. El mal és, emperò, que, quan parlem del foc còsmic, em temo que, en realitat, no sabem gota què volem dir. Què és, de fet? Es tracta d'una matèria, d'un foc material? O més aviat d'un principi, una mena d'*Urstoff*, com solien entendre els filòlegs alemanys del segle dinou? Es tractaria, llavors, d'un principi regulador, pel fet que «s'encén i s'apaga segons mesura»? O convé tirar més aviat pels viaranys de les categories literàries i afirmar que es tracta d'una comparació, o d'una imatge, o fins i tot d'un símbol? De fet, cap d'aquestes respostes no acaba de resultar satisfactòria (al meu entendre, almenys) i potser val més que tirem endavant, encara que sigui amb preguntes de moment sense resposta.

També m'agradaria saber si l'expressió aplicada al foc *sempre viu* (que és com he traduït el grec *aeizôon*, d'una manera tan literal que gairebé es podria dir que m'he limitat a transcriure-la) significa quelcom similar a allò que nosaltres solem anomenar *etern*. Jo diria més aviat que no: com pot ésser etern, si s'encén i s'apaga? ¿I podem dir realment que és viu, quan s'apaga? No ho sé; em sembla versemblant que Martin West (1971, p. 111 i s., p. 165 i s.) tingui tota la raó quan afirma que l'Obscur no fa altra cosa que adaptar a una visió grega de les coses la teologia del foc dels mags perses zoroàstrics; però, de moment, això només em serveix per a desplaçar una mica el problema; i desplaçar-lo vers horitzons que encara resulten menys familiars. Atrapat entre tantes contradiccions, prefereixo adduir (traduïdes de l'anglès) unes assenyades paraules de Charles H. Kahn, per al meu gust un dels millors comentadors d'Heràclit (valoració que m'apresso a indicar que no és pas compartida per tothom); aquestes paraules, per bé que no

aporten la solució del problema, sí que serveixen per a indicar en quina direcció podria trobar-se: «El foc és, certament, un símbol misteriós de la vida, de la vida sobrehumana — a despit, o a causa, del fet que és l'element en el si del qual no pot viure cap ésser animat; i també un poder que en l'antiga Grècia servia sovint (com a l'Índia moderna) per a incinerar els cadàvers. Llavors, alhora que representa la vida i la creativitat, representa també la mort i la destrucció. Com a flama de l'altar, que consumeix el sacrifici, representa els déus; com a foc de la llar i escalfor a l'hivern, sustenta la vida dels homes; com a instrument de les arts, el do robat per Prometeu, indica l'element diví de l'activitat humana, les tècniques i la indústria que ens distingeixen dels animals. El foc té moltes qualitats; però representa una tria ben improbable com a punt de partença per a descriure literalment el procés de desenvolupament del món material, car no és cap mena de matèria, cap mena de cos, sinó un procés de transició d'un estat a un altre, un símbol alhora de vida i de mort, l'encarnació d'una paradoxa [...]» (Kahn, 1979, p. 138). Per la seva banda, Agustín García Calvo va arribar, no gaires anys després, a unes conclusions i formulacions força similars: «[no se debe] entender el fuego como una *arkhê* o principio ni como un *stoikheîon* o elemento de alguna doctrina de Ciencia primitiva (*physiologia*) o de cosmogonía: *arkhê* y *stoikheîon* son conceptos convenientemente fijados por filósofos y científicos, y especialmente por Aristóteles cuando se vuelve despectivamente sobre el pensamiento que le precedía [...]» (García Calvo, 1985, p. 223).

189

Encara em voldria aturar un segon en la versió d'un altre mot grec: *tropai*, que he traduït, amb força dubtes, per 'revirades'. *Tropai* vol dir, en principi, 'girar-se per començar a fugir', i se sol aplicar a dos exèrcits que combaten d'acord amb la tàctica del xoc massiu típica de les falanges hoplítiques.

ques.³ (La freqüència, en els fragments d'Heràclit, de mots manlevats al llenguatge guerrer podria donar lloc a un excurs molt interessant; ara, però, no em vaga d'entretenir-m'hi.) Per una amplificació del significat bastant òbvia, *tropai* indica també el punt i el moment exactes del solstici. Durant mig any, el sol s'alça cada cop més a llevant i es colga cada cop més a ponent; a partir de les *tropai hêlioio* —per emprar, com devien fer tots els grecs, l'expressió homèrica— es regira i comença a desfer camí. Però ¿cal entendre això en el sentit que el mar representa la mort i la desfeta del sol, i viceversa? I, d'una manera encara més general, el foc significa d'alguna manera una destrucció, una conflagració universals, tal com varen proclamar, molts segles després, els estoics? Altra vegada faré servir uns mots de C. H. Kahn, traduïts, per a sintetitzar aquest punt de vista: «El foc representa un procés de destrucció, i només en aquest sentit és possible imaginar-se que 'tot esdevé foc'. En contrapartida, l'únic que sorgeix del foc són fum i cendres. Si hom tria el foc com a model per a la transformació física, a fi de substituir el paradigma milesi de la condensació i l'evaporació, ha de prefigurar de manera intuïtiva l'anorreament de la naturalesa, la devastació de l'ordre còsmic [...]. Per tant, crec que els estoics (i altres intèrprets antics abans que ells) tenien raó de pensar que la imatge del foc representa, per a Heràclit, el presagi d'alguna mena de conflagració còsmica o *ekpyrosis*. I també tenien raó de pensar que, en aquesta dimensió, l'eternitat del *kosmos* només pot consistir en la recurrència de les mateixes fases, l'eterna repetició de 'revirades' [l'anglès diu *reversals*] còsmiques entre oposats, tant si es tracta d'oscil-

3. D'aquí prové, amb una mínima diferència fonètica, la nostra paraula *trofeu*. Un *trofeu* és, per als grecs, el monument (en principi, de naturalesa efímera, encara que aquesta regla no sempre es respectava) que indica, en el camp de batalla, l'indret exacte on un exèrcit ha obligat l'exèrcit enemic a girar cua i iniciar la retirada.

lacions entre el foc i el diluvi, en les catàstrofes polars del gran estiu i el gran hivern, o entre el foc mateix i l'ordre còsmic, com en el cicle estoic [...]» (Kahn, 1979, p. 145).

Aquest cop, tanmateix, ja no em sento gens inclinat (sense que gosi afirmar res, amb un mínim de certesa) a donar la raó a Charles Kahn. Diria que la teoria de la conflagració universal periòdica (allò que, efectivament, en bon grec de l'època dels estoics es denomina *ekpyrosis*, 'anar-se'n tot en foc') arribà a l'Escola a partir d'una sobreinterpretació que portaren a terme de primer Aristòtil i, sobretot, el seu deixeble Teofrast, a partir de determinades fórmules heraclitees que ja els resultaven, a ells, de bon tros enigmàtiques. O, per dir-ho recurrent encara a mots de García Calvo (1985, p. 231): «[...] se trata de una ilación de fórmulas lo más adecuada para desanimar a los posteriores filosofantes o historiadores del pensamiento de intentar reordenarla como una historia de la evolución cíclica del mundo pasando por sus cuatro elementos [...]».

Per plantejar les coses amb una simplificació una mica brutal, em penso que allò que ens fa tan difícil (o més ben dit, impossible) la correcta interpretació d'Heràclit (i també de tots els altres «savis» que se solen anomenar, amb un terme molt desafortunat, *presocràtics*)⁴ és la manca —o la pèrdua— d'un paradigma —emprant aquest terme més o menys en el sentit que li donava, ja fa bastants anys, Thomas S. Kuhn, el teòric de les revolucions científiques. Entenem (o els experts entenen) allò que diu un físic o un economista

4. En primer lloc, perquè és una cosa absurda agrupar un estol tan nombros de pensadors que no tenien gairebé res en comú sota una sola etiqueta, de tipus purament cronològic, i encara negativa, per torna. En segon lloc, perquè sospito que el mateix Sòcrates era un «presocràtic» —i amb això no vull fer cap acudit. Si no quedés altre remei, el terme «preplatònic» seria, mal que mal, preferible, com ja va veure Friedrich Nietzsche amb tota claredat.

perquè tenim (o tenen) una idea més o menys ajustada sobre les coses de què parlen la física o l'economia; no entenem els filòsofs anteriors a Plató perquè partim de la base que parlen d'una temàtica filosòfica, cosa que és, com a mínim, dubtosa —o més ben dit, en la meua modesta opinió, completament falsa. En la meua opinió (que estic disposat a defensar amb tota la tossuderia que posem els semiprofans en aquests temes, però no gota més), la filosofia constitueix un tipus de discurs convencional que es va empescar l'Escola d'Atenes, és a dir, els esforços conjunts de Plató i Aristòtil —i el mestre del Liceu probablement hi va contribuir més que el de l'Acadèmia. Com i per què van fer-ho, ja fa molts anys que ha estat ben analitzat:⁵ per la mateixa raó que, quan jo era estudiant, els professors començaven les seves classes amb un *estado de la cuestión* (empro la terminologia, i l'idioma, de l'època): abans de formular la seva opinió —que era, naturalment, la bona, la correcta—, als nostres mestres els agradava que els estudiants tinguéssim una certa idea de les solucions —evidentment insensates— que s'havien assajat prèviament. D'una manera similar, al Liceu es va constituir, suposo que de manera força espontània, però a recules, una prehistòria i una protohistòria de la filosofia —en funció, naturalment, dels interessos intel·lectuals del segle IV aC, no pas dels hipotètics interessos dels pensadors originals. Per aquest motiu, em sembla que la tendència actual a no anomenar els presocràtics *filòsofs*, sinó *pensadors*, *savis* o qualsevol altre terme de conveniència, és altament recomanable, per raons higièniques i d'exactesa.

No vull escamotejar, tanmateix, el reconeixement que

5. Els esforços més fructífers en aquest sentit els va dur a terme, ja fa molt de temps, el filòsof americà Harold Cherniss; el títol del seu llibre fonamental, *Aristotle's Criticism of Presocratic Philosophy* (del qual hi ha traducció espanyola, publicada a Mèxic l'any 1991), resulta explícit.

totes aquestes divagacions ens deixen exactament en el mateix punt on estàvem: de què diantres volia parlar Heràclit, amb el seu «foc sempre viu»? De totes les seves comparacions, em sembla que la que els crítics han trobat més entenedora (probablement per la voga actual de les ciències econòmiques) és l'aproximació entre el foc i el principi de la moneda, que serveix de mesura d'intercanvi per a tots els béns. El comentari clàssic de Kirk (1954, p. 346-347) ho sintetitza amb una precisió ben anglosaxona: «El *metron* (mesura) subjacent als intercanvis a gran escala del fragment 31 DK resulta emfasitzat per una comparació manllevada al mercat. L'or ocupa la plaça del foc i les *khřēmata* (les 'coses', els 'béns materials') són els diferents tipus d'objectes que l'or pot comprar i els diferents tipus d'objectes d'aquest món. Hom no dona l'or sense obtenir béns en bescanvi; aquests béns equivalen a l'or per la seva vàlua, i una certa quantitat d'or podrà comprar una quantitat de béns fixa i determinada. De manera similar, els béns només són lliurats en bescanvi d'una determinada quantitat d'or. La comparació té una altra aplicació, encara: un dels elements del bescanvi és homogeni (i. e. l'or, el foc), mentre que l'altre és heterogeni (les diverses menes de béns, els diversos objectes físics, l'aigua i la terra en darrera instància).

Rere totes les seves circumvolucions i volutes, el castellà barroc d'Agustín García Calvo no afirma, en darrera instància, quelcom gaire diferent: «[...] la relación entre él [el foc] y las cosas se encuentra, lo más clara y oportunamente posible, equiparada con la relación entre las cosas y el dinero [...]. Relación pues que es la que media entre las cosas múltiples, separadas y diferentes una de otra por los rasgos de cada una, y aquello que, anulando las diferencias cualitativas entre las cosas para reducirlas todas a pura cuantía computable [...]. Parece claro que en el fuego se da, como en ninguna otra aparición de la realidad, la doble condición de, por

un lado, ser una cosa sin ser ninguna (ni siquiera una materia mensurable), y, por otro, ser incapaz de permanencia alguna, tener como connatural consigo el movimiento y cambio [...]». (García Calvo, 1985, p. 221-222) «Esas apariciones bajo nombres y modos diferentes de realidad no quitan para que pueda y deba medirse según la misma cuenta y razón que regía, siempre la misma, antes de que ello apareciese como mar o como tierra: es decir que la tierra, en cuanto cuantía numerable, se mide con los mismos módulos, se computa en igual moneda, cuando es tierra que cuando no es tierra; y lo mismo el mar y los otros modos posibles de materia, de apariciones de la realidad [...]» (García Calvo, 1985, p. 233).

A partir d'aquestes observacions, no seria gaire difícil anotar fins a quin punt les grans transformacions socioeconòmiques de les quals el pensador d'Èfes fou testimoni devien furnir-li materials, comparacions, paradigmes, etc., per capir l'ordre del món d'una manera original i innovadora. Però, per una banda, aquestes remarques resultarien força òbvies; i per l'altra, ja no voldria allargar gaire més el meu discurs.

No m'agradaria, al capdavall, que els meus auditors s'acabessin emportant un sentiment de frustració, de decepció, pel fet que haguem formulat un bon nombre de preguntes per a les quals no tenim cap resposta definitiva. Però, al cap i a la fi, jo no pretenia demostrar res; ni tampoc crec que la intenció dels organitzadors del cicle «El foc i el medi», en convidar un hel·lenista a prendre-hi part, fos que aportés clàrries comparables a les que un hom s'espera d'un economista, d'un historiador o d'un expert en la regeneració de sistemes ecològics. M'imagino que es tractava, sobretot, d'il·lustrar sumàriament les diverses problemàtiques i els diferents mètodes amb els quals treballen els especialistes aixoplugats a les diverses filials de l'Institut d'Estudis Cata-

lans. Com he dit al començament, els filòlegs —i els filòlegs clàssics de manera paradigmàtica— maldem per exhaurir (sense aconseguir-ho mai del tot, per definició) els problemes que ens planteja la recta intel·lecció de determinats textos. Gairebé tothom està d'acord que evacuar la totalitat del sentit que ens planteja un text (i si és un text «important», més; i si, a sobre, es tracta d'un text remot, encara més) constitueix una feina tan apassionant com inacabable. El meu objectiu era només el de donar d'aquest axioma una il·lustració (relativament) senzilla; si he aconseguit això, ja em puc donar per conformat.⁶

BIBLIOGRAFIA

Amb només dues excepcions (els llibres de Kostas Axelos i de Martin L. West), m'he limitat a consignar, en aquesta bibliografia, les edicions comentades que m'han semblat més útils. Aquesta opció és deliberada: és a partir dels textos comentats que cal començar l'estudi d'Heràclit i dels altres *presocràtics*, en la meua opinió.

AXELOS, K. (1962). *Héraclite et la philosophie*. París: Minuit.

BOLLACK, J.; WISMANN, H. (1972). *Héraclite ou la séparation*. París: Minuit.

COLLI, G. (1980). *La Sapienza greca*. Vol. III: *Eraclito*. Milà: Adelphi.

6. Vaig sotmetre aquestes versions a l'afuada sensibilitat traductora del meu amic Manel Carbonell. El professor Xavier Riu, del Departament de Filologia Grega de la Universitat de Barcelona, ha estat, com d'habitud, pròdig de bons consells; consells que, com d'habitud, he demanat, però no sempre he seguit. Igualment, l'amic Arnau Pons i la professora M. T. Clavo, també del meu departament, han volgut llegir aquestes pàgines. A tots plegats, les gràcies més cordials.

- CONCHE, M. (1986). *Héraclite: Fragments*. París: PUF.
- GARCÍA CALVO, A. (1985). *Razón común: Edición crítica, ordenación, traducción y comentario de los restos del libro de Heraclito*. Madrid: Lucina.
- KAHN, C. H. (1979). *The art and thought of Heraclitus*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KIRK, G. S. (1954). *Heraclitus: The cosmic fragments*. Cambridge: Cambridge University Press.
- WEST, M. L. (1971). *Early Greek philosophy and the Orient*. Oxford: Clarendon Press.

**ASSOCIACIÓ CATALANA
DE CIÈNCIES
DE L'ALIMENTACIÓ
EL FOC, EL MEDI
I L'ALIMENTACIÓ,
A CÀRREC DE
MARIA JOSEP ROSSELLÓ,
DE LA UNIVERSITAT
RAMON LLULL**

La utilització del foc ha esdevingut transcendental en l'alimentació dels humans i ha afectat diversos aspectes que han afavorit i potenciat la supervivència de l'espècie humana en el planeta. Aquesta conferència centrarà el tema del foc/energia, des del punt de vista de l'alimentació, en tres blocs:

1. La higienització de l'aigua i dels aliments; la possibilitat de digerir els aliments que contenen midó (cereals, llegums, tubèrculs i castanyes) i el millor aprofitament de la proteïna de molts aliments.

2. La utilització del foc com a font d'energia en la cocció dels aliments ha condicionat les diverses cuines tradicionals dels pobles en funció del medi en què vivien i encara viuen, és a dir, del material combustible de què es disposa. Des d'aquest punt de vista, es parlarà de: *a*) les cuines de l'abundància de matèries combustibles en relació amb el nombre dels habitants i *b*) de les cuines de la supervivència de poblacions molt nombroses.

3. L'obtenció de l'energia per viure: la respiració és una combustió; l'alimentació, i per tant la supervivència, depèn del gran foc: el Sol.

Tot és degut a una causa, res no canvia per si mateix, i ha estat el «foc» la causa del gran canvi de l'alimentació dels humans de fa milions d'anys, i encara actualment el foc, cada vegada més controlat, permet innovar en el món de les modernes cuines i les modernes indústries alimentàries. El foc ha modificat el medi dels humans, tant el seu medi interior com el seu entorn.

La gran història dels humans i el foc comença fa molts milions d'anys i està profundament lligada a l'evolució de la nostra espècie. Una sèrie d'esdeveniments van provocar importants canvis. Els nostres avantpassats deixen els arbres, es posen drets i comencen a utilitzar les mans, que ara tenen lliures, fabriquen eines i poden accedir a nous aliments, però es troben amb un gran impediment: que altres animals poden

agafar coses i menjar. Encara que amb les noves habilitats ells poden agafar els aliments, els és impossible mastegar-los, ingerir-los i fins i tot digerir-los; el seu nou medi ambient no els assegura la supervivència.

Cada espècie animal requereix un medi específic que li proporcioni l'energia necessària per mantenir la vida, és a dir, l'alimentació, i aquest medi modificat per diverses causes, però també per l'acció de la mateixa espècie, actua d'una manera molt lenta provocant canvis de generació en generació.

El domini del foc va ser la causa més transcendental en l'evolució humana. Amb aquest domini va començar la transformació culinària de molts aliments i així es va ampliar espectacularment el ventall d'aliments aptes per a la nutrició humana. Cuinar va ser alguna cosa absolutament nova en el món; per això es parla del «domini del foc», perquè l'incendi destrueix, la cuina transforma. La transformació culinària és un procés molt fi i delicat.

Faustino Cordón, fundador de l'Institut de Biologia Aplicada i de la Fundació per a la Investigació de la Biologia Evolucionista, escriu en la seva àmplia obra la significativa afirmació amb referència al domini del foc: «Un animal, fent una cosa supranimal, esdevé humà».

A partir del moment que és possible cuinar els aliments, es van incorporant a la dieta diària aliments com els cereals, els llegums i els tubèrculs, perquè el midó es fa digerible, és a dir, aprofitable com a font d'energia gràcies al fet que els processos de cocció modifiquen els grànuls de midó (procés de gelatinització) i permeten l'actuació dels enzims digestius sobre els enllaços químics de les molècules de glucosa del midó. Aquests aliments aporten importants dosis de proteïnes i són una de les bases de la nutrició humana, ja que la combinació de llegums i cereals assegura una proteïna d'alta qualitat i nombrosos nutrients. Sense el foc, aquests importants aliments no formarien part de la nostra dieta.

La utilització del foc va suposar un millor aprofitament de la proteïna de molts aliments i la possibilitat de mastegar una àmplia gamma de productes. Tot això va tenir una importància primordial en el desenvolupament del cervell dels humans; es pot afirmar que sense l'acció del foc en l'alimentació no seríem el que som.

Si el foc va fer possible l'evolució, ha fet i continua fent possible la supervivència perquè és el gran mitjà d'higienització de l'aigua i dels aliments; sense l'acció del foc, les toxiinfeccions destruirien les poblacions humanes.

Una altra important acció del foc sobre els aliments és la destrucció o la inactivació de substàncies tòxiques que contenen diversos aliments: substàncies inhibidores d'enzims, anti-vitamines, glucòsids cianogenètics o compostos que afavoreixen l'aparició del goll..., que poden comportar molts problemes de salut. Un exemple propi de països mediterranis és el latirisme per consum de lleguminoses dels gèneres *Lathyrus* i *Vicia*, que provoca debilitat i paràlisi muscular. Aquestes llegums es poden desintoxicar amb procediments tèrmics adequats. Una altra cocció beneficiosa d'un aliment molt habitual és la dels ous, la clara dels quals conté una glicoproteïna, l'avidina, que es combina amb una important vitamina, la biotina; aquest complex no es trenca per acció dels sucus digestius, per la qual cosa pot comportar una carència de biotina per deficiència d'absorció intestinal, però la cocció d'uns tres a cinc minuts a 100 °C fa perdre a l'avidina la capacitat de combinació amb la biotina. Processos tecnològics als quals estem tan habituats com la pasteurització o l'esterilització són modernes versions d'un domini fi i delicat del foc.

Les diverses cultures han utilitzat els materials combustibles del seu medi per sobreviure, i cada cultura té una cuina tradicional que ha estat condicionada des del punt de vista ecològic per l'entorn. Aquestes cuines es podrien classificar en dues categories:

1) Les cuines amb abundància de matèries combustibles en relació amb el nombre d'habitants; d'aquí vénen els rostits de grans peces de carn i les coccions prolongades de complexes preparacions culinàries, i fins i tot els luxosos, des del punt de vista energètic, forns de pa.

2) Les cuines de supervivència de poblacions molt nombroses, basades en el minuciós trossejament dels aliments que en permeten la cocció amb menys despesa energètica; així, les cuines orientals tenen la característica d'una presentació en petites porcions.

Interaccionar intel·ligentment amb el medi seria propi d'una civilització evolucionada que evita el malbaratament d'energia en totes les seves activitats, i una de les més importants és la de fer possible l'alimentació. Les modernes indústries d'alimentació i totes les cuines requereixen combustible o, dit d'una manera més general, energia per al seu funcionament. Però calen tota mena d'esforços per intentar controlar la despesa energètica, en benefici del medi i, per tant, en benefici de tots.

No hem d'oblidar que obtenim l'energia per viure a través de complexos cicles bioquímics. Alliberem l'energia d'enllaç dels nutrients que ens han arribat a través dels aliments, i aquests nutrients s'han format a partir de la funció clorofil·lica de les plantes, que incorporen energia solar. En definitiva, vivim gràcies al gran foc: el Sol.

L'alimentació dels humans és possible gràcies al medi i al foc.



**INSTITUCIÓ CATALANA
D'ESTUDIS AGRARIS
EL FOC, FONT DE VIDA,
A CÀRREC DE
JOSEFINA PLAIXATS BOIXADERA,
DE LA UNIVERSITAT
AUTÒNOMA DE BARCELONA**

La vida suposa un descens d'entropia, és a dir, integrar un material més o menys desordenat en unitats altament ordenades, com ho són els organismes vius. Per això es necessiten grans quantitats d'energia i l'única font d'energia suficientment abundant és l'energia radiant del Sol. Els únics organismes dotats d'un sistema capaç de transformar aquesta energia en una altra d'utilitzable per a tots els éssers vius, és a dir, en energia química, són les plantes verdes i els microorganismes fotosintètics. D'aquí es dedueix la gran importància de les plantes, atès que constitueixen la base de la vida sobre la Terra. És des d'aquesta perspectiva que analitzarem l'eficàcia de les plantes com a transformadores d'aquest extraordinari recurs natural que és el foc del Sol, font de vida.

1. INTRODUCCIÓ

La vida suposa un descens d'entropia, és a dir, integrar un material desordenat en unitats altament ordenades, com ho són els organismes vius. L'única font d'energia suficientment abundant és l'energia radiant del Sol.

Els únics organismes dotats d'un sistema capaç de transformar aquesta energia en una altra d'utilitzable per a tots els éssers vius, és a dir, en energia química, són les plantes verdes i els microorganismes fotosintètics. D'aquí es dedueix la gran importància de les plantes, atès que constitueixen la base de la vida sobre la Terra.

Així, el foc del Sol i la vida es troben lligats tan íntimament que són inseparables per naturalesa. És des d'aquesta perspectiva que analitzarem l'eficàcia de les plantes com a transformadores d'aquest extraordinari recurs natural que és el foc del Sol, font de vida.

2. LA RADIACIÓ SOLAR

El Sol és una estrella que es va formar fa 4.600 milions anys. Està formada per hidrogen (70 % de la massa solar), heli (29 % de la massa solar), oxigen, carboni, neó, nitrogen, silici, sofre, magnesi, ferro, sodi, alumini, argó i calci (<1 % de la massa solar). El Sol es troba a la meitat de la seva vida com a estrella.

La radiació solar es transmet com a llum i calor en forma d'ones electromagnètiques de diferent longitud i ha de recórrer 149,6 milions de quilòmetres fins al límit superior de l'atmosfera, on arriba amb una intensitat de $4.921 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}^{-1}$ (Duffie i Beckman, 1991).

El 31,3 % de la radiació rebuda en el límit superior de l'atmosfera és reflectida a l'espai i la resta penetra per l'atmosfera.

La radiació no reflectida travessa les capes atmosfèriques, de manera que un 19,6 % és retinguda. El 50,9 % restant arriba a la superfície de la Terra. Un cop la superfície terrestre ha absorbit la radiació, la retorna en forma de radiació d'ona llarga a l'atmosfera.

El Sol emet radiacions de diferents longituds d'ona: UV (200-400 nm), absorbides (3 %) majoritàriament per l'ozó; visibles (400-700 nm), que intervenen en les reaccions de la fotosíntesi (50 %), i infrarroges (700-4.000 nm), que corresponen a l'ona llarga (47 %) i són les responsables de l'escalfament de l'aire i el sòl i també de l'evaporació de l'aigua. La temperatura de la superfície terrestre, els moviments d'aire i del vapor d'aigua depenen en gran part d'aquest tipus de radiació.

3. LA FOTOSÍNTESI

La fotosíntesi és el procés mitjançant el qual les plantes capturen l'energia solar i la transformen en energia química, la qual permet sintetitzar els components cel·lulars dels vegetals.

L'aparició de la fotosíntesi oxigènica basada en la fotòlisi de l'aigua és probablement el fet més important en la història de la vida perquè ha permès desenvolupar organismes molt més actius. Aquest procés es realitza en uns suborgànuls cel·lulars que són els cloroplasts. En la seva estructura es distingeix els grana, que contenen els pigments fotosintètics capaços de captar l'energia lumínica, i l'estroma, on té lloc la biosíntesi dels hidrats de carboni.

Els pigments principals són les clorofil·les *a* i *b*. La síntesi d'un gram de matèria orgànica (m. o.) requereix el CO_2 contingut en 2.400 l d'aire.

Podríem pensar que aquest procés és potencialment infinit, però no és així. El sistema se satura, de manera que, per més intensitat de llum que arribi, no hi ha captació, com passa amb la majoria dels fenòmens que ocorren en les plantes. També se saturen els enzims que formen part de la biosíntesi d'hidrats de carboni perquè són lents. Així doncs, el rendiment de la fotosíntesi és molt baix (1-2%).

3.1. *Fotosíntesi i origen de la vida*

El nostre planeta va néixer fa aproximadament 4.500 milions d'anys. La informació geològica, geoquímica i bioquímica de què disposem deixa ben clar que la composició de l'atmosfera primigènica era molt diferent de l'actual. Al principi, i recents estudis ho avalen, estava composta per gas metà, amoníac, diòxid de carboni i vapor d'aigua (Houghton

et al., 1990; Cattling *et al.*, 2001). No hi havia ni nitrogen ni oxigen.

Es creu que fa 3.800 milions d'anys, en condicions ambientals reductores i amb un procés no del tot desconegut, varen aparèixer cèl·lules procariotes primitives anaeròbiques i heterotròfiques capaces d'autoduplicar-se (àcids nucleics).

Probablement, tot i que no és del tot segur, els primers organismes fotosintètics del planeta van ser les algues cianofícies o cianòfits (també dits *cyanobacteris*). En tenim un registre fòssil que data de 3.500 milions d'anys, i són els *estromatòlits* (precambrià). Els més antics que s'han trobat són els de Warrawoona (Austràlia).

El que sí s'ha constatat amb proves geològiques és l'existència de roques que es van formar en un ambient oxidant fa 2.500 milions d'anys, la qual cosa coincideix també amb la presència d'estromatòlits de cianofícies.

Una gran part d'estudis científics estan d'acord que va ser a partir de l'aparició dels cianòfits quan es va produir l'evolució bioquímica i biològica fins a arribar a les plantes verdes (Schopf, 1999).

L'aparició de la fotosíntesi oxigènica, tot i ser l'oxigen un subproducte de la fotosíntesi, va originar la desaparició massiva de molts microorganismes anaerobis ara fa 2.000 milions d'anys, de manera que la composició de l'atmosfera d'aquell moment i l'actual era ja bastant similar.

L'edat d'or de les cianofícies es va produir fa 580 milions d'anys. No és fins fa 400 milions d'anys que apareixen les primeres fanerògames; després, les plantes vasculars, les angiospermes i, finalment, les primeres gramínies.

Abans de l'aparició de les fanerògames, apareix la fauna de l'ediacarà, els primers cordats, que després es van convertir en artròpodes (400 milions d'anys), els amfibis (370 milions d'anys), els rèptils (310 milions d'anys), els dinosaures, (215 milions d'anys), els ocells (145 milions

d'anys), els primats (60 milions d'anys) i els homínids (2 milions d'anys).

Així, primer hi va haver un període de 1.000 milions d'anys d'evolució química, un període de 2.700 milions anys d'evolució bioquímica dominat pels procariotes, primer anaeròbics i després aeròbics, i finalment, fa 800 milions d'anys, s'inicià el període d'evolució eucariòtica.

La fotosíntesi és el procés que ha generat la vida en el nostre planeta i cal assenyalar que aquest fenomen fisiològic vegetal també ha experimentat la seva evolució. El resultat d'aquesta evolució és l'existència de tres sistemes diferents del procés fotosintètic que tenen relació amb la capacitat d'adaptació de les plantes al medi canviant.

3.2. *Fotosíntesi C₃*

Les plantes C₃ són aquelles en què el primer producte estable en el procés de la fotosíntesi és un compost de tres carbonis que forma part del cicle de Calvin (Bassham i Calvin, 1957). En aquest cicle s'incorpora CO₂ sobre la Ru5P (ribulosa-5-fosfat) mitjançant l'acció carboxilasa de l'enzim Rubisco, de manera que s'obté, entre altres productes, la formació de sacarosa i la regeneració de l'acceptor del CO₂. Però l'enzim Rubisco també presenta activitat oxigenasa i és la responsable de la fotorespiració i del rendiment baix de la fotosíntesi. La Rubisco és bifuncional i actua en un sentit o altre en funció de les condicions del medi. D'altra banda, cal assenyalar que aquest enzim representa entre el 20-30 % del contingut proteic de les plantes i és una de les proteïnes més abundants de la naturalesa.

El cicle de Calvin o cicle reductor de les pentoses fosfat és el sistema majoritari d'incorporació de CO₂ en els éssers fotosintètics oxigènics i també es troba en la fotosíntesi bacteriana.

na no oxigènica i en bacteris no fotosintètics. Tot això demostra que aquest cicle es va originar en organismes més primitius que les algues eucariotes quan l'atmosfera contenia concentracions més elevades de CO_2 i una baixa o nul·la concentració de O_2 d'acord amb l'esmentat anteriorment. Si l'enzim Rubisco ja era bifuncional, la menor concentració de O_2 impedia la funció d'oxigenasa i, per tant, no es produïa fotorespiració. Així, es pot considerar que la fotosíntesi C_3 és la base fonamental de l'autotròfia. El 85 % de les espècies són C_3 .

3.3. Fotosíntesi C_4

Les plantes C_4 són aquelles en què el primer producte estable en el procés de la fotosíntesi és un compost de quatre carbonis. Una característica important és que, en aquesta ruta metabòlica, la captació del CO_2 i la biosíntesi d'hidrats de carboni (cicle de Calvin) es troben separades en l'espai d'acord amb l'anatomia foliar de tipus *kranz* o en corona. D'aquesta manera, s'evita el procés de fotorespiració, amb la qual cosa aquestes plantes presenten un creixement elevat sobretot quan es troben en ambients de temperatures i radiació elevades. En general, la fotorespiració representa el 40 % de la fotosíntesi neta en les plantes C_3 , mentre que en les C_4 és pràcticament nul·la. És per això que les espècies C_4 tenen un gran interès en agricultura perquè són molt productives. Una de les espècies que més s'ha estudiat és el blat de moro (*Zea mays* L.) per la seva importància en alimentació humana i animal, del qual s'obté un rendiment fotosintètic de fins a un 4-5 %. Les espècies C_4 representen el 0,4 % del total. Existeixen dotze famílies, dos-cents gèneres i aproximadament mil espècies. Les principals famílies que tenen espècies amb aquest metabolisme són les boraginàcies, les ciperàcies, les compostes i les gramínies. El fet que no s'observa fotosín-

tesi C_4 en algues, briòfits, gimnospermes i angiospermes primitives fa pensar que aquest metabolisme és d'aparició posterior al C_3 .

3.4. *Fotosíntesi CAM (metabolisme àcid de les crassulàcies)*

Les plantes CAM són pròpies de climes càlids i generalment són plantes suculentas (Kluge i Ting, 1978) que emmagatzemen aigua en els seus teixits. En la fotosíntesi CAM, la captació del CO_2 i la biosíntesi d'hidrats de carboni es troben separades en el temps: nit i dia. Les plantes obren els estomes durant la nit i la captació de CO_2 forma àcid màlic, que s'acumula en els vacúols. Durant el dia és alliberat al citoplasma, es descarboxila i el CO_2 entra en el cicle de Calvin, és a dir, fent la ruta metabòlica C_3 .

Una característica important de les plantes CAM és que realitzen la ruta C_3 , quan les condicions ambientals són adequades. La fotosíntesi CAM queda limitada per la capacitat d'emmagatzematge dels vacúols. És per aquest motiu que a vegades s'expressa el metabolisme C_3 quan l'obertura dels estomes en condicions de llum encara és possible, com ho és al capvespre, i quan la temperatura és menys elevada. En conseqüència, les plantes CAM són essencialment adaptatives. Existeixen plantes que actuen amb metabolisme CAM durant algunes èpoques de l'any i com a C_3 en altres. Un exemple en són les pites (*Agave* sp.), que presenten metabolisme C_3 en climes més uniformes i CAM en zones climàtiques amb altes temperatures durant el dia i baixes durant la nit. Les plantes CAM presenten modificacions estructurals. Generalment, tenen cutícules gruixudes i impermeables, epidermis amb grans cambres d'aire, estomes protegits del vent; en definitiva, es tracta de reduir el procés

de transpiració. Amb tot, el resultat és que són plantes de creixement molt lent i, per tant, representen només avantatges en aquells ambients on la productivitat de les altres queda limitada per la magnitud de la fotorespiració i la temperatura elevada.

Se'n coneixen vint-i-sis famílies, més de dos-cents gèneres i més de mil espècies. Probablement n'hi ha uns quants milers més perquè algunes famílies tenen tots els seus representants amb aquest metabolisme. Entre aquestes famílies destaquen les euforbiàcies, les cactàcies, les crassulàcies... Hi ha famílies que inclouen espècies amb metabolisme C_3 i C_4 . Totes tenen un origen tropical o subtropical i són de condicions més aviat àrides. Això fa suposar que el metabolisme CAM és un exemple d'evolució convergent d'adaptació a les condicions ambientals.

3.5. *Fotosíntesi: adaptació de les plantes al medi*

De tot el fins aquí esmentat, es pot deduir que tant el metabolisme CAM com el C_4 semblen que són successos evolutius relativament recents.

Gil (1995) va postular que es pot establir una successió aproximada de tendències evolutives seleccionades per les modificacions ambientals respecte del carboni. El cicle C_3 basat en la carboxilació de la RuDP i la seva regeneració cíclica es pot considerar la base fonamental de l'autotròfia pel C. El cicle C_3 probablement es va produir de manera fàcil en el moment que els primers organismes fermentats es van trobar limitats per la reducció de l'existència de compostos de carboni reduïts abiòtics. De fet, el cicle de Calvin només va necessitar l'adquisició de dos enzims: fosforibulokinasa i Rubisco (Gil, 1995). Aquest fet va solucionar els problemes d'assimilació de carboni i la seva reducció tant

pel que fa als organismes quimiolitòtrofs com als fotosintètics (figura 1).

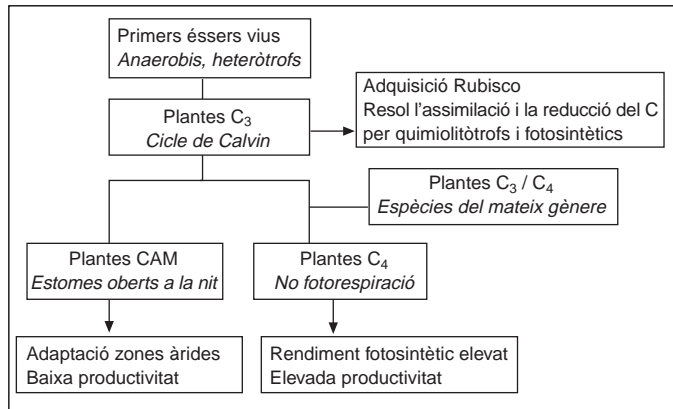


FIGURA 1. *Fotosíntesi: adaptació de les plantes al medi.*

212

Probablement l'estructura de l'enzim Rubisco era com l'actual i amb la doble funció. Però l'activitat d'oxigenasa en un principi no es devia expressar per l'absència d'oxigen en l'atmosfera. Al llarg del temps per la mateixa activitat fotosintètica es va començar a produir competència entre O_2 i CO_2 fins a arribar a la relació actual 630:1, cosa que va produir una reducció del rendiment de la fotosíntesi.

El metabolisme CAM sembla que és més primitiu que el C_4 perquè es troba entre pteridòfits, gimnospermes i angiospermes, mentre que el C_4 només es troba en angiospermes d'aparició més recent.

Tot i que alguns autors consideren el metabolisme CAM intermedi entre el C_3 i el C_4 , sembla que deriven d'una evolució paral·lela (Gil, 1995) (figura 1).

L'evolució del metabolisme C_4 és conseqüència de la temperatura i de la intensitat lumínica elevades i el dèficit hídric associat en aquestes condicions. Es considera que la

seva evolució es va iniciar amb l'aparició de l'anatomia *kranz* amb dos tipus de cèl·lules similars que tenien Rubisco i, al llarg del temps, va anar desapareixent del mesòfil juntament amb altres canvis enzimàtics.

Les plantes C_4 , en condicions ambientals poc favorables, presenten un creixement i una productivitat molt baixes. Quan es troben en àrees tropicals o subtropicals amb temperatura i radiació elevades, són molt productives, la qual cosa pot explicar que no romanguin en altres ambients. Aquest fet es veu quan se n'analitza la distribució geogràfica (figura 2). Les plantes C_3 presenten més capacitat d'adaptació en hàbitats de temperatura baixa, amb la qual cosa es troben per sobre els 45° de latitud, mentre que les C_4 es troben per sota. En latituds mitjanes, les C_4 són molt més productives a l'estiu, mentre que les C_3 ho són a la primavera i la tardor. També hi ha relació amb l'altura sobre el nivell del mar, de manera que les CAM són les que es troben a nivell

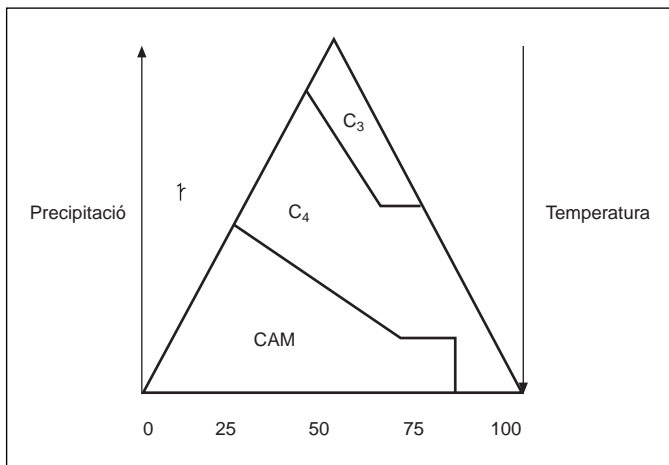


FIGURA 2. Distribució d'espècies segons el seu metabolisme fotosintètic. Gradient d'altura, precipitació i temperatura. FONT: Gil (1995).

més basal; a continuació, hi ha les C₄, i, a les cotes superiors, les C₃ (Gil, 1995).

Finalment, cal indicar que l'actual augment de la concentració de CO₂ com a conseqüència de l'activitat humana produeix cada vegada més una resposta a les plantes que tendeix a un major creixement i productivitat (Llebot, 1997). Les plantes C₃ en resulten molt beneficiades pel fet de la disminució de la fotorespiració i l'augment de la carboxilació, la qual cosa podria fer desaparèixer els metabolismes C₄ i CAM. Però cal considerar també l'augment progressiu de la temperatura i el consegüent augment de l'aridesa, que podria actuar en favor del millor balanç hídric que presenten aquests dos metabolismes fotosintètics.

4. RENDIMENT ENERGÈTIC I PRODUCCIÓ PRIMÀRIA DE LA VEGETACIÓ

El procés fotosintètic necessita 2,25 kcal per gram de diòxid de carboni assimilat. La utilització de la radiació per la fotosíntesi pot arribar en fulles aïllades i condicions ambientals òptimes a uns valors de rendiment fotosintètic aproximadament del 15% en plantes C₃ i fins a un 24% en les C₄. Tot i això, en general les fulles treballen entre 0-5%.

Les comunitats vegetals durant el període de producció treballen amb un grau de rendiment en general per sota del 2-3%. A la taula 1 es pot observar el rendiment de la fotosíntesi en el món. Les comunitats vegetals amb major rendiment són els boscos tropicals i els planifolis. Les prades i les pastures contribueixen amb una quantitat relativament petita al total del carboni si els comparem amb les regions boscoses.

Els cultius presenten com a valor mitjà el 0,60%. Cal indicar que alguns conreus intensius poden presentar un ren-

diment molt més elevat, com és el cas de l'arròs, que pot arribar al 6%. Les pràctiques agrícoles i el maneig dels boscos poden tenir un efecte significatiu sobre el cicle global del carboni. Els sòls agrícoles han perdut aproximadament la tercera part del seu carboni original. Llaurar la terra incrementa l'activitat microbiana del sòl i el converteix més ràpidament en diòxid de carboni. L'agricultura, fent ús de pràctiques alternatives de cultiu i reduint l'ús de fertilitzants químics, pot contribuir a disminuir la concentració de diòxid de carboni de l'atmosfera i afavorir, així, que quedi més carboni al sòl.

TAULA 1. *Rendiment energètic de la vegetació*

	<i>Energia química</i> <i>kcal m⁻² any⁻¹</i>	<i>Radiació aprofitable</i> <i>kcal 10⁻³ m⁻² any⁻¹</i>	<i>Eficiència</i> <i>(%)</i>
Boscos planifolis	4.600	440	1,0
Vegetació escleròfila	3.900	600	0,65
B. tropicals humits	8.200	560	1,5
Bosc boreal	2.400	320	0,75
Tundra	600	240	0,25
Deserts	300	720	0,04
Conreus	2.700	440	0,60
Pastures tropicals	2.800	560	0,50
Pastures temperades	2.000	400	0,50
Oceans	2.200	480	0,47

FONT: Larcher (1977) i Houghton (1995).

Segons els càlculs de diferents autors (Lieth, 1972; Houghton, 1995), en tota la Terra les plantes fixen anualment $151,0 \cdot 10^9$ tones de carboni, de les quals el 61% corresponen a terra ferma i el 39% restant, a les aigües. Lògicament, si el rendiment fotosintètic és molt baix, una producció primària elevada només es donarà quan hi hagi una combinació de factors ambientals òptims —temperatura, radiació, aigua i nutrients minerals. Aquesta combinació la trobem en la zona tropical (taula 2).

TAULA 2. *Producció primària de la Terra*

	<i>Superfície (10⁶ ha)</i>	<i>Carboni Tones ha⁻¹ any⁻¹</i>	<i>Carboni Tones 10⁹ any⁻¹</i>
Boscos caducifolis	700	4-25	7,0
Boscos mixtos (total)	650	2,5-25	6,2
B. tropicals humits	1.700	10-35	34,0
Boscos verds humits	750	6-35	11,3
Bosc boreal	1.200	2-15	6,0
Total	5.000		64,5
Estepes i tundra	2.600	0,1-2,5	2,4
Deserts	2.400	0,-0,1	—
Conreus	1.400	1-40	9,1
Prats i pastures	2.400	1-20	15,0
Aigües continentals	400	1-40	5,0
Total	9.200		31,5
Oceans	36.100	5-40	55,0
Total Terra	50.300		151,0

Font: Lieth (1972) i Houghton (1995).

Estudis recents a escala regional (Ramakrishna, 2003) indiquen que la producció primària neta (PPN) ha augmentat considerablement (6,17 %) els darrers vint anys en latituds mitjanes i altes de l'hemisferi nord i dels tròpics a causa de l'augment de la temperatura i de la radiació. Cal tenir en compte, però, que són evidències detectades en àrees localitzades, no a escala global.

5. PRODUCCIÓ PRIMÀRIA I PRODUCCIÓ D'ALIMENTS

5.1. *Producció primària i cadena tròfica*

L'eficiència energètica de la producció primària és baixa i també segueixen tenint una eficiència baixa els fluxos d'energia entre els diferents nivells tròfics. En una cadena tròfica natural, de les plantes als herbívors i als carnívors, l'eficièn-

cia es troba al voltant del 10%. Com més nivells de consumidors hi ha al llarg d'una cadena tròfica, menys proporció de la producció primària arriba als darrers nivells. El 90% restant s'inverteix en el funcionament dels organismes implicats (Ros, 1994).

5.2. Producció primària i producció d'aliments

En una explotació agrícola intensiva es poden obtenir valors de productivitat primària molt més elevats dels que s'obtidrien en una comunitat vegetal natural en les mateixes condicions ambientals. Això es deu a l'aportació d'energia externa per part de l'home: maquinària, combustible, adobs, fitosanitaris, etc. A la taula 3 es pot observar la diferència dels paràmetres de producció d'un conreu d'arròs intensiu i un conreu tradicional. Amb l'aportació d'energia externa es pot augmentar molt la producció per tal d'obtenir una font considerable d'aliments directament aprofitables per l'home, però el que no es pot augmentar és l'eficiència.

217

TAULA 3. *Energia necessària per a la producció d'arròs*

	<i>Agricultura intensiva</i>	<i>Agricultura tradicional</i>
Consum total d'energia (kcal · 10 ³ /ha) (C)	64.648	172,0
Rendiment (kg/ha)	5.800	1.250
Rendiment (kcal/ha) (R)	21 · 10 ⁻⁶	4,5 · 10 ⁻⁶
Eficiència (R/C)	0,32	26

FONT: FAO (1970), modificat per Ros (1995).

Tot i això, cal assenyalar que l'eficiència d'aquests cultius no arriba als valors que podrien ser possibles pel fet que no sempre es tenen en compte les condicions climàtiques de l'àrea de conreu, les característiques del sòl i les espècies i varietats adients.

En el cas de la producció ramadera, també hi ha gran diferència entre la producció intensiva i l'extensiva. Per posar-ne un exemple, amb $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ d'herba de pastures naturals obtindríem 100 kg de carn de xai. En el cas de la producció intensiva, necessitaríem 3 kg de gra de cereal per obtenir 1 kg de carn de pollastre, 5 kg per 1 kg de carn de vedella i 7 kg per 1 kg de carn de porc. A més, s'ha de tenir en compte la despesa energètica que suposa l'ús de productes farmacològics per combatre les malalties parasitàries i infeccioses dels animals criats en règim d'estabulació.

Actualment, per tant, es poden aconseguir rendiments elevats de producció tant pel que fa a les espècies vegetals com les animals, però s'ha de tenir en compte que aquest fet està relacionat amb l'ús d'un petit nombre d'espècies i varietats i amb l'aportació d'energia extra.

Finalment, caldria dir, i tornant a l'inici, que les plantes verdes constitueixen la base de la vida sobre la Terra perquè tenen la capacitat de produir matèria orgànica, que constitueix l'aliment dels animals i de l'home a partir de l'energia radiant del Sol, el foc com a font de vida.

BIBLIOGRAFIA

- BASSHAM, J. A.; CALVIN, M. (1957). *The path of carbon in photosynthesis*. Indianapolis: Englewood Cliffs. Prentice Hall.
- CALVIN, M. (1962). «The path of carbon in photosynthesis (nobel prize lecture)». *Science*, núm. 135, p. 879-889.
- CATLING, D.; ZAHNLE, K.; MCKAY, C. (2001). «Biogenic nothane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early earth». *Science*, núm. 293, p. 839-843.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*. Nova York: John Wiley and Sons.

- GIL, F. (1995). *Elementos de fisiología vegetal*. Madrid: Mundi-Prensa.
- HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; CALLANDER, B. A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. (1996). *Climate Change 1995*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KLUGE, M.; TING, I. P. (1978). *Crassulacean acid metabolism*. Heidelberg: Springer Verlag.
- LARCHER, W. (1980). *Physiological plant ecology*. Berlín: Springer Verlag.
- LIETH, H. (1972). «Phenology in productive studies». A: RICHLE, D. [ed.]. *Analysis of temperate forest ecosystems*. Berlín: Springer.
- LLEBOT, J. E. (1997). *El canvi climàtic*. Barcelona: Rubes.
- RAMAKRISHMA, R. (2003). *Science*, núm. 300 (5626), p. 1560-1562.
- ROS, J. (1994). «Homo energeticus». *Medi Ambient*, núm. 10, p. 6-15.
- SCHOPE, J. W. (1999). *Cradle of life: The discovery of earth's earliest fossils*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.



**INSTITUCIÓ CATALANA
D'ESTUDIS AGRARIS
EL FOC, COADJUVANT
EN LA PRODUCCIÓ
D'ALIMENTS,
A CÀRREC DE
CARLES BERNAT,
DE L'ESCOLA SUPERIOR
D'AGRICULTURA DE BARCELONA**

El foc ha estat, i és encara en bona part del món, i també a casa nostra en una certa mesura, una eina eficaç i poderosa que ajuda el pagès en alguna de les seves tasques més feixugues. Darrerament s'ha parlat força dels sistemes tradicionals a la Selva Amazònica de «tala i artiga» o «crema i artiga».¹ Es tracta, en definitiva, del sistema més ràpid, més pràctic i, per tant, més econòmic, d'eliminar la vegetació espontània per poder cultivar. L'acció de cremar el rostoll de cereal obeeix, en part, a aquest mateix criteri: s'elimina una part de matèria orgànica, que, evidentment, podria ésser útil, però sovint el temps disponible és un element més valuós. No poden oblidar el risc que implica aquesta operació, però duta a terme en les condicions requerides i amb criteris racionals no es pot deixar de banda.

Cal esmentar també els efectes desinfectants del foc, o de la calor que genera, pel sòl o per zones específiques d'aquest, en plantacions d'arbres, per exemple. Un altre exemple de la utilitat del foc és la conversió en matèria fertilitzant, encara que pobra, de matolls, herbes i brancatge que es crema, o es cremava, en clots, coberts de terra (formiguers).

No podem oblidar el paper del foc, amb combustibles ben diversos, en la lluita contra les gelades en determinats cultius intensius, per exemple els fruiters.

1. INTRODUCCIÓ

El foc ha estat, des del moment que l'home va aprendre a dominar-lo, a mantenir-lo, a transportar-lo i, més endavant, a generar-lo a voluntat, una eina potent i eficaç, que encara s'utilitza força, fins i tot en les agricultures més avançades.

S'ha dit del foc que «és un bon criat, però un mal

1. Del castellà «tala y roza» i «quema y roza».

amo», referint-se, sens dubte, al fet que, mentre està sota control, el foc és aquesta eina eficaç que esmentàvem, però en el moment que es perd aquest control el foc pot esdevenir un element terriblement destructiu.

En aquest sentit, al nostre país, i en altres de clima similar, mediterrani, en els darrers anys s'ha generat un cert sentit de por, evidentment justificat pels notables estralls ocasionats, al foc, en general, i a les seves utilitzacions tradicionals dintre de l'activitat agrícola. Els incendis forestals, més freqüents, i en moltes ocasions devastadors, han generat una postura, que podríem titllar de radical, en contra d'aquestes utilitzacions.

Sovint, quan es discutia aquest problema, hom esmentava el cas australià, paradigmàtic, d'ús sistemàtic del foc en incendis provocats, per netejar, mantenir, controlar els boscos d'aquell país llunyà, i que teníem per exemple de tècniques avançades en silvicultura. Ignoro si, en els darrers anys, en què s'hi han produït gravíssims incendis, aquests criteris han estat qüestionats. No he tingut informacions que s'hagués establert, en algun cas, una relació directa entre alguns dels grans incendis que han arribat a posar en perill alguna de les grans ciutats amb incendis provocats per criteris «agronòmics», però no hi ha dubte que davant del risc s'hauran revisat determinats criteris.

A casa nostra es podria considerar un cert paral·lelisme amb aquesta situació. Els pagesos sempre havíem fet servir el foc per a determinades tasques i, si aquestes es realitzaven en les condicions correctes, rarament ocasionaven problemes. La situació al camp, alguns dirien malauradament, nosaltres no n'estem tan segurs, ha canviat molt just en els darrers anys, i aquelles «condicions correctes» són sovint difícils de reproduir. Ja insistirem en aquest argument, però fonamentalment, no tants anys enrere, hi havia molts pagesos, molta gent, al camp. Ara n'hi ha molt poca!

Una utilització agrícola del foc que també és mil·lenària, i de la qual la nostra civilització ha començat a ocupar-se fa relativament pocs anys en el moment que ha aparegut —i s'ha popularitzat— la preocupació per les selves verges que resten al món, és el sistema anomenat de «tala i artiga» o «crema i artiga», utilitzat pels indígenes de l'Amazònia per anar posant en cultiu successives porcions de llur territori. Com veurem més endavant, aquest sistema no és pas exclusiu d'aquestes selves i, com totes les activitats humanes, pot ser més o menys agressiu amb el medi ambient.

2. CANVIS IMPORTANTS I RECENTS EN EL MÓN RURAL

Anem a veure, per començar, quins canvis s'han produït en el nostre entorn rural que han afectat considerablement les possibilitats de la utilització del foc com el que havia estat sempre, un bona eina. Evidentment sempre ha existit el risc que un foc se'ns escapés de les mans i ocasionés algun problema, més o menys greu. Aquest risc, però, fins fa relativament pocs anys ha estat «assumible»: els avantatges, clars, de la utilització del foc ultrapassaven de llarg els eventuals i possibles inconvenients. Avui en dia, el risc s'ha incrementat molt i els avantatges han estat, en certa mesura, reduïts per les noves tècniques alternatives.

La dràstica disminució de la població, de la població agrícola, que no rural, en particular, n'és un dels factors clau. L'explicació és ben senzilla: hi havia gent per «vigilar» el foc, i quan aquest, per circumstàncies estranyes, «s'escapava», hi havia prou gent per apagar-lo. Aquesta gent ja no hi és!

Una altra qüestió de densitat, la densitat de matèria combustible en els principals elements de risc, són els boscos. Quan hi havia més població agrícola, els boscos es netejaven, però no perquè la gent s'avorrís o per criteris estètics, per

facilitar les passejades. A manca d'altres combustibles, que més tard van aparèixer, la transformació del brancatge inferior, dels matolls del bosc en carbó era una activitat corrent que mantenia el bosc prou net; el consum de llenya en les llars i en les cuines era també molt habitual. Hi havia més pastura, ja que encara que hi hagués menys animals, hi havia més pastors. Això també ajudava a mantenir el bosc net.

En el canvi d'aquestes circumstàncies ha tingut també una bona part de responsabilitat l'aparició dels nous combustibles —butà, gasoil— i la generalització del seu ús a pagès.

A la maquinària agrícola també es pot atribuir una part de la responsabilitat dels canvis. Ha influït molt en la disminució de la població agrícola; ha facilitat determinades tasques, que amb les màquines es poden fer, fàcilment, sense l'ajuda del foc; n'ha permès d'altres que abans exigien moltes hores de mà d'obra, en una tasca feixuga, i per tant resultaven costoses.

Els adobs químics, i la generalització del seu ús, també han influït, en part, en l'abandonament de determinades pràctiques, sobre les quals insistirem més endavant, d'aprofitament de material combustible transformant-lo en un cert tipus d'adob.

225

3. QUÈ FEM ENCARA, AVUI DIA, AMB FOC?

Jo diria que, des de sempre, el foc s'ha emprat per destruir, de la manera més ràpida i econòmica, per tant, eficaç, els diferents tipus de rebuig generats per l'activitat agrícola. Ben sovint aquest rebuig no ho és del tot, i una part més o menys important es pot aprofitar. El cost de la recollida, el transport i, en ocasions, la transformació (tallar la llenya, per exemple, a dimensions que la facin utilitzable en llars de foc, estufes, cuines) pot condicionar, en bona part, aquest aprofitament.

Quan no hi havia gaires alternatives tot era bo d'arreglegar; en un moment en què podem dir que «hi ha de tot, i força», l'aprofitament de determinats o de gairebé tots els residus esdevé una qüestió fonamentalment econòmica. I ben sovint, a més, una de les coses que gairebé mai no sobra i que, per tant, és cara, és la disponibilitat de mà d'obra.

Els residus de collita es poden arreglegar, compostar i emprar com a font de matèria orgànica o de nutrients en general. Aquesta operació, però, pot tenir un cost superior al de l'adquisició d'aportacions equivalents en el mercat, i aleshores resulta molt més pràctic arreglegar-ho en una zona adequada i cremar-ho. És cert que perdem o malbaratem una determinada quantitat de recursos (matèria orgànica, en particular, de la qual els nostres sòls no van sobrats), però volerlos aprofitar implicaria disminuir la rendibilitat o l'eficàcia de l'activitat principal. És cert també que cremant aportem a l'atmosfera un afegitó de carboni; però no és ben cert, també, que la contaminació paisatgística i visual que sovint representen aquests mateixos residus apilats de qualsevol manera, i un any rere l'altre, a les vores dels camins i dels camps pot considerar-se igualment dolenta?

Quan s'ha arrencat, per exemple, una plantació de fruiters i cal eliminar el brançam i les soques per poder llaurar la parcel·la, aquesta operació té un cost determinat, en funció, sobretot, de la mà d'obra necessària per dur-la a terme. La llenya pot tenir un preu determinat: els troncs i les soques, la resta gairebé no. L'operació de separar aquests troncs de la resta ja té un cost. Si la llenya el paga, es pot pensar a fer-ho. En cas contrari, el més pràctic és, sens dubte, apilar-ho al centre de la parcel·la, on el risc que s'escampi sigui mínim, i encendre-ho. Aquesta feina d'arreglegar i amuntegar, a més, avui dia es pot fer amb un tractor i un arreu especial, prou senzill, i per tant barat, a un cost molt reduït. Per carregar-la a un remolc i, després del transport i la descàrrega, es-

tibar-la en condicions, cal una certa quantitat de mà d'obra. El preu, o el valor de la llenya, també ho ha de cobrir.

Aquest mateix raonament es pot aplicar a la neteja de marges, o vores, amb diferents tipus de vegetació més o menys fàcils de manejar. Les bardisses, per exemple, no ho són gens. En el moment adequat, no hi ha cap dubte que el mètode més eficaç per assolir l'objectiu, tenir el marge net, és el foc. Es tracta, evidentment, de vigilar-lo, aquest foc, i si és un home sol qui fa la feina, cal que no posi foc a tres punts allunyats d'un quilòmetre i que eviti els dies ventosos. La feina que pot fer aquest home, amb una caps de llumins i un diari vell, equival a la que en farien tres o quatre, o més, estassant, i després arreplegant, i finalment cremant en un lloc o altre!

Cremar el rostoll és una altra d'aquestes utilitzacions tradicionals del foc que les condicions actuals pràcticament han dut a prohibir. I quan s'ha fet durant tants anys és que n'hi havia alguns motius. Avui dia, que tenim tractors de 150 CV amb arades de pala giratòria que poden ser arrossegades a altes velocitats, un rostoll no gaire alt no fa gaire nosa. I encara que no aporti gaire cosa al sòl, sí que hi aporta una certa quantitat de matèria orgànica i en millora lleugerament l'estructura. Però el pobre «llaurador xicotet», com deia un amic valencià, que anava amb una mula arrossegant una sola rella, a no gaire profunditat i no gaire de pressa, sí que ho trobava clarament més fàcil amb el rostoll cremat.

Una tècnica encara emprada avui dia, de la qual esmentarem més endavant precedents històrics, és la de cremar feixos de llenya, o de palla, en els clots preparats per trasplantar arbres. És evident que es tracta d'una operació difícilment realitzable en grans plantacions, però que resulta molt eficaç en arbres de jardí o en petits horts. L'efecte del foc, la calor, controla una bona part dels eventuais paràsits del sòl, i les cendres aporten una certa fertilització mineral.

La tècnica moderna també ha incorporat el foc en algunes tasques. Fa aproximadament vint-i-cinc anys, quan van aparèixer els polvoritzadors hidropneumàtics, i en particular els portats a l'esquena de l'operari, una de les seves possibilitats d'utilització era com a «llançafomes». La doble sortida d'aire i líquid permetia encendre un doll de combustible que s'emprava per posar foc de manera ràpida on convingués, als marges, que hem esmentat, o a piles de residus que, per qüestions sanitàries, convingués eliminar ràpidament. Almenys a casa nostra, a causa de l'increment del risc que hem comentat, la seva utilització ha minvat força en els darrers anys.

Un altre ús del foc, aquest força recent, en agricultura és la realització d'una feina tradicional, manual, l'«espampolatge» de la vinya mitjançant calor. La «màquina», una bombona de butà o de propà i unes plaques d'infrarojos, arrossegada per un tractor passa entre les tires de vinya, a una distància i a una velocitat adequades perquè la calor «torri» les fulles tendres més properes, les exteriors, que en uns dies s'assecaran i cauran. L'invent procedeix d'un país menys propens que el nostre a incendis, Suïssa, però a casa nostra ja se n'ha fet diverses proves i sembla que és prou eficaç.

Volem insistir en el cas de cremar els rostolls, que ha estat una tècnica universalment emprada, la qual continua essent habitual en moltes zones del món i, a casa nostra, ha estat pràcticament prohibida, cosa que alguns lamenten. Efectivament, el risc d'incendis és molt greu, les conseqüències d'aquests poden ser terribles i, per tant, tota precaució és poca. També cal dir que els nostres sòls, en una molt gran majoria, són pobres en matèria orgànica i, per tant, el malbaratament d'aquesta que representa cremar el rostoll és lamentable. Però cal recordar que el cost principal en molts cultius, i en el dels cereals en particular, és l'ús de la maquinària, i dintre d'aquesta, la de les feines de preparació

del sòl. I no hi ha dubte que gairebé sempre els camps lliures de rostoll són més «fàcils» de llaurar. I més fàcils vol dir sovint més «ràpids», i moltes vegades el temps és un factor essencial en el seguit d'operacions agrícoles que tenen, un any sí i l'altre també, complicacions climàtiques. Es tracta, doncs, com en molts altres casos, d'una qüestió econòmica: cal valorar avantatges i inconvenients, i prendre la decisió en funció d'aquesta valoració.

També podem esmentar la tècnica de cremar pastures, sobretot per tal de regenerar-les. Els inconvenients són semblants al cas anterior, del rostoll. Des del punt de vista agronòmic, en aquest cas sembla que no hi ha dubte que es tracta d'una pràctica positiva. Cal avaluar molt bé, però, el risc que el foc s'escampi, els mitjans de què es disposa per controlar-lo i les característiques dels veïnats, immediats i no tant, de cara al perill d'incendi.

4. REFERÈNCIES HISTÒRIQUES DE L'ÚS DEL FOC EN AGRICULTURA

Hem dit a l'inici d'aquesta intervenció que el foc s'ha emprat des dels primers temps de la humanitat. Les primeres utilitzacions foren les d'oferir calor, mantenir allunyats els animals salvatges, coure els aliments. Progressivament se li van trobar altres usos, com les transformacions de diverses matèries. En agricultura, les primeres utilitzacions foren, sens dubte, de tipus destructiu per eliminar la vegetació espontània i disposar d'espai lliure per fer créixer els primers cultius. No he trobat referències en tractats de prehistòria d'eventuals utilitzacions del foc en tasques agrícoles específiques. Es pot pensar que emprar el fum per allunyar i mig estabornir les abelles per tal de poder treure la mel dels ruscós naturals, gairebé exactament com el que fem avui dia en les arnes

construïdes pels homes, és una tècnica segurament prehistòrica. He llegit recentment en una novel·la (que indica, però, que l'autora «s'ha documentat a bastament en les fonts més ben informades») que el foc es va usar molts anys abans de les referències escrites, en ajudar a donar forma a diferents eines de fusta, algunes, sens dubte, de les emprades en els primers treballs del sòl; que el sílex es treballava molt millor si s'havia escalfat prèviament, en tallar-lo per fer armes o eines.

Maroto, un dels grans autors moderns de les tècniques agrícoles, en la seva *Historia de la agronomía* (1998), esmenta: «[...] importantes yacimientos neolíticos en Cataluña [...]. Como característica más sobresaliente de esta agricultura neolítica mediterránea puede señalarse, por ejemplo, que el uso del fuego y la cremación de rastrojos y otros elementos del bosque para la preparación de terrenos de cultivo era una práctica habitual».

L'autor llatí Columela, l'any 3 aC, en l'edició dels seus llibres d'agricultura, traduïts l'any 1824 per Juan María Alvarez de Sotomayor y Rubio, diu en el llibre 2, en l'epígraf «Cómo se mete en cultivo un sitio inculto y se hace de labor»: «Los terrenos cubiertos de árboles y matas hay dos modos de reducirlos a cultivo; o arrancando unos y otros de raíz y echándolos fuera o, si están claros, cortándolos entre dos tierras solamente, quemándolos, y arando la tierra». En el llibre 5, *De los árboles frutales, su plantío, su cultivo*, trobem: «Un año antes que quieras plantarlos, abre los hoyos [...]. Pero si quieres hacer los hoyos y plantar los árboles el mismo año, ábrelos con dos meses de anticipación, y en seguida caliéntalos con paja que quemarás dentro de ellos.»

En l'*Agricultura general*, d'Alonso de Herrera (1513), en l'edició crítica d'Eloy Terán, publicada l'any 1996 pel Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, llegim en el llibre tercer, capítol VI, «De cómo han de hacerse los hoyos para poner y trasponer árboles, y en qué tiempos»:

«[...] será bueno echarle un poco de estiércol para que se pudra allí y dé substancia a la tierra, o híchanlas de paja, o serojas, y denle fuego para que el agua incorpore la ceniza, o estiércol, con la tierra». Insisteix més endavant que, en aquells casos en què el clot no s'ha pogut fer un any abans, «[...] sea, a lo menos, 2 meses antes, y quemem en los hoyos lo que dicho tengo».

En el *Libro de agricultura*, del doctor excelente Abu Zacarías Iahia, traduït per Josef Antonio Blanqueri l'any 1802, en el capítol 29, article VI, «Propiedades graciosas para que los árboles fructifiquen fuera de tiempo quemando algunas ramas de los mismos al pie de otros, según la Agricultura Nabatea», llegim: «quemando ruda hacia los pies de los rosales [...] juntando la ceniza que se quemó [...] cubriendo con ella, mezclada con la tierra [...] para el nogal, quema ramas de azufaifo al pie de él [...] peral, albaricoque, quemará hacia el pie leña de plátano y de almendro [...]». Més endavant, podem llegir: «En cuanto a curar el árbol intermitente, que es el que dando fruto un año lo deja de dar otro, —se dice— que alrededor de él a dos codos de distancia se haga una excavación no profunda en la cual se encienda fuego de hojas de palma y de ramas secas deshojadas del mismo árbol [...]». També trobem alguna referència a diferents «sahumerios», com a remei per allunyar «animales dañosos, especialmente insectos; langostas, grillos; ratones silvestres, salamanquesas, gusanos, serpientes y las víboras de las viñas, heredades y de las casas».

En un altre llibre àrab, *El libro de agricultura de al Awam*, en el capítol XIV, «De la curación de los árboles [...]», a propòsit del podrit del raïm, es diu: «[...] se pudre la mitad del racimo», i proposa com a solució, en l'epígraf 27: «Añade Kutsami que si no logran así aquel efecto tomen algunos hombres cada uno en su mano un manojo de cinco cañas, o de otra cosa equivalente, y encendidas las arrimen a los raci-

mos donde empiece la corrupción, repitiendo ésta algunas veces a lo largo de una semana [...] y que si no bastare, se enciende un poco fuego que levante llamas en torno de la vid». Aquest mateix llibre fa també referència a diferents «sahumerios», definint-los com a «humo producido por la quema de estiércol o maderas que “molesten” al insecto y creen un ambiente más seco», o bé com l'«aplicación de cenizas que pueden tener efectos caústicos y, al menos, interferir con la vida «normal» del insecto». Encara en el mateix llibre, i en el capítol esmentat, en l'epígraf 18, «Acerca de las nieblas», diu que «el remedio para esto es que tomando un competente número de personas portando porciones de cañas encendidas den vueltas con ellas de noche entre las vides».

Veiem, doncs, que el foc ha tingut nombroses aplicacions en l'agricultura tradicional al llarg de la història. En l'esmentada *Historia de la agronomía*, de Maroto, trobem també una referència de Jethro Tull (1674-1741), que a més d'un grup musical actual, em sembla que de rock o d'alguna cosa similar, en tot cas sorollosa, fou un homenot anglès molt vinculat amb l'evolució de l'agricultura, en particular amb les primeres manifestacions de la mecanització. Diu Maroto que Jethro Tull «aseguraba que no se conocían todavía los fundamentos de la nutrición vegetal aunque a pesar de ello los pilares de la misma eran:

- el nitro
- el agua
- el aire
- el fuego (sin calor no crecen las plantas)
- la tierra.»

Alguna d'aquestes tècniques esmentades, amb modificacions prou lleugeres, encara s'empra avui en dia. En plantacions de fruiters, per exemple, per evitar els danys de les gelades, no podem fer passejar grups de gent «competente», amb feixos de canyes encesos, però disposem cremadors, a

determinades distàncies, i amb combustibles diferents, bé per fer fum, bé per intentar elevar lleugerament la temperatura en nits de glaçada. Cosa que no sempre s'aconsegueix! Si la glaçada no és gaire intensa i poguéssim posar un fogó sota cada arbre...

5. ELS FORMIGUERS

Una altra tècnica agrícola que emprava el foc, de la qual trobem referències bastant antigues i que particularment a Catalunya ha durat ben bé fins a principis del segle passat amb la generalització de l'ús dels adobs químics, és la dels formiguers.

En el pròleg de Jordi Peix, al llibre *Ecologia del foc*, edició coordinada per Jaume Terrades (Proa, 1996), parlant de l'evolució del bosc a Catalunya, llegim:

Les restes d'esporga, tant sarments com branques d'alzina o de pi blanc, es «reciclaven», com diríem avui, fent formiguers —amuntegant-los, colgant-los de terra i carbonitzant-los—, que mantenien la fertilitat dels camps de conreus i van ser fins a la primèria del segle un element bàsic de la fertilització, fins a l'aparició dels adobs.

En l'*Enciclopedia Espasa*, edició de 1925, trobem en l'entrada *hormiguero*, sota l'epígraf *Agr.*, la definició següent:

La práctica de esta operación consiste en distribuir sobre la tierra que se quiere beneficiar haces de broza seca, ramajos, cañamiza, sarmientos o leña de los campos, cubriéndolas con terrones arrancados del suelo, dejándolos secar primero y encendiendo la leña después

se quema incinerándose y esparciendo las cenizas por el campo, quedando éste en condiciones de dedicarse al cultivo. Las ventajas [...] además de la destrucción de las malas hierbas y raíces de plantas adventicias que las infectan, destruyen insectos perjudiciales, corrige los terrenos ácidos [...].

En varias provincias de España se practica [...].

En varios sitios montañosos de Cataluña, donde escasea el estiércol, y las tierras son arcillosas [...].

En el *Costumari català: Usos i costums de bon pagès sobre boscos i arbredes*, edició facsímil, d'Edicions del Cotal, 1980, trobem les definicions següents:

formiguer: un altre nom que es dóna al formigó.

formigueres: un altre nom que es dóna als formigons, a la Selva.

formigó: el feix de dos caps de brancada i arbúcia, d'un peu aproximadament d'ample i 2,5 o 3 de llarg. El formigó s'utilitza per cremar-lo en el camp, cobert de terrossos. De vegades es fa solament amb arbúcia.

composta, o **formigó empordanès:** a més de branca i arbúcia s'hi posa també estella.

boïc: nom lleidatà del formigó.

boïga: nom que es dóna a l'artiga, en diverses contrades, com les lleidatanes i el Ripollès:

«L'operació *de fer una artiga* consisteix a arrencar un tros de terra, si és possible fent gleves, o almenys, terrossos, cobrir després l'arbúcia i la llenya del tros artigat, amb les gleves posades d'arrels enfora, i els terrossos formant petites piles, cremar-ho i escampar després la terra cremada per a sembrar.»

En el ja esmentat *Agricultura general*, d'Alonso de Herrera (1513), en el llibre quart, capítol V, «De las maneras y el tiempo de estercolar...», podem llegir:

[...] y por eso, donde no se riega y es tierra muy seca, mejor es cieno, o ceniza, que no estiércol de animales salvo si es tan podrido [...].

[...] y con la ceniza estercolar sus tierras, porque la ceniza da mucha virtud, y no quema la tierra como lo hace el estiércol.

Gairebé com a curiositat, en un llibret entranyable, de Narcís Fages de Romà, *El amic dels llauradors ó aforismes rurals*, de 1853, «traduït al valencià per un amic dels llauradors», podem llegir:

En certs camps el formiguer
És molt millor qu'el femer
En terreno pantanós
Casi sempre és profitós
Y acaba en els arrails
Més que siguin com a fils.

235

Això coincideix força amb el concepte recollit just abans, d'Alonso de Herrera.

Retrocedint molt més en el temps, Paladio, en el seu *Tratado de agricultura. Medicina veterinaria. Poema de los injertos*, en el llibre 1, capítol XXXIII, «El estercolero», diu: «[...] las cenizas muy buenas [...]».

En definitiva, sembla clar que la transformació en cendra de diferents residus agrícoles o forestals fou una pràctica prou estesa. És evident, d'una banda, que en les cendres s'ha perdut pràcticament tota la matèria orgànica, tot el nitrogen, però hi queden tots els elements minerals. En un

període en què, segurament, no existien, o no eren tan greus, els problemes actuals de degradació i empobriment dels sòls, l'esmentada pèrdua de matèria orgànica no era tan important, i de l'altra es restituïen al sòl una bona part dels elements minerals exportats per les collites o lixiviats. Sembla clar, també, que escampar les cendres era una tasca senzilla, mentre que triturar les restes senceres, a una mida que no «fes nosa», i escampar-les pel camp esperant que s'anessin degradant i es poguessin incorporar al sòl, amb els mitjans tradicionals era impensable.

És curiós també assenyalar que gairebé totes les referències trobades han estat relatives a Catalunya, tant en publicacions catalanes com castellanes. Així, en el *Diccionario de bibliografía agronómica*, de Braulio Antón Ramírez, 1865, editat pel Ministerio de Agricultura, l'any 1988, sota l'epígraf «Hormiguero» trobem les referències següents:

Cultivador (El), periódico de agricultura, horticultura, jardinería y economía rural. M. I. Junta de Comercio de Barcelona, 1848-1851: Cultivo de las tierras, modo de dirigir los surcos, método de incineración o formación de hormigueros en el Vallés.

Revista de Agricultura Práctica, IACSI, 1853-1861: Agricultura catalana (utilidad de los hormigueros o de quemar las yerbas).

Hem trobat, també, al llibre *La fertilización en los sistemas agrarios. Una perspectiva histórica*, de Ramón Garrahou i José Manuel Naredo (ed.), de la col·lecció «Economía y Naturaleza», de la Fundación Argentaria, diverses referències als formiguers. En la segona part, «La fertilización en los sistemas agrarios peninsulares», en el primer capítol, titulat «Métodos de fertilización en la agricultura catalana durante la segunda mitad del siglo XIX. Una aproximación a los pro-

cesos físicos de reposición de la fertilidad agrícola», escrit per Enric Saguer i Ramón Garrabou, llegim:

A mediados del siglo XIX los métodos de fertilización más difundidos en la agricultura catalana eran el abonado con estiércol animal, el uso de cenizas obtenidas de la incineración de determinados residuos forestales o de cultivos arbustivos (*formiguers*), y el cultivo de leguminosas en rotaciones complejas.

També llegim alguna referència interessant relativa a l'interès que els propietaris de les terres demostraven pel manteniment de la fertilitat:

Puede constatarse entre los contemporáneos una generalizada preocupación por incrementar la disponibilidad de fertilizantes mediante el aprovechamiento máximo de los recursos que podía proporcionar la propia explotación, que se reflejaba perfectamente en los contratos de masovería y aparcería. [...] Fórmulas como las utilizadas por Joaquín de Nuix, propietario de varias haciendas en la Segarra, estaban presentes en los contratos agrarios de la mayor parte de Cataluña: «Lo masover deurà cuidar ab lo major esmero de la conservació y bon ús de la palla, invertinla tota en fems y abono de la terra».

En la provincia de Lérida era habitual establecer algunas normas en este sentido. El citado propietario Joaquín de Nuix incorporaba una cláusula según la cual el aparcerero quedaba obligado a utilizar los subproductos del olivar y la viña en la elaboración de *formiguers* o *boïcs*. Tomás Coll, dueño de unas fincas de Guissona (Segarra), obligaba al aparcerero a «consumir tota la lleya de la poda en abono de la mateixa terra inclosos tots els sarments».

La disponibilidad de zonas forestales integradas en la misma explotación o sobre las que se disfrutaba de algún derecho de usufructo constituía un recurso clave para incrementar el flujo de fertilizantes mediante el uso de hojarasca para la cama de animales, [...] y, sobre todo, resultaba decisivo para la práctica de *formiguers* o *boïcs*.

En el resum final del capítol, «para terminar con la enumeración de los métodos de fertilización más extendidos a mediados del siglo XIX», torna a esmentar els formiguers, o boïcs, i cita, en una nota a peu de pàgina, una publicació de J. Bayer (1906): «Los hormigueros, además de cambiar las condiciones físicas y químicas del suelo, aumentan su fertilidad en los casos en que son convenientes, destruyen todas las semillas y raíces de malas yerbas y plantas perjudiciales, quedando la tierra libre de ellas durante dos o tres años por lo menos».

Una altra nota, a peu de pàgina, cita un manual d'agronomia del segle anterior (Tortosa, 1889, p. 73) que indica que les cendres procedents de la combustió dels vegetals, «turba, hullas o piritas contienen una cantidad no menos considerable de sales calizas y potásicas, así como ácido forfórico, sulfúrico y carbónico». Continua dient que les referències als formiguers abunden especialment en les comarques interiors i en les comarques vitícoles meridionals, que l'explicació és més fàcil en aquestes darreres donada l'elevada demanda de potassi de la vinya.

De tot això sembla clar que la pràctica d'aquesta tècnica d'adobatge, els formiguers, fou prou generalitzada a Catalunya i en especial en aquelles zones en què hi havia una certa escassetat de fems fins a la darrerria del segle XIX.

Paradoxalment, al nostre parer, una publicació de Josep Camps, *Treballades i adobs*, editada als Serveis de Terra Campa, de la Mancomunitat de Catalunya, l'inici dels anys trenta, dins de la notable col·lecció «Publicacions Divulgado-

res» dels Serveis Tècnics d'Agricultura, ja ni tan sols esmenta aquesta tècnica. L'aparició dels adobs minerals fou, segurament, el cop de gràcia definitiu per a aquesta utilització tradicional del foc en tasques agrícoles.

Jo, en canvi, recordo perfectament que, fins a mitjan anys cinquanta, l'activitat dels carboners es va mantenir en molts boscos de Catalunya, encara que aquesta tasca no es pot considerar, almenys directament, com a coadjuvant en la producció d'aliments.

6. LES TÈCNiques DE «TALA I ARTIGA», O «TALA I CREMA», O «ARTIGA I CREMA»

Totes tres expressions he vist escrites, i es refereixen, en moltes publicacions, a les tècniques emprades pels indígenes de zones selvàtiques. Moltes de les referències que tenim són de l'Amazònia, on empraven el foc com a eina per netejar, o ajudar a netejar, una determinada superfície per poder posar-la en cultiu.

Una definició, en castellà, de la paraula *rozar*, en la *Gran enciclopedia Larousse*, és «llevar a cabo el trabajo de desbrozar y quemar el bosque para un cultivo temporal itinerante».

L'ús del foc, doncs, creiem que es podria considerar gairebé de la mateixa manera com ho havíem fet en parlar de cremar marges, o restes de plantacions d'arbres; és una eina eficaç.

El fet que s'hagi associat aquesta tècnica amb la selva amazònica pot ser a causa de la preocupació creixent, en els darrers anys, pels atacs que ha sofert, i que sembla que poc o molt continua sofrint, aquesta part del món, ara considerada cabdal per a la supervivència del nostre entorn. Atacs, malauradament terribles, al medi, però també directament i indirecta a la població, i que, malgrat un acord gairebé general de la comunitat científica internacional, no hem estat

capaços d'aturar del tot, els efectes dels quals és difícil que aconseguim mai arribar a pal·liar.

En un text de Luis Babiano Amelibia, *Los sistemas agrícolas indígenas del Amazonas: una alternativa agroecológica*, trobat a Internet, llegim:

A pesar de las variedades ecológicas y culturales que existen en la región, podemos decir que la mayoría de las culturas agrícolas de la Amazonía se basan en el sistema denominado de «tala y quema», también denominado de «roza y quema» o «tumba y quema» (*swidden, slash-and-burn cultivation* o *shifting cultivation*), cuyas características básicas son las siguientes:

1) Apertura de las parcelas o «chagras». Las zonas de cultivo se suelen establecer en áreas de bosque maduro, o en rastrojos muy antiguos [...].

2) Una vez escogido el lugar se procede a la roza del matorral bajo, bejuntos y plantas pequeñas, para luego realizar la tumba de los árboles por parte de los hombres. El resultante es una pequeña parcela —las parcelas que observamos en el baixo río Negro variaban entre 0,4 y 0,8 ha— [...]. Durante esta fase se produce un desmonte selectivo, manteniendo aquellos árboles y plantas que por su valor económico y/o religioso sean importantes para la comunidad.

3) Cuando se tumban los árboles se dejan unas semanas secar y se procede a la quema, se deja sobre el terreno cualquier tronco tumbado que no se haya quemado en el suelo, obteniéndose así el principal abono que se utiliza en las chagras, el «humo». Cuando una chagra no se desarrolla de una forma óptima, se dice que es falta de «echar humo», para proporcionárselo queman malezas, produciendo una lenta combustión cuya ceniza se expande por la superficie cultivada.

[...]

5) A partir del segundo año el rendimiento de la chagra cultivada empieza a disminuir [...].

6) Antes de abandonar los cultivos principales de la chagra han iniciado el proceso de tala-quema en otro lugar. Y así sucesivamente hasta que retoman después de 20-50 años, según la calidad de los suelos, al punto inicial, reiniciando un ciclo autosostenido.

Hem topat, o trobat, una paraula que va esdevenint clau: la sostenibilitat, que evidentment no és l'objecte d'aquesta xerrada, però que ningú dels que ens movem en els àmbits de l'agricultura, del medi ambient o de la producció no hauria, de fet, de deixar mai de tenir en compte. El foc, com veiem, pot ser, en determinades condicions, un element més d'aquesta sostenibilitat, en contra dels moderns sistemes basats en maquinària de gran potència, per posar en cultiu o en pastura grans superfícies que, per les seves condicions, corren un greu risc de desertització en pocs anys. El foc també es pot considerar, en les nostres condicions, per exemple, un factor de greu perill en aquest mateix sentit.

Repetim, també, que aquest sistema no és exclusiu de la selva amazònica. Hem trobat nombroses referències de pobles i zones del món on es practica:

— els *pech*, els garífunes, els misquitos, els olmeques, a Centreamèrica i Mèxic

— els maputxes, al sud de Xile

— Veneçuela

— l'illa de la Pasqua

— el sud-est asiàtic

— l'Àfrica equatorial.

En general, coincideixen amb zones de selva equatorial o tropical, però hem trobat també alguna referència de

zones d'Espanya, on es practicava un sistema semblant per posar terrenys en cultiu:

- la serra d'Aracena
- la serra de Cadis
- la Corunya.

7. EL CAS AUSTRALIÀ

Per acabar, volem reprendre un cas que hem esmentat molt al principi, en què el foc és considerat decididament una eina, si bé no directament relacionada amb la producció d'aliments, sí clarament vinculada amb el tema agrícola.

Sota el títol genèric *Australia's biodiversity*, trobem a Internet el resum d'un treball d'A. Malcolm Gill, del Centre for Plant Biodiversity Research, CSIRO Division of Plant Industry, ACT, titulat «Biodiversity and bushfires: an Australia-wide perspective on plant-species changes after a fire event», del qual traduïm els darrers paràgrafs:

Els gestors encenen focs, en condicions determinades, per diferents raons, la més habitual de les quals és, en parcs, boscos de l'Estat i reserves, mantenir la biodiversitat i protegir vides i propietats. Per aconseguir els objectius, els gestors han de controlar el règim dels focs. La gestió dels focs pot estar relacionada amb els intervals des del darrer foc o amb l'anterior distribució dels intervals entre focs, però la manera de dur-la a terme pot tenir importants conseqüències en la nova diversitat del paisatge.

Uns intervals més amplis en la gestió de la biodiversitat mitjançant el foc es podrien compensar amb un sistema de control vinculat amb un sistema de resposta eficaç. De tota manera, el difícil repte que la recerca encara ha de resoldre és el de definir uns règims de foc

ecològicament adequats per a diferents ecosistemes en diferents contextos geogràfics, econòmics i ecològics, alhora que es determinen les formes concretes, les dimensions i les mesures especials per a les zones cremades.

En definitiva, sembla que queda clar que per a ells el foc és una eina que els ha estat molt útil durant molt temps. De moment, no en qüestionen la utilització, però consideren que cal estudiar més a fons els resultats en diferents situacions. Podem donar per descomptat que, en línies generals (no es pot descartar mai un accident), quan calen foc disposen sempre dels mitjans suficients per controlar-lo.

A casa nostra, estem convençuts que, si bé no podem pas pensar d'utilitzar aquest sistema australià, el foc es continuarà emprant a pagès. Evidentment, respectant sempre la legislació vigent i les normes elementals de prudència, la decisió serà una qüestió econòmica. Tan bon punt han aparegut alternatives més pràctiques, més eficaces, menys cares, els usos del foc s'han anat abandonant.



**SOCIETAT CATALANA
DE FÍSICA**

EL SOL,

A CÀRREC DE

JORDI ISERN,

DE L'INSTITUT D'ESTUDIS

ESPACIALS DE CATALUNYA

I DE L'INSTITUT

DE CIÈNCIES DE L'ESPAI

DEL CONSELL SUPERVISOR

D'INVESTIGACIONS CIENTÍFIQUES

La Terra és un planeta singular: és un sistema doble, té tectònica de plaques, té molta aigua i arbora vida i, a més a més, està lligada a una estrella no gaire corrent, el Sol.

El Sol es va formar ara fa 4.500 milions d'anys. Contràriament al que es pensa, no és un dels estels que més abunden i la seva composició química, incloent-hi el sistema planetari, fa sospitar que ha canviat de posició respecte a la que tenia en el moment de néixer. Es tracta d'un reactor termonuclear autoregulat molt estable, amb una temperatura superficial prou baixa per no emetre radiacions excessivament dures, amb una evolució secular induïda pels cicles de combustió molt lenta i uns canvis a curt termini relativament petits.

En aquesta conferència es descriu l'estructura actual del Sol, l'evolució secular i les variacions a curt termini que són previsibles.

1. INTRODUCCIÓ

El Sol és una immensa esfera de gas incandescent que brilla gràcies a les reaccions termonuclears que es produeixen al seu interior i que es manté unida per la pròpia autogravitació. És una estrella de la seqüència principal de tipus G2; en la taula 1 es mostren les grans xifres que la caracteritzen. Es tracta d'un estel de massa mitjana, amb propietats força típiques, però contràriament al que es diu no n'és un dels més corrents (les nanes vermelles, per exemple, són molt més abundants). Està compost per una gran quantitat d'hidrogen (un 94 % en nombre d'àtoms), una mica d'heli (un 6 % en nombre d'àtoms) i restes de metalls (un 0,1 % en nombre d'àtoms), on la paraula *metalls*, en un clar abús de llenguatge, es fa servir per designar tots els elements més pesants que l'hidrogen i l'heli, independentment de quines siguin les propietats químiques que tinguin.

La densitat mitjana del Sol és de $1,4 \text{ g/cm}^3$, però en el centre és molt més alta, uns 160 g/cm^3 , ja que hi ha d'haver un gradient de pressió per mantenir l'equilibri. En conjunt, i a gran escala, el Sol es troba en equilibri hidrostàtic, per la qual cosa ha de compensar les pèrdues d'energia que experimenta a través de la superfície amb l'energia que obté de les reaccions termonuclears de l'interior. Com que la temperatura central és de només 15,8 milions de graus, el procés energètic dominant és la fusió de l'hidrogen en heli, $4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{}^4\text{He}$, on quatre protons i dos electrons amb una massa total de $6,694 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ es transformen en un nucli d'heli de $6,644 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ de massa, de manera que la diferència es converteix en energia.

Pels astrònoms, es tracta de l'única estrella propera, situada a una distància de només 150 milions de quilòmetres, que es pot estudiar amb detall i serveix de guia per entendre i explicar el comportament de la resta d'estrelles de l'Univers. És a dir, qualsevol teoria de l'evolució estel·lar ha d'ésser capaç d'explicar les propietats del Sol. En aquest sentit, tot i que molts teòrics afirmen, fent broma, que el Sol és massa a prop, la veritat és que l'acord entre la teoria i les observacions és tan bona que, quan han aparegut discrepàncies entre les dues, com és el cas del flux de neutrins solars, s'han hagut de modificar les teories físiques i no pas els models astrofísics.

TAULA 1. *Paràmetres característics del Sol*

Massa	$1,989 \cdot 10^{33} \text{ g/cm}^3$
Radi	$6,967 \cdot 10^{10} \text{ cm}$
Temperatura efectiva	5.780 K
Lluminositat	$3,845 \cdot 10^{33} \text{ erg}$

El flux que arriba a la Terra, anomenat *constant solar*, és de $1.365\text{-}1.368 \text{ W/m}^2$, la qual cosa fa que domini completament l'energètica i tots els cicles vitals del planeta.

És el responsable dels vents i dels corrents marins. Aquest fet permet la fotosíntesi de les plantes i escalfa els animals que es belluguen pel planeta, i qualsevol perturbació d'aquest flux energètic pot afectar de manera catastròfica els equilibris ecològics de la Terra.

2. L'INTERIOR DEL SOL

Convencionalment, es distingeix entre l'interior i l'atmosfera. La separació entre les dues regions és borrosa, però de manera genèrica es pot dir que l'atmosfera és la regió d'on surten la major part dels fotons (tècnicament es diu que és la regió que té una profunditat més petita que la unitat, on la profunditat òptica és una certa mesura de la probabilitat que té un fotó per escapar-se) i, per tant, la regió on es forma l'espectre, mentre que l'interior és el lloc on es produeixen les reaccions termonuclears que fan brillar l'estrella.

La font d'energia del Sol va ésser durant molt de temps un misteri difícil d'explicar. Era clar que no podia ésser d'origen químic, ja que les reaccions d'aquesta naturalesa no són prou energètiques. Per exemple, si el Sol estigués format per una barreja de carboni i oxigen només podria brillar durant unes desenes de milers d'anys. Per aquest motiu, Von Helmholtz i Lord Kelvin van proposar, de manera independent, que l'origen de l'energia solar havia d'ésser gravitatori.

Segons aquesta idea, el Sol es troba en equilibri hidrostàtic i compleix, per tant, el teorema del virial, el qual afirma que l'energia potencial gravitatòria és el doble de l'energia interna (tèrmica en el cas del Sol) si les partícules són no relativistes. Això vol dir que les pèrdues d'energia a través de la superfície es compensen mitjançant la contracció gravitatòria, de manera que una meitat de l'energia potencial que es desprèn compensa l'energia perduda, mentre que l'altra

meitat es converteix en energia interna. És a dir, com més energia perd el Sol, més s'escalfa.

D'acord amb la taula 1, l'energia potencial gravitatòria del Sol és de prop de $4 \cdot 10^{48}$ erg, la qual cosa vol dir que podria brillar amb la potència actual durant uns 30 milions d'anys, un període de temps que en el moment en què es va llançar la idea semblava raonable, ja que els registres geològics permeten determinar amb molta precisió les edats relatives dels estrats, però fallen a l'hora d'establir l'edat absoluta; per aquesta raó, aquesta estava considerada com a molt incerta. El descobriment de la radioactivitat va permetre a Rutherford i Boltwood determinar amb precisió aquesta edat dins l'interval de 4.100 a 4.300 milions d'anys, dos ordres de magnitud més gran que l'edat proposada per Kelvin-Helmholtz. Hi havia, per tant, una contradicció entre l'edat de la Terra i la del Sol i només quedaven dues solucions: o bé la Terra havia estat capturada pel Sol o bé aquest tenia una font addicional d'energia.

Entre els anys 1905 i 1906, Einstein va publicar els treballs on establia les bases de la teoria de la relativitat restringida. Un dels punts fonamentals era l'equivalència entre massa i energia, $E = mc^2$. Tal com va fer notar Eddington l'any 1929, l'energia emmagatzemada en forma de massa a l'interior del Sol és $E = M_{Sol}c^2 = 1,8 \cdot 10^{54}$ erg, per la qual cosa podria continuar radiant al ritme actual durant 14 bilions d'anys més. Dit d'una altra manera, n'hi hauria prou que el Sol aniquilés una part molt petita de la massa que té per obtenir l'energia que necessita. La resposta definitiva la van proposar Bethe i Von Weizäcker l'any 1938 quan van descobrir el mecanisme de fusió termonuclear de l'hidrogen per produir heli, el qual té un rendiment en massa del 0,07% i només afecta el 10% de la massa interna.

TAULA 2. *Font bàsica d'energia del Sol*

<i>PPI (90% del total de les reaccions)</i>
${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$
${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$
<i>PPII (8% de les reaccions)</i>
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$
${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow 2{}^4\text{He}$
<i>PPIII (1% de les reaccions)</i>
${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu$
${}^8\text{B} \rightarrow 2{}^4\text{He}$

El principal problema de la fusió de l'hidrogen per donar heli és que durant el procés s'han de convertir dos protons en dos neutrons, cosa que fa intervenir la interacció feble. Per aconseguir aquesta fusió, hi ha dues possibilitats: les cadenes PP, que comencen amb la reacció directa —dos protons donen un nucli de deuteri, un positró i un neutrí—, la qual és molt lenta (temps característic de 14.000 milions d'anys), i el cicle CNO, que fa servir els isòtops d'aquests elements com a catalitzadors. Les desintegracions beta que actuen en el cicle CNO són més ràpides que la reacció bàsica de les cadenes PP, però com que a les reaccions pròpiament termonuclears intervenen nuclis amb càrrega elèctrica més alta, aquest cicle només s'activa a temperatures elevades, per la qual cosa les estrelles de massa més petita que una vegada i mitja la massa del Sol cremen preferentment el seu combustible per mitjà de les cadenes PP. La taula 2 mostra els detalls d'aquest procés. Els raigs gamma produïts per les reaccions nuclears i per l'anihilació dels positrons es termalitzen ràpi-

dament i escalfen el medi ambient, mentre que els neutrins s'escapen directament, ja que la seva secció eficaç d'interacció amb la matèria és molt feble.

El ritme de les reaccions termonuclears depèn molt de la temperatura ($r_{pp} \propto T^4$, en el cas del centre del Sol) i a causa d'això la regió de combustió termonuclear està molt localitzada en el centre de les estrelles. En el cas del Sol, aquesta regió només ocupa el 10% del radi solar. Els fotons d'aquest lloc de l'estrella es difonen lentament cap a zones de temperatura més baixa situades cap a l'exterior. El procés de difusió és molt lent, ja que els fotons segueixen un camí aleatori, i triguen més de deu milions d'anys a arribar a la superfície. La similitud entre aquesta xifra i l'edat del Sol obtinguda per Kelvin i Helmholtz no és casual. Finalment, quan la radiació arriba a 0,8 vegades el radi solar, el material es fa prou opac perquè l'energia es transporti per convecció, la qual origina la gran riquesa fenomenològica que s'observa a la superfície del Sol.

251

3. ELS NEUTRINS SOLARS

Tal com s'ha dit abans, l'interior del Sol és opac a la radiació electromagnètica i, per tant, és impossible observar directament les regions centrals. Els neutrins, en canvi, interactuen molt feblement amb la matèria i en poden travessar grans quantitats sense ésser absorbits. Per tant, un detector situat a la Terra que sigui capaç de detectar-los podria analitzar directament l'interior del Sol i comprovar si la teoria és correcta o no.

El primer detector de neutrins que es va construir estava format per un gran dipòsit de percloroetilè, un líquid que normalment es fa servir a les tintoreries, situat a més de 1.500 metres de profunditat en una antiga mina d'or de Dakota del

Sud anomenada «Homestake Gold Mine» per evitar qualsevol interferència de la radiació còsmica. Un dels isòtops del clor interactua amb un neutrí per donar un isòtop d'argó radioactiu d'acord amb la reacció ${}^{37}_{17}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$. Una vegada al mes, els responsables de l'experiment purgaven el dipòsit i extreien l'argó produït (un nucli cada dos dies aproximadament) per inferir el flux de neutrins solars. Segons el model estàndard de Sol, s'haurien de produir 7,9 SNU (una SNU és una unitat arbitrària però convenient, que val 10^{-36} reaccions per àtom de ${}^{37}\text{Cl}$ i per segon) i només se'n detecten 2,2 SNU, és a dir, menys d'un terç del que s'esperaria. Aquesta discrepància es coneix pel *problema dels neutrins solars*.

Altres experiments independents han confirmat la realitat d'aquest problema. El detector Kamiokande II, que fa servir 3.000 tones d'aigua ultrapura envoltada per fotocèl·lules que detecten la llum Cerenkov produïda per la dispersió dels neutrins pels electrons, troba que el nombre de neutrins per unitat de temps que detecta és la meitat del que s'esperaria. Els experiments amb gal·li, SAGE i GALLEX, que aprofiten la reacció ${}^{71}_{31}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}_{32}\text{Ge} + e^-$, també detecten un nombre inferior de neutrins del que s'esperaria.

El dilema que planteja aquest resultat és: o bé els models solars estan malament, o bé cal reconsiderar la física dels neutrins. Després de molts anys de comprovacions i, sobretot, de sondejos amb tècniques d'heliologia, s'ha arribat a la conclusió que els models solars són essencialment correctes i que l'única explicació vàlida és que els neutrins experimenten una transformació durant el seu periple cap a la Terra.

Efectivament, els neutrins es divideixen en tres famílies: electrònics (ν_e), muònics (ν_μ) i tauònics (ν_τ). La teoria desenvolupada per Pontecorvo i Gribov, per una banda, i per Mikheyev, Smirnov i Wolfenstein, per l'altra, estableix que els neutrins canvien de naturalesa durant el seu viatge, ja que les

espècies es barregen entre elles. És a dir, els neutrins solars neixen dins la família electrònica i durant el seu viatge una fracció es converteix en neutrins muònics i tauònics. Com que els experiments esmentats més amunt només són sensibles als neutrins electrònics, solament detecten una fracció del flux total de neutrins que arriben a la Terra procedents del Sol. Aquesta hipòtesi ha estat confirmada brillantment pels experiments Solar Neutrino Observatory, a Ontario (Canadà), i KamLAND, a Kamioka (Japó), els quals han mostrat que efectivament els neutrins barrejaven el seu caràcter al llarg del desplaçament.

4. L'ATMOSFERA

La primera cosa que sorprèn del Sol és que a simple vista té una frontera molt ben definida, com si tingués una superfície. Evidentment, això no és així, sinó que la major part dels fotons s'escapen d'una regió, la fotosfera, molt prima en comparació al radi solar (500 km, és a dir, el 0,07 % del radi total). En aquesta regió, la temperatura passa dels 6.500 K a la base als 4.400 K en el cim, i és en aquesta regió on es forma l'espectre d'absorció, ja que els gasos més freds absorbeixen selectivament la llum d'espectre continu que emergeix des de la base.

Quan s'observa la base de la fotosfera, es veu una retícula fosca que separa un conjunt de regions més brillants, d'uns 700 km de diàmetre, que apareixen i desapareixen contínuament en un temps característic de 5 a 10 minuts. Aquesta estructura rep el nom de *granulació solar* i és conseqüència de la penetració de les cèl·lules convectives dins la regió fotosfèrica. L'anàlisi espectral mostra que les zones brillants estan formades per «bombolles» de gas calent que es mouen cap a l'exterior, mentre que les zones fosques estan

formades per gas fred que s'enfonsa cap a l'interior després d'emetre l'energia que transporten a la fotosfera, on els gasos són transparents.

En aquests moments, no es disposa d'una teoria satisfactòria per explicar amb detall les propietats dels moviments convectius. Tanmateix, el tractament relativament groller que es fa servir en els models numèrics actuals proporciona resultats acceptables. Per exemple, és interessant fer notar dues propietats del Sol relacionades amb la convecció: una és que el Sol emet gairebé com un cos negre i l'altra és que les capes convectives apareixen quan el material és massa opac i, en el cas del Sol, la zona convectiva arriba just a la fotosfera. Tots dos fenòmens són causats en gran part per l'existència a la fotosfera d'un ió, H^- (un àtom d'hidrogen amb un electró addicional), que està en equilibri amb el medi ambient, $H + e^- \rightleftharpoons H^- + \gamma$. Aquest electró està molt poc lligat, 0,75 eV, i pot absorbir totes les radiacions que tinguin una energia superior a aquesta quantitat o, equivalentment, longituds d'ona més curtes que 17.000 Å, i viceversa, que poden generar un continu de fotons d'ona més curta que aquest valor.

La cromosfera, que contribueix a la lluminositat total del Sol amb només una deu mil·lèsima part, és la zona que es troba immediatament per sobre la fotosfera i té un gruix de 2.000 quilòmetres. En aquesta regió, la densitat cau quatre ordres de magnitud, però la temperatura puja des dels 4.400 K fins als 25.000 K, per la qual cosa contribueix amb ratlles d'emissió i d'absorció a l'espectre. En particular, si es fan servir filtres que restringeixen la visió a determinades longituds d'ona com, per exemple, la corresponent a la ratlla H_α , es poden veure noves estructures sobre la superfície del Sol.

Una d'aquestes és la supergranulació, que és similar a la granulació, però a escales més grans. En aquest cas, els supergrànuls, que tenen unes mides de 30.000 quilòmetres, ascendeixen per la part central i baixen per la perifèria amb

unes velocitats típiques de 0,4 km/s. Una altra estructura que apareix és la de les espícules, uns filaments de gas d'uns 10.000 quilòmetres de longitud i una vida mitjana d'uns 15 minuts, que cobreixen una fracció de la superfície del Sol.

Per sobre la cromosfera, la temperatura creix molt ràpidament fins a superar el milió de graus al cap de pocs centenars de quilòmetres i a continuació s'estabilitza. Aquesta regió abrupta rep el nom de *zona de transició* i es pot estudiar selectivament gràcies a les ratlles d'emissió de diversos ions com és el cas de la ratlla de 977 Å del CIII (carboni ionitzat dues vegades), que emet a temperatures d'aproximadament 90.000 K, o la línia de 1.032 Å de l'OVI (oxigen ionitzat cinc vegades), que emet a 300.000 K. És interessant notar que les estructures que caracteritzen la cromosfera continuen deixant l'empremta fins a zones de temperatura molt elevada dins la zona de transició.

La regió on la temperatura s'estabilitza rep el nom de *corona*. Aquesta regió, que només es fa visible durant un eclipsi total de Sol o mitjançant tècniques especials, s'estén des de la zona de transició fins a uns quants radis solars. La contribució energètica a la lluminositat total és aproximadament la milionèsima de la contribució fotosfèrica. La densitat és molt baixa i la temperatura és d'aproximadament un parell de milions de graus.

La corona també està estructurada i normalment es parla de les corones K, F i E. La corona K emet llum blanca, d'espectre continu, causada per la dispersió de la llum de la fotosfera pels electrons lliures, i s'estén des de la superfície del Sol fins a una distància de 2,3 radis solars. La corona F està causada per la dispersió de la llum que fan els grans de pols situats més enllà de 2,3 radis solars i s'acaba confonent amb la llum zodiacal (llum del Sol reflectida per la pols que hi ha en el pla de l'eclíptica). La corona E és la responsable de les ratlles d'emissió produïdes pels gasos altament ionit-

zats que formen la corona. Aquesta corona recobreix totes les altres.

Quan s'observa el Sol amb raigs X, es veu que l'emissió no és uniforme sinó que apareixen zones fosques, anomenades *forats coronals*, que no són gaire brillants en aquesta banda de l'espectre, i zones molt brillants, algunes situades fins i tot a l'interior de les zones fosques, que apareixen i desapareixen en qüestió d'hores. Els forats coronals es caracteritzen per tenir les densitats i les temperatures més baixes de la corona i per estar relacionats amb el camp magnètic del Sol i els mecanismes de generació del vent solar.

El vent solar és un corrent d'ions i electrons que s'escapen contínuament del Sol i envaeixen tot l'espai interplanetari a raó de 10^{-14} masses solars per any. Les partícules, que tenen una densitat de 5 a 10 per cm^3 , tarden entre 5 i 10 dies a arribar fins a l'òrbita de la Terra i ho fan amb una velocitat d'entre 400 i 450 km/s, que continua augmentant. La seva existència es posa de manifest a través dels cometes, ja que els gasos que s'escapen del nucli i formen la cabellera són arrossegats pel vent i formen la cua. És per aquesta raó que les cues cometàries sempre es troben en la direcció oposada al Sol. El vent solar també es manifesta a través de la interacció amb el camp magnètic terrestre, ja que les partícules atrapades per les línies magnètiques es dirigeixen cap als pols i, en xocar amb l'atmosfera, originen les aurores polars.

5. ACTIVITAT SOLAR

Quan s'observa la superfície del Sol, es veu que hi ha regions fosques anomenades *taques solars*. Aquestes taques presenten una zona més interna, anomenada *ombra*, envoltada per una zona més clara anomenada *penombra*. S'estima que la temperatura de la part més interna és de només 3.800 K, per

la qual cosa són menys brillants i, per tant, es veuen fosques en comparació a la matèria que les envolta.

El nombre de taques solars no és constant, però l'aparició segueix una pauta cíclica d'onze anys. El nombre de taques durant cada màxim d'activitat no és el mateix, però els màxims sempre estan separats pel mateix interval de temps. Aquesta regularitat encara es veu més bé quan es representa la latitud de la taca en funció del moment de la seva aparició. Al començament del cicle, les taques apareixen a latituds elevades, però a mesura que passa el temps apareixen cada cop més a prop de l'equador, de manera que el conjunt té l'aspecte d'una papallona, per la qual cosa aquests diagrames es coneixen per *diagrames papallona*.

L'autor d'aquests diagrames, E. Walter Maunder, també va descobrir que, durant el període que va des del 1645 fins al 1715, no es va observar cap taca. Aquest període s'anomena *mínim de Maunder* i coincideix amb una època inusualment freda a Europa que es coneix per l'*era glacial petita*. Evidentment, aquesta època també es va caracteritzar per l'absència d'aurores polars i l'existència de corones molt febles durant els eclipsis solars. Com que les temperatures baixes es manifesten en forma d'anomalies en el gruix dels anells dels arbres, s'ha pogut saber que en el passat el Sol deu haver experimentat altres mínims d'activitat.

Els estudis del magnetisme solar indiquen que el camp magnètic és més intens a l'interior de les taques que a l'exterior i que aquestes apareixen per parelles de polaritat magnètica oposada, de manera que tots els membres de la parella que estan més avançats en el sentit de la rotació solar tenen la mateixa polaritat dins el mateix hemisferi i oposada a l'hemisferi contrari. Quan el Sol canvia de cicle, la polaritat del camp magnètic també ho fa, és a dir, el pol nord magnètic passa a ser el pol sud i viceversa, i passa el mateix amb la polaritat de les taques líder. Això vol dir, doncs, que la perio-

dicitat del cicle solar és de 22 anys! Cal fer notar aquí que el camp magnètic terrestre experimenta el mateix comportament, però a escales de temps molt més llargues.

L'origen de les taques està relacionat amb la rotació diferencial del Sol. Efectivament, el Sol no gira com un sòlid rígid, sinó que ho fa més ràpid a l'equador (25 dies per volta) que no pas a latituds altes (28 dies per volta a 40° de latitud). Com que el gas ionitzat està lligat al camp magnètic mitjançant la càrrega elèctrica, aquell l'arrossega en el seu moviment de rotació, de manera que les línies de camp es deformen i s'entortolliguen sobre si mateixes. El resultat és que el camp magnètic s'intensifica en aquests manyocs i la pressió i la temperatura baixen, amb la qual cosa el gas brilla menys.

Les taques no són l'única manifestació del camp magnètic solar. Les fulguracions són causades per violentes inestabilitats del camp magnètic que duren entre uns quants minuts i unes quantes hores. Durant una fulguració, la zona afectada adquireix una temperatura superior als 5 milions de graus i accelera una gran quantitat de partícules fins a energies notables. Les platges són zones molt brillants en llum H_α situades al voltant de les taques solars i que queden després que aquestes han desaparegut. Els filaments són bandes fosques d'uns 100.000 quilòmetres de longitud que connecten taques solars i que, quan es veuen projectades sobre el firmament, més enllà del limbe solar, reben el nom de *prominències*.

6. EVOLUCIÓ DEL SOL

L'espai interestel·lar no és buit, sinó que és ple de gasos i pols que es manifesten de maneres diverses segons quin sigui l'estat físic. En particular, a la galàxia hi ha estructures que s'anomenen *núvols moleculars gegants*, les quals tenen una

massa aproximada d'un milió de vegades la massa del Sol, una temperatura de només uns 20 K i unes densitats de 100 a 300 partícules per cm^3 . A l'interior d'aquests núvols hi ha unes condensacions, entre 10^7 i 10^9 partícules per cm^3 , molt calentes, entre 100 i 200 K, i relativament petites (entre 0,05 i 1 ps) que contenen entre 10 i 100 vegades la massa del Sol. Associades a aquestes subestructures, s'hi troben estrelles de tipus O i B, les quals es caracteritzen per tenir una vida tan curta que no tenen temps d'allunyar-se de la regió on es van formar, la qual cosa indica que les estrelles neixen a l'interior dels grans núvols moleculars i que les condensacions no són altra cosa que els embolcalls de les protoestrelles.

Els núvols moleculars es troben en equilibri, és a dir, la tendència a dispersar-se causada per l'agitació tèrmica queda compensada per l'atracció gravitatòria que tendeix a fer-los col·lapsar. Si en un moment donat les forces gravitatòries guanyen l'agitació tèrmica, el núvol, o la part afectada del núvol, comença a col·lapsar-se. Durant aquesta etapa, el núvol és pràcticament transparent, per la qual cosa l'energia de la contracció és radiada eficientment. Això fa que el núvol entri en caiguda lliure i que les inhomogeneïtats tendixin a accentuar-se amb el temps i en provoquin la fragmentació. Aquest procés de fragmentació s'atura quan la densitat és prou gran, uns 10^{-13} g/cm^3 , perquè el núvol es faci opac a la radiació, i el col·lapse isoterm es converteix en un d'adiabàtic. La font més important d'opacitat és la pols. Quan això passa, es diu que s'ha format una protoestrella, la qual continua contraient-se fins que la temperatura central arriba al punt de la ignició termonuclear. Durant tot aquest temps, l'estrella allibera energia al ritme que li marca el reajustament tèrmic de l'interior.

En el cas d'una estrella com el Sol, la primera font d'energia és la combustió del deuteri primordial, ja que aquesta és la reacció més ràpida de totes. En qualsevol cas, com que l'a-

bundància de deuteri és molt petita, aproximadament $2 \cdot 10^{-5}$ vegades la de l'hidrogen, aquesta font només aconseguirà alen-
tir lleugerament el procés de contracció i cal esperar que la tem-
peratura augmenti més perquè les cadenes de fusió de l'hidro-
gen s'activin i funcionin de manera regular. Quan això passa,
l'estrella atura la contracció i s'instal·la en una etapa evolutiva
molt estable, la seqüència principal, en la qual compensa les
pèrdues d'energia gràcies a la combustió de l'hidrogen. El Sol
es troba en aquesta fase des de fa gairebé 4.500 milions d'anys.

Tot i aquesta estabilitat, el Sol ha anat canviant
durant tot aquest temps, ja que la lluminositat, el radi i la
temperatura superficial han augmentat des de llavors. Aquesta evolució és conseqüència del fet que, en convertir-se
gradualment l'hidrogen en heli, el pes molecular mitjà del
gas augmenta i, d'acord amb la llei dels gasos perfectes, per
mantenir la pressió ha d'augmentar la densitat i/o la tempe-
ratura. En qualsevol cas, el nucli del Sol es comprimeix i s'es-
calfa. Com que el ritme de generació d'energia ve donat per
 $\dot{\epsilon} \propto \rho X^2 T^4$,¹ l'efecte de l'increment de densitat i temperatura
sobrepasa la disminució de l'abundància d'hidrogen i es
produïxen els efectes esmentats abans.

Arribarà un moment, quan l'abundància de l'hidrogen
sigui zero al centre, que la temperatura serà tan elevada que
permetrà cremar-lo en una gran capa situada al voltant d'un
gran nucli isoterm i inert fet d'heli. En aquell moment, l'e-
nergia que es generarà serà més gran que quan l'hidrogen es
cremava a la zona central; tanmateix, el resultat no serà un
increment de la lluminositat, sinó que l'energia s'invertirà en
l'expansió de les capes externes, per la qual cosa la llumino-
sitat i la temperatura externes disminuiran i el radi augmen-
tarà. El Sol entrarà a la fase subgegant.

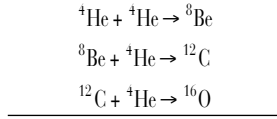
1. $\dot{\epsilon}$ és el ritme de generació d'energia, ρ la densitat, X és la frac-
ció de massa d'hidrogen o la superfície i T la temperatura a la superfície.

Aquesta fase evolutiva acabarà quan la massa del nucli isoterm superi un valor crític anomenat *límit de Schöenberg-Chandrasekhar*, a partir del qual el nucli d'heli es col·lapsarà gravitatòriament i s'escalfarà fins a arribar a temperatures superiors al centenar de milions de graus, moment que l'heli s'encendrà. Durant aquesta etapa, l'hidrogen s'anirà cremant en una capa molt prima però també molt calenta, de manera que provocarà un augment molt notable de la lluminositat i del radi amb la consegüent disminució de la temperatura superficial. El Sol s'haurà convertit en una gegant vermella, és a dir, en una estrella amb una lluminositat 1.000 vegades més gran que l'actual, una temperatura superficial de 3.000 K, gairebé la meitat d'ara, i un radi 100 vegades més gran que l'actual i que seria equivalent al de l'òrbita de Mercuri.

Com que els electrons són fermions, obeeixen el principi d'exclusió de Pauli i no poden ocupar el mateix estat quàntic, per la qual cosa s'han de situar en estats d'energia cada vegada més elevada. En aquest cas es diu que es degeneren. Quan la degeneració és completa, els efectes quàntics són dominants i la pressió és independent de la temperatura. Aquest efecte és tan important que per si mateix pot aguantar una estructura de fins a 1,4 vegades la massa del Sol, coneguda per *massa límit de Chandrasekhar*.

Totes les estrelles de massa més petita que dues vegades la massa del Sol arriben al punt d'ignició de l'heli amb un nucli parcialment degenerat, de manera que la ignició és gairebé explosiva; en aquest cas es parla de la *fogonada de l'heli*, però la durada i l'energia són molt curtes, de manera que l'energia és absorbida per les capes exteriors. En les estrelles de massa inferior a la meitat de la massa solar, l'heli no s'encén mai. El Sol, evidentment, passarà per aquest procés i, tan bon punt s'hagi estabilitzat, cremarà heli en el centre i hidrogen en una capa al voltant d'aquest; per tant, l'estructura serà força similar a la que té ara.

TAULA 3. *Combustió de l'heli*



La combustió de l'heli converteix gradualment aquest element en una barreja de carboni i oxigen (la taula 3 mostra el conjunt de reaccions dominants). Quan el combustible s'esgota, les reaccions continuen en una doble capa, una de més interna que crema heli i una de més externa que crema hidrogen. Aquesta situació és físicament equivalent a la fase gegant roja, per la qual cosa el Sol s'expandirà una vegada més i tornarà a reduir la seva temperatura superficial. Hi ha, de totes maneres, tres diferències fonamentals. La primera és que la lluminositat encara serà molt més elevada que durant la fase gegant roja i, en conseqüència, la superfície del Sol encara arribarà molt més lluny, gairebé fins a l'òrbita terrestre; la segona és que la combustió en doble capa és molt inestable i acaba expulsant tot l'embolcall situat més enllà de la zona de combustió de l'hidrogen, la qual cosa originarà una nebulosa planetària, i la tercera és que el nucli de carboni/oxigen està completament degenerat i no pot escalfar-se i arribar a la temperatura d'ignició del carboni. Aquesta etapa es coneix per *fase AGB* (*asymptotic giant branch*).

L'expulsió de l'embolcall deixarà al descobert el nucli intern i calent del Sol, és a dir, la zona on s'han produït totes les reaccions termonuclears que l'han alimentat en vida. Al cap de 100.000 anys, s'hauran dissipat tots els gasos expulsats durant la fase AGB i el nucli central es refredarà suficientment per adquirir l'aspecte típic d'una nana blanca, la qual s'anirà refredant gradualment per a la resta dels temps.

**SOCIETAT CATALANA
DE LLENGUA
I LITERATURA**

JOAQUIM RUYRA,

LA NATURA I EL FOC,

A CÀRREC DE

LLUÏSA JULIÀ,

DE L'ASSOCIACIÓ D'ESCRITORS

EN LLENGUA CATALANA

A partir d'un fet real, un extens incendi que l'estiu de 1928 va cremar gran part dels boscos d'alzines suredes que Joaquim Ruyra (1858-1939) tenia a la comarca de la Selva, l'escriptor emprèn una sèrie de mobilitzacions i fa una darrera descripció literària sobre la natura, la gran protagonista de tota la seva obra narrativa, que recull en el darrer títol, *Entre flames* (1928). Foc real i foc simbòlic, literari i vital que confronta la mirada del propietari amb la de l'escriptor i que permet copsar-ne la visió, de traçar-ne l'evolució vers una identificació naturista i purificadora.

1. INTRODUCCIÓ

Joaquim Ruyra (Girona, 1858-Barcelona, 1939) és un dels grans escriptors que fan de la natura el centre de la seva investigació literària. Les seves descripcions, descripcions del mar i dels boscos, la transcendeixen per indagar els aspectes interns i subconscients de l'individu, com molt bé explica el títol del seu recull central, fonamental, publicat el 1903, *Marines i boscatges*. El paisatge solitari permet confrontar-hi l'ànima humana, mostrar-hi les seves pors i basardes més primigènies. El paisatge ruyrià representa la immensitat còsmica, produeix embriaguesa, delícies sensuals, però també visions fatídiques, fantasies sinistres evocades a través d'imatges visuals, auditives, tàctils.

Ruyra coneixia molt bé el paisatge mariner i els boscos perquè era un propietari rural important que va veure com el 4 d'agost de 1928 un incendi de grans proporcions cremava gran part de les seves finques a les Gavarres, la serralada litoral situada a l'extrem septentrional de Catalunya, cap al Baix Empordà i el Gironès, de relleu suau, el pic més alt de la qual és el puig d'Arques, de 531 metres d'altitud. Aquest fet permet analitzar i posar en relleu les dues mirades que l'es-

criptor projecta sobre la natura: la de l'artista que somnia, simbolitza i reflexiona el paisatge des d'una posició suggestiva i sensual, i la del propietari que viu de les seves terres i de l'explotació del suro. Val a dir que la possessió d'aquestes terres i d'altres hisendes li va permetre una professionalització de l'escriptura i de l'estudi entorn del fet literari, comparable a la que desenvolupava Caterina Albert, per exemple, i una situació econòmica folgada i envejable, idònia a la gran obra que va construir i que l'incendi de les Gavarres, produït quan Ruyra estava a punt de complir setanta anys, liquida d'una manera ben simbòlica.¹

2. EL MAR DE BLANES I LES GAVARRES

El paisatge natural de Joaquim Ruyra se situa en les comarques gironines, amb dos epicentres importants: el mar de Blanes i les Gavarres, Girona inclosa, on havia nascut. El primer, la vila de Blanes, perquè era on durant generacions els Ruyra i els Lacreu (originàriament Delacroix) havien tingut la casa pairal i les seves hisendes; més tard incorporen altres finques de Palafolls, entre Blanes i Malgrat, d'on provenia la mare, Maria Oms i O'Doyle. També a Hostalric encara avui es troba el mas Ruyra, una propietat amb pou, però sense casa, adscrita al poble pel cantó sud i d'on prové el nom *Ruyra*. Segons que va explicar el mateix escriptor, en el segle XVIII una pubilla Lacreu, de família de metges i molt activa en l'Administració pública de Blanes, es va casar amb un hereu Ruyra d'Hostalric, advocat, i per alguna raó van decidir establir-se a can Creus de Blanes, a casa de la pubilla.

265

1. En més d'una ocasió, Ruyra havia anotat la sort de no haver de viure del seu treball literari, que li hauria donat uns ingressos migrats, insuficients per viure.

Per això, de petit l'escriptor era anomenat «en Quimet de can Creus» o, simplement, «Quimet Creus». L'antiga casa Creus està situada al carrer Ample, número 10, de Blanes, residència dels seus hereus.²

L'altre nucli es troba a la serralada de les Gavarres i s'estén cap a l'Empordà, concretament a la parròquia rural de Santa Pel·laia (353 m) i al poblet del Montnegre (285 m). Ruyra visitava puntualment aquest paisatge cada estiu per seguir les tasques de la pela del suro, que constituïa una de les seves principals fonts d'ingressos. Ruyra era un propietari rural important, dels més importants de la comarca de la Selva, emparentat d'anys amb les altres grans famílies de la comarca com els Miralbell de Blanes, notaris, emparentats amb els Ruyra des de 1778; els Oms, metges i eclesiàstics; els Aloy de Figueres o els O'Doyle, gironins provinents d'Irlanda. Aquests estaven relacionats, al seu torn, amb els de Carles, una de les principals cases de Girona que tenien el seu casalici a la plaça del Vi, al costat de l'actual Ajuntament, a la finca contigua de la qual, Casa Ciurana, va viure Joaquim Ruyra, que hi situa alguns relats de *La parada*.³

2. La reconstrucció fins ara de l'arbre genealògic dels Ruyra es remunta a l'any 1778 amb el casament de Josep-Ignasi Miralbell de Ferrer i Teresa Ruyra; podem documentar un fill del matrimoni, Joaquim Miralbell i Ruyra. A la mateixa època, Joaquim Ruyra i Lacreu es casava amb una noia Miralbell —els matrimonis dobles entre famílies eren molt usuals a l'època. D'aquest matrimoni coneixem dos fills documentats: Socors Ruyra i Miralbell i Joaquim Ruyra i Miralbell, avi de l'escriptor, que, al seu torn, es casà amb Antònia Alsina i Batlle, propietària de Palafolls. Tingueren catorze fills; l'hereu fou Francesc Ruyra i Alsina, pare de l'escriptor, que es casà amb Maria Oms i O'Doyle el 6 de gener de 1858. Informació facilitada per la família Miralbell. Vegeu també la meua biografia sobre l'escriptor: Lluïsa JULIÀ (1996), *Joaquim Ruyra*, Barcelona, Parsifal.

3. Vegeu l'estudi de Rosa CONGOST I COLOMER, *Notes de societat (La Selva, 1768-1862)* (1992), Santa Coloma de Farnés, Consell Comarcal de la Selva.



Comarca de la Selva

3. ELS FOCS, LA SOLIDARITAT I LA TRANSFORMACIÓ DEL TERRITORI

És evident que el problema dels incendis forestals no ve pas d'ara. Si ens situem en els anys vint del segle passat, quan es va produir el de les Gavarres, Josep Pla explica en un article aparegut el 6 d'agost de 1929 a *La Veu de Catalunya* que el foc havia calcinat els boscos de l'Empordà i del Pirineu gironí fins al Pertús entre els anys 1926 i 1929. En l'article titulat «Davant d'un gran foc», n'apunta les possibles causes: descurança o venjança dels pagesos i els bosquerols i, sobretot, especulació. I hi fa un resum de l'evolució econòmica de la indústria del suro, castigada durant la Primera Guerra Mundial a causa del tancament de fronteres, que obligà els propietaris a dedicar-se a fer carbó i, per contrast, parla del moment d'auge que tornava a viure: «El suro es paga —escriu— com no s'havia mai pagat. És rar avui el propietari que torni a tallar arbres. Cada dia se'n tallaran menys, perquè avui tenir suredes és tenir a la mà la fortuna que hom tenia abans.» I, sense assenyalar culpables, apunta que les necessitats dels bosquetans de fer carbó per poder sobreviure els fan susceptibles de voler intentar cremar els boscos. Immediatament, però, indica que la sequera és la causa principal de l'incendi i reclama la necessitat urgent d'arbitrar mesures governamentals en aquest sentit, com la de prohibir encendre foc durant els mesos més eixuts de l'any, d'abril a octubre, en una actitud que no sé si es va aplicar en algun moment, però que avança les mesures preses posteriorment i vigents avui.

El punt d'arrencada de l'article de Josep Pla és un paorós incendi que havia presenciat de ben a prop, produït l'estiu de 1929 entre Sant Feliu de Guíxols, Palamós, Sant Antoni de Calonge... i terres endins, i que, segons escriu, havia cremat més hectàrees que la devastació de l'any anterior en les terres de Ruyra. Aquest escrit dóna molts elements

per valorar les repercussions econòmiques de l'incendi que s'inicià el 4 d'agost de 1928 a les terres de Ruyra a les Gavarres, i que va estar encès entre vuit i nou dies fins a arrasar 150 km². El mateix Ruyra apunta en un escrit sobre el foc el dany material, però de seguida hi veu un senyal diví, un símbol:

Si digués que la pèrdua que he sofert no m'ha afligit, mentiria. Aquelles formoses suredes de Montnegre, jo me les estimava en tanta de manera, que no me les vaig voler vendre quan, durant la guerra, me n'oferien un dineral. Ara que no són més que fum i cendra i, contra mi, un senyal de l'enuig de Déu. (*Obres completes*, p. 388)⁴

El foc va començar a Santa Pel·laia, entre la rectoria i la font de Can Carreras, i es va estendre, com dos rius, escriu Ruyra, cap a Sant Mateu de Montnegre i el poble de Montnegre, format per un nucli de quatre cases. Després va calcinar boscos d'alzines suredes, entre els quals, apunta, l'antic alzinar de Montigalà, i sis o set masies, que en aquell moment responien als noms de Casagran i Mas Sàbat, a la falda del turó del Montnegre; després va calcinar ca l'Escolà i can Jaques; seguidament, mas Llobet, important perquè tenia trull d'oli i premsa, i can Pujades. El dia 20 d'agost, Ruyra va visitar aquestes masies, mencionades en els escrits sobre l'incendi, per valorar-ne les pèrdues. La descripció que Ruyra fa del paisatge calcinat en la prosa «La selva morta» (*La Veu de Catalunya*, 29.8.1928) és impressionant i, no cal dir-ho, bella; parla de la «vacuïtat», del silenci dels paratges, de la mort, seguint amb el simbolisme del foc. Escriu Ruyra:

4. Totes les citacions són extretes de Joaquim RUYRA (1964), *Obres completes*, Barcelona, Selecta, col·l. «Biblioteca Perenne», núm. 10, pròleg de Manuel de Montoliu.

Com que tenia notícies de la magnitud del sinistre, tot pujant ara camins enllà imaginava els seus efectes. Els rusquers —pensava jo— estaran convertits en grans piles de cendra i de panes carbonitzades i la selva presentarà un aspecte imponent d'enormes arbres negres i mutilats i de branques tombades, fumejant encara ací i allà. Suava d'angúnia imaginant-ho.

Doncs bé, la visió de la realitat fou molt diferent de la imaginada, i més depriment i aclaparadora.

Quan vaig presenciar-la, l'ànima se m'encongí tremolant. No res de masses enormes, no res de grandiositat. De les belles estibes de suro, no n'havia restat cap pila de cendra ni de ruscots cremats; no res, no cap desferra; la vacuïtat. El vent s'havia endut els impalpables residus de la combustió. L'erm on havien descansat les riques panes era un planell ras i d'una grisor uniforme. I la selva? També era vàcua i silenciosa. Cap remor de fullareda, cap espinguet d'ocell, cap moviment. Els arbres, negres, ensutjats, sense rama, sense balums, clars, desnerits, s'aixecaven com espectres sobre una terra llisa i cendrosa, en la qual la sovellada es fonia en una ombrosa tristor. Els predis veïns, ja no separats per les múltiples ondulacions de la fronda, semblaven a tocar. Es diria que àdhuc l'extensió territorial havia minvat. No hi havia ja enlloc cap fumera. Tot era apagat, apagat de foc i apagat també d'alegria i de vida. (*Obres completes*, p. 389)

El text traspuja el simbolisme primitiu de l'espai del bosc, evocat pel mateix nom de la comarca, la Selva, ara transformat en mort i cendra tot transcendint els aspectes estrictament materials i econòmics i que, com deia abans, l'escriptor pren com un senyal del cel. Un simbolisme que cal relacionar amb el bosc, com a lloc sagrat i expressió de l'inconscient, de la part fosca, primigènica, de l'individu i que

Ruyra, com veurem, havia expressat en alguns relats de *Mari-nes i boscatges*. Però aquest incendi també va prendre una dimensió social, igualment impressionant. Es va convertir en l'eix d'una mobilització ciutadana de solidaritat que fins i tot va sorprendre els organitzadors i, no cal dir-ho, Ruyra. Els diaris *La Veu de Catalunya* i *La Publicitat* es van convertir en els catalitzadors de l'ajuda econòmica davant el foc i les seves funestes conseqüències econòmiques: força famílies es van quedar sense casa, sense bestiar, sense terres per conrear. La mobilització no sols es va produir a les comarques gironines, sinó arreu de Catalunya. Gent, per exemple, de Reus, Valls, Igualada, Molins de Rei, etc., enviaven els seus donatius, que els dos rotatius recollien i dels quals donaven compte a través de les seves pàgines. Fins i tot *La Publicitat* va desplaçar el periodista Domènec de Bellmunt per fer-ne reportatges sobre el terreny. El periodista va acompanyar Joaquim Ruyra en la primera visita del dia 20 ja comentada. L'objectiu era clar: recollir diners provinents d'entitats cívi-ques o de ciutadans particulars. Els dos diaris es brindaven a vehicular els ajuts per fer front a la reconstrucció de les cases, comprar eines i caps de bestiar, en una època que no hi havia assegurances sobre terres ni collites ni bestiar, tot i que alguns organismes oficials com l'Associació Forestal Espanyola o el bisbat de Girona van donar diners als pagesos i bosquerols, que van passar a ser anomenats «damnificats», i, per tant, el foc prengué dimensions de catàstrofe, equiparable a terratrèmols o altres desastres naturals. Al mateix temps, convertien Ruyra en l'administrador principal dels diners, i dels criteris que va establir per distribuir-los es van derivar certes crítiques.

Els diners es van aplegar de l'organització de multitud de festivals i vetllades, musicals i literàries, anomenats «festivals proGavarres»; el més important va tenir lloc al Palau de la Música Catalana el dissabte 20 d'octubre amb l'assistència emocionada de Ruyra. És a dir, al cap de dos mesos

d'haver-se extingit l'incendi. Va ser organitzat per l'Orfeó Català amb Lluís Millet al capdavant, però se'n feren en molts altres indrets, entre els quals Blanes i Girona. Mentrestant, les almoines anaren arribant als diaris, que al seu torn les adreçaven a Joaquim Ruyra, i aquest les dipositava en un compte de la banca Jubert i Presas de Caçà de la Selva. De fet, hi havia una junta formada pels dos rectors dels llocs afectats, Santa Pel·laia i Sant Mateu de Montnegre, i per un representant de l'entitat bancària. Ruyra, però, s'erigí en responsable màxim i va ser ell qui prengué la iniciativa i qui establí els criteris de distribució dels diners: no lliurant-los directament als afectats perquè els administressin com volguessin ni en proporció als danys materials ocasionats, sinó fent-se càrrec directament de la despesa generada d'adquirir els carros i tot el material que necessitessin per continuar l'activitat que desenvolupaven abans de l'incendi, i reconstruint-los les cases. És a dir, que la solució lligava explícitament els pagesos i els bosquerols al terreny, i aquest criteri, segons algunes veus, era propi dels antics senyors feudals, que estacaven la gent a les propietats dels nobles. Si aquests decidien marxar, explicitava Ruyra, es produiria un despolament del territori, i això és el que volia evitar de totes passades. Ruyra creia que, assegurant la subsistència dels pagesos durant dos anys, després la regeneració del territori estava assegurada.

Els resultats obtinguts superaren totes les expectatives. Si el 6 de novembre de 1928 Ruyra donava compte a *La Veu de Catalunya* de les 7.105,80 ptes. recollides, tot indicant que eren molt insuficients davant les moltes necessitats que calia cobrir, per cap d'any de 1929 escrivia un article titulat «Gràcies i prou», en què apuntava que les coses s'havien capgirat i que els pagesos serien «més rics que no han estat mai» (*Obres completes*, p. 463).

Imagino que, per apaivagar les crítiques suscitades i

per donar una màxima transparència, els dos rotatius, *La Veu* i *La Publicitat*, publicaren, al llarg dels mesos d'octubre, novembre i desembre, les llistes de les persones i les institucions que donaven diners, així com les quantitats exactes. El 28 de desembre del 1928, *La Publicitat* havia recollit 17.000 ptes., i el 18 d'abril del 1929, dia que constitueix el darrer estat de comptes, *La Veu de Catalunya* parlava de 55.774,95 ptes.

Les entitats excursionistes, els orfeons, les cobles o els mateixos diaris van ser els més actius, amb una mobilització que permet relacionar l'excursionisme, certament de llarga tradició a Catalunya des del segle XIX, amb l'estimació a la terra i al país, i que connecta amb el que apuntava Josep Pla des d'una òptica pragmàtica en parlar de «la manera brutal i voraç com la gent tracta avui les coses de la realitat». I per «realitat» cal entendre el «paisatge» com un bé comú que pertany a la comunitat i que, per tant, cal preservar. Un argument ben allunyat de l'economia actual, basada en la urbanització desmesurada, i que ha relegat el paisatge al concepte habitual de realitat que la gent té avui o bé l'ha oblidat.

En aquest sentit, mereix especial atenció l'argument del polític Antoni Rovira i Virgili que, en fer la crida a la solidaritat des de les pàgines de *La Publicitat*, apel·la al fet que Ruyra ha descrit aquells paratges en les seves obres, de manera que els diners recollits serien una mena de compensació pel que ha llegat l'escriptor a Catalunya. Escriu:

Moltes de les pàgines de les narracions de Mestre Ruyra s'han inspirat en aquests boscos que ara s'han convertit en fum i cendra. ¿No devem tots plegats una compensació a l'autor de *Marines i boscatges*, a l'home exemplar i al literat eminent que a les darreries de la seva vida veu desaparèixer les millors hisendes del seu patrimoni? («La muntanya cremada», 23.8.1928)

L'escriptura com a llegat, com a bé comú. És un argument realment interessant que planteja el valor de la paraula, del text, com un valor real, fins i tot monetari, i sobretot com el constructor d'un espai mental on poder-se reconèixer. En el moment que els boscos desapareixen, són «fum i cendra», diu Rovira i Virgili; prenent-los de Ruyra, perduren per mà i obra de l'escriptor, i, de fet, en desaparèixer la paraula encara cobra més valor, un valor més simbòlic. El paisatge descrit i fabulat per l'escriptor, viu en la nostra memòria, forma part del nostre passat, esdevé un referent viu, una part fonamental de l'imaginari col·lectiu. És clar que, vista en perspectiva, la transformació que va sofrir el paisatge sota l'efecte del bosc, tot i desoladora, va ser molt menor que l'esdevinguda després sota la febre urbanitzadora, no exactament d'aquells boscos, encara força conservats, però sí de la costa de Llevant, de la Costa Brava, que obliga a fer una abstracció important per tornar a imaginar el paisatge natural, per trepitjar-lo, olorar-lo, sentir-lo. El tema ens transporta a l'actualitat més candent de la transformació urbanística que ha arrasat el paisatge natural. Sols el record personal de cadascú, ben exigü i breu, o la literatura, la pintura, el cinema poden retornar-nos-el.

Marc Recha, autor de pel·lícules com *L'arbre de les cireres* (1998), s'hi referia en un article dedicat a Ruyra; la seva mirada de cineasta a la recerca d'espais de solitud on sigui possible projectar la personalitat de l'individu li fa exclamar: «Aquests espais vitals [...] ¿són passat mig segle encara vàlids? Perquè l'aglomeració estiuenca al litoral és tal, i la insaciable fallera constructora arriba a punts d'una hilaritat barroera, que a vegades se'ns fa impossible aixoplugar-nos ni que sigui en un raconet per respirar i exhalar tot el que ens envolta» («Culturas», núm. 65, *La Vanguardia*, 17.9.2003). I després la lectura del paisatge ruyrià li fa dir:

El paisatge com un tot, com una mena de personatge principal que embolcalla la vida d'aquell llogarret. La força dels arbres, la mirada de les roques allà dalt, les muntanyes desafiant el temps que tot ho transforma. (*ibid.*)

Amb aquests mots Recha fa referència a l'esforç d'abstracció que cal fer per trobar-nos o retrobar-nos amb la natura i al trencament que s'ha produït en la nostra contemporaneïtat.

4. LA DESCRIPCIÓ DEL BOSC I EL SEU SIMBOLISME

Efectivament, llegint els relats de Ruyra, preferentment els inclosos a *Marines i boscatges*, es percep la màgia del bosc, del bosc primigeni i sagrat, que esdevé natura lúgubre, abismal, que atemoreix, extravia i perd. «Avís misteriós» és el relat en què el bosc esdevé central i mostra tot el seu simbolisme. Es tracta d'un somni, d'un malson premonitori que alerta de la mort de la mare del protagonista, circumstància que sols es delata al final del text. L'acció se situa en la sureda vella de Montigalà, cremada el 1928, de camí cap al mas Sàbat, concreta el personatge narrador, i la idea del viatge enmig d'una atmosfera de claror somorta, seguint la mare per camins perdedors fins que puja en un tren, produeix un estat d'angoixa extrema, de por i de trasbals fins que es desperta i el narrador s'adona que es tractava d'un somni, d'un somni premonitori, perquè, en tornar a Blanes, troba la mare enllitada i al cap de pocs dies mor.

Ruyra suggereix la malaltia de la mare i la mort a través de la descripció de la sureda vella de Montigalà, amb una atmosfera putrefacta que recorda les visions dels condemnats a l'infern a la *Divina comèdia*, de Dante, un autor i una obra

de gran influència en l'autor. La situació dels fets i la seva identificació mostren que Ruyra no inventa el marc del relat; no sabem si el cas fou real, tot i que la seva mare morí abans que Ruyra l'escrivís. En canvi, expliquen que l'escriptor utilitza el relat com un lloc d'experimentació i reflexió del sentiment de la por i la basarda, és a dir, investiga a través de l'espai literari. I això és d'un enorme valor. Diu el relat:

Les boscúries s'anaven acostant. Entràrem dins d'un bagueny rònc, ombradís, poblat de grossos suros vells i esparracats. Era la sureda vella de Montigalà; una sureda improductiva, que no s'era carbonada perquè els carretatges hagueren pujat més que la mercaderia. S'havia deixat que aquells arbres gegantins anessin morint per llur saó, i tal volta feia més d'un segle que malaltejaven. Prou que la coneixia, jo, la sureda vella de Montigalà, paratge paorós, on no havia sentit mai refilar cap moixó, ni cantar cap llenyataire. Allí l'aire era humit i estava impregnat de fetors de rescloïment i de floridura semblants a les que es perceben en una cambra habitada per miserables.

La mare, apartada de mi algunes passes, caminava silenciosa, vessant avall de la muntanya. Jo la seguia contorbat, llambregant amb basarda aquells surassos caducs, que cargolaven sobre mon cap llurs branques malgirbades, cobertes d'una llarga molsa, blanca com els pèls d'un jai. Ratats molts d'ells arran del sòl pels ricards bosellats pels corcs, escorxats i escorpitats a trossos; minats alguns per podridures que els convertien el cor en una massa groga i tova, que es desfeia, al més petit fregadís, en una serradina impalpable com tabac en pols; abonyegats altres per monstruosos tumors, que es reben-taven i regalimaven formant en terra sinuosos xaragalls; aqueixos buidats per esvorancs espantosos, aquells esber-

lats de dalt a baix i amb la meitat dels feixucs membres caiguda a llurs peus; tots colossals, nafrats, enteranyinats i polsosos; presentaven un aspecte grandios de desolació que esfereia. Se diria que eren condemnats per Déu a un sofriment terrible sense gemegor ni esplai de cap mena. (*Obres completes*, p. 151)

Ja he dit que el bosc es relaciona simbòlicament amb l'inconscient, però també amb el principi femení; així doncs, la presència de la mare hi és pertinent. El que és fonamental, però, és la reflexió sobre la sensació universal de por i de basarda, de solitud humana que ens envolta, i Ruyra hi al·ludeix a través de la descripció de la seva sureda de Montigalà; la transforma, la converteix en una natura malalta, amb sentiments propis, que s'imposa a l'individu.

Aquesta idea s'estén al llarg de tot el recull de 1903, fins al punt que la por còsmica és una de les sensacions centrals del recull a través de la presentació d'una natura venjativa i atàvica. Així, per exemple, és central en relats com «La xucladora», «Mar de llamp» o «Mànegues marines», on tota la natura, en aquests darrers davant una tempesta marina, «somnia monstrositats». També la intenció que es persegueix és clara: extreure i exposar els personatges davant les seves pròpies interioritats, la seva soledat, les seves inquietuds. «En aquell estat de tensió, els bonys de les ànimes —exclama el narrador de «Mànegues marines»— sortien a la cara.» Uns embogeixen, d'altres esdevenen malenconiosos i tristos, tots responen a l'exposició de la natura. La idea s'estén a textos com «La Fineta», en què la força del bosc, primigènia, balba i sexual, es personifica en l'«home del bosc», que, a més a més, fa de carboner; a «Jacobé», en què la noia s'estimba daltabaix d'un penya-segat, en una crida de la natura que reclama la seva presa; a «La vetlla dels morts», en què el músic protagonista també es perd al bosc i sent una

música inusitada que el fa emmalaltir. Tanmateix, potser sigui en el relat que porta per títol «La basarda» on es descriu la mateixa força irracional del bosc, en un marc referencial idèntic al descrit a «Avis misterios»: anant de camí a un mas de les Gavarres es fa fosc i l'imperi de les suposicions fantasmagòriques s'imposa al protagonista. No passa res, simplement la foscor se li tira al damunt i el personatge experimenta totes les manifestacions de la por. Qualsevol soroll el traspasa, però el silenci encara el comprèn més, té por d'estimar-se, dels lladres; té la sensació que algú el persegueix, que algú té fixos els ulls en ell i el vigila; la tensió se li fa insuportable fins que cau aterrit a terra i esclata en plors.

El fet serveix per a una llarga reflexió final, una interrogació general sobre «la por de lo infinit, de lo ignorat, aqueix sofriment intens que tothom ha experimentat alguna vegada». No hi ha resposta a l'interrogant obert i que el posa en relació amb tota la història de la humanitat, perquè és un sentiment omnipresent, sols fa la constatació de la seva existència.

5. CODA FINAL

No cal dir que aquest bosc és el de les rondalles populars, on comença l'aventura, o el dels llibres de cavalleria medieval. També Dante, un referent central en Ruyra, es perd en la boscúria i allí inicia el seu viatge cosmogònic. Pel que fa a Ruyra, aquest bosc primigeni, literari, sempre és descrit a partir dels boscos de les Gavarres, cremats el 1928. Hi constatem una certa evolució a partir de 1919, quan Ruyra publica el volum *La parada*; el sentit hi és més tancat i concret, en relació amb l'evolució ideològica de l'escriptor. Així, en el relat rondallesc titulat «El malcontent», les grosses alzines s'han convertit en «arbres de voluptuositat» que es contrapo-

sen als grans roures, «els arbres del poder i la dignitat» (*Obres completes*, p. 378), i la natura mateixa esdevé un temple cristià, un temple natural que atura el desvari del protagonista. El bosc, la natura blanenca propera a l'antic convent de Sant Francesc, adquireix un valor místic i sensual allhora a *Les coses benignes* (1925), el darrer relat important de l'escriptor que revela el seu tarannà franciscà d'aquells anys.

Potser per això l'escriptor es va prendre el foc del 1928 com un senyal contra ell «de l'enuig de Déu», fum i cendra purificadora, i ja no publicà cap més relat. De fet, el 1929 refermava aquesta decisió amb un conte irònic, *Sociòlegs d'ultratomba*, en què un cop mort davalla als llimbs per rebre el judici dels filòsofs clàssics sobre la seva obra.

Ben d'acord amb el final de l'obra, l'incendi es convertí en un homenatge vivent a l'escriptor. Va ser Josep M. Junoy, editor d'*Edicions de la Nova Revista*, qui, juntament amb el Vicenç Coma i Soley, gran amic de l'escriptor, decidiren publicar el volum de proses *Entre flames*, que aparegué el mateix any 1928 i l'edició del qual s'exhaurí en poc més de quinze dies. Ruyra escrigué en el breu pròleg:

Aquest llibre que s'edita a honor meva ha nascut entre dues flames: la del paorós incendi que ha devastat les Gavarres, on radicaven les meves suredes, i la de l'amor que, amb motiu d'aquesta desgràcia, els meus bondadosos amics s'han afanyat a manifestar-me.

Així, doncs, no pot portar altre nom que el que li confereix aquest doble baptisme de foc. (*Obres completes*, p. 387)



**SOCIETAT CATALANA
DE FÍSICA
I SOCIETAT CATALANA
DE QUÍMICA**

FONTS ALTERNATIVES

D'ENERGIA

**LES PILES DE COMBUSTIBLE,
A CÀRREC DE
PERE LLUÍS CABOT,
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA**

Des que ha pogut, l'home ha emprat l'energia per a la producció, el transport, el condicionament de les llars... Gran part de l'energia que consumim ve de la combustió de productes fòssils. Fa algunes dècades, ja es deia que les reserves naturals de petroli anirien disminuint de manera progressiva fins a exhaurir-se. Fins i tot es posava una data propera, tan propera com inquietant. Malgrat que sembla que aquesta data encara sigui llunyana, sí que és cert que en un futur indeterminat les reserves aniran disminuint fins a fer-se insuficients per a la demanda del moment. El temps passa ràpid i la humanitat ja comença a preparar el terreny per a les energies alternatives. D'altra banda, hem de tenir present que en la combustió del material fòssil s'emet diòxid de carboni i productes contaminants. El diòxid de carboni és un gas que produeix l'efecte d'hivernacle, al qual s'adjudica l'escalfament progressiu del planeta durant els darrers cinquanta anys. Cremar els combustibles fòssils té, per tant, una gran incidència en el medi.

En un futur no gaire llunyà, les fonts d'energia seran probablement molt diversificades i cadascuna tindrà aplicacions força específiques. Una classe de fonts d'energia alternatives són les piles de combustible, les quals s'alimenten de gas oxigen i una altra substància, com pot ser l'hidrogen o el metanol, que s'hi oxida sense produir flama. És a dir, el combustible es crema sense produir les grans temperatures que trobem en el foc, fins i tot es crema a temperatura ambient. A vegades es diu que hi té lloc una combustió freda. Les piles de combustible tenen un rendiment energètic gran, són silencioses, es poden construir de moltes mides diferents i permeten reduir o eliminar l'emissió de diòxid de carboni a l'atmosfera. Aquelles que empren hidrogen com a combustible no emeten diòxid de carboni ni contaminants, ja que el seu producte de combustió és aigua només. Juntament amb les bateries elèctriques, les piles de combustible són els únics sis-

temes que poden reunir la condició d'emissió nul·la en els vehicles. En aquesta conferència es presenten els tipus de piles de combustible i s'expliquen com aquests sistemes poden produir energia en una combustió sense foc ni contaminants.

1. INTRODUCCIÓ

L'expressió *el foc i el medi* suscita, d'entrada, el compendi de coneixements i discussió que es pot fer al voltant de la interacció que hi ha entre els dos conceptes que inclou. Per això pot semblar una mica estrany que dins d'aquest compendi s'inclouguin les piles de combustible. Sobretot perquè quan parlem de piles ens ve al cap de manera espontània, per associació d'idees, que es tracta d'una col·lecció d'objectes cilíndrics, plans o en forma de caixa, que tenen energia emmagatzemada i que podem fer servir per fer funcionar la ràdio, les joguines o arrancar el nostre vehicle. En primera instància, si no és que a causa d'una guspira, una pila o una bateria hi ha un incendi, no hi veiem foc enlloc.

També crida l'atenció que, darrere del terme *pila*, hi afegim l'expressió *de combustible*. El terme *pila de combustible* ve de l'anglès *fuel cell*, terme utilitzat per primer cop per Humphry Davy el 1802 (però que llavors no es referia al que actualment entenem per *pila de combustible*) i establert per Mond i Langer el 1889. William Robert Grove és considerat generalment el descobridor de la pila de combustible perquè va dedicar molts anys de la seva vida a desenvolupar-ne una, que la designava per *gaseous voltaic battery*; és a dir, *pila voltaica de gas*. No obstant això, la història diu que el gener de 1839, un mes abans que Grove publicés el seu treball, va aparèixer una carta en una revista en què el científic suís Schöenbein ja explicava correctament l'*efecte de la pila de*

combustible. El 1845 Grove va descriure un generador d'electricitat de pila de combustible complet i per això més aviat se l'ha de considerar l'inventor de la pila de combustible tècnica.

Combustible ja té a veure amb el foc, atès que justament l'hidrogen (el combustible) es pot cremar en atmosfera d'oxigen (comburent) produint una flama. També ho poden fer el metanol, l'etanol, els hidrocarburs com el metà, el propà, el butà i un llarg etcètera. A la combustió es produeix diòxid de carboni i aigua. Doncs bé, a una pila de combustible es generen els mateixos productes a partir dels mateixos reactius, però sense flama. I, en general, a temperatures molt més baixes.

D'altra banda, en la combustió obtenim calor, que podem fer servir per escalfar l'aigua sanitària. En el motor d'explosió aprofitem l'expansió dels gasos per fer moure els pistons i també el vehicle. La pila de combustible produeix energia elèctrica en un procés que es podria dir de *combustió freda* (terme proposat per Justí l'any 1962) o, més ben dit, *combustió electroquímica*, sense foc. Veurem ràpidament que això té conseqüències per al medi.

Els productes emesos a les combustions, que responen a una demanda energètica de la societat industrialitzada, condueixen a un augment de la concentració de gasos amb efecte d'hivernacle i/o contaminants a l'atmosfera del planeta. El CO₂ presenta efecte d'hivernacle i és un dels gasos als quals s'atribueix l'escalfament progressiu del planeta i el canvi climàtic. La concentració d'aquests gasos a l'atmosfera ha anat augmentant de manera contínua des de començaments de l'era industrial (cap a la fi del segle XVIII). Seguim en la mateixa tendència perquè encara hi ha reserves de petroli, gas natural i carbó. Països amb reserves de combustible sens dubte l'empraran per al seu desenvolupament. Malgrat que hi hagi encara algú que discuteixi si hi ha cap efecte humà sobre el clima, el cert és que darrerament hi ha

una presa de consciència de la necessitat que els països més desenvolupats reduïxin les seves emissions. Es calcula que els vehicles amb motor d'explosió són responsables de més del 25 % de l'emissió global de gasos amb efecte d'hivernacle. Els vehicles elèctrics amb acumuladors o pila de combustible poden satisfer la condició d'emissió nul·la, de manera que una de les accions positives seria imposar la fabricació d'un percentatge progressiu d'aquests tipus de vehicles.

Cal considerar també que les reserves de combustibles fòssils no són infinites i que ens podem trobar relativament aviat amb una demanda que no podrem satisfer. Aquest fet, i la responsabilitat que tenim de respectar el medi, fan necessària la cerca de fonts d'energia alternatives i netes.

Les piles de combustible poden tenir un paper destacat en un futur immediat a causa del seu baix impacte ambiental en la producció d'energia, del seu rendiment i de la seva versatilitat. El seu rendiment duplica fàcilment el de les màquines tèrmiques (que funcionen amb cicles de calor), i passen d'un 20 % a un 40-45 %. Per això, un vehicle que funciona amb una pila de combustible només emet la meitat dels gasos que un altre de les mateixes característiques que funciona amb un motor d'explosió i el mateix combustible que la pila, la qual cosa també suposaria d'entrada una reducció a la meitat de l'emissió de CO₂ (l'emissió d'altres gasos com el CO, òxids de nitrogen i compostos orgànics volàtils podria aproximar-se a zero). Si el combustible és H₂, l'emissió de CO₂ i contaminants és nul·la, ja que el producte final és aigua. Les piles de combustible són versàtils perquè, a més de poder usar combustibles diferents, es poden agrupar en mòduls d'acord amb les necessitats energètiques. Així, són aplicables en dispositius de petites dimensions, un mòbil per exemple, o fins a bateries estacionàries per a abastar les necessitats d'hotels o hospitals (i no fan falta torres de transmissió del corrent elèctric). Tenen altres propietats avantatjo-

ses. Produeixen calor mentre subministren corrent, de manera que podem obtenir aigua calenta i generar electricitat suplementària amb una turbina. En no tenir pràcticament parts mòbils, no pateixen trencaments i funcionen de manera silenciosa. No produeixen cendres ni consumeixen aigua, sinó que produeixen aigua de millor qualitat que la formada en cremar els combustibles fòssils.

Algunes piles de combustible ja s'han comercialitzat. No obstant això, la introducció de noves aplicacions, com per exemple a l'automòbil, i la seva expansió al mercat depenen del cost i de les polítiques d'actuació que s'adoptin als diferents països (contaminació, desenvolupament d'infraestructures...). El platí, catalitzador a la majoria de les piles de combustible, encara que només n'hi calgui molt poc i sigui recuperable, és car i escàs. Hi ha més procediments de generació d'energia neta que, sens dubte, es continuaran aplicant i potser n'apareixeran d'altres. Extrapolant l'evolució de les tendències energètiques d'aquests darrers anys, és probable que convivin en un futur diferents formes de producció d'energia respectuoses amb el medi, entre les quals tinguem les piles de combustible com un instrument apreciat.

2. PILES DE COMBUSTIBLE. CONCEPTE I CLASSIFICACIÓ

Una pila de combustible és una pila galvànica o voltaica en què la reacció de l'ànode (pol negatiu) és l'oxidació d'un combustible, per exemple H_2 (reactiu anòdic), i la del càtode (pol positiu), la reducció d'un oxidant, generalment O_2 (reactiu catòdic). Produeix corrent de manera continuada en circuit tancat a través d'una resistència externa mentre hi ha aportació externa dels reactius i eliminació dels productes.

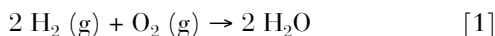
La pila de combustible converteix directament l'energia química dels reactius en energia elèctrica i no deixa de

donar-ne llevat que s'interrompi el subministrament de reactius o bé que el sistema falli. Noteu que la tecnologia convencional de produir electricitat a partir de combustibles és indirecta, és a dir, primer es transforma l'energia química dels reactius en calor (energia tèrmica); després, en energia mecànica i finalment, en energia elèctrica.

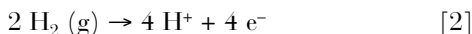
La diferència de les piles de combustible respecte a les convencionals rau en la manera en què se subministren els reactius i en la naturalesa d'aquests. A les piles primàries, per exemple les piles alcalines normals del mercat, els reactius s'inclouen al seu interior i per això es troben en una quantitat limitada. Aquestes deixen de funcionar quan els reactius s'acaben o queden en una forma que ja no és útil per a produir energia (es diu que estan «gastades» i ja no es poden fer servir més). També succeeix el mateix amb les piles secundàries (o acumuladors, per exemple la bateria dels cotxes), però en aquestes últimes es poden regenerar els reactius fent-hi circular un corrent elèctric de sentit contrari al que tenia lloc espontàniament a la pila (el qual fa invertir la reacció espontània de la pila). D'altra banda, les piles primàries i secundàries utilitzen reactius en fase condensada (sòlida o líquida de molta viscositat), mentre que a les piles de combustible els reactius solen ser gasosos (el combustible moltes vegades és H_2 i l'oxidant gairebé sempre és O_2).

Un exemple que ens ajudarà a discutir el principi de funcionament de les piles de combustible és la pila de Grove. A la figura 1 podem veure la cel·la elemental, construïda amb un ànode i un càtode. Els elèctrodes són de platí i estan submergits en una dissolució d'àcid sulfúric. *L'efecte de la pila de combustible*, és a dir, la producció d'electricitat en la reacció electroquímica de gasos, es va descobrir gràcies a tres contribucions científiques importants anteriors: el descobriment de l'hidrogen (descriu per T. Paracels al segle XVI com un gas lleuger format en dissoldre metalls en àcids, del qual

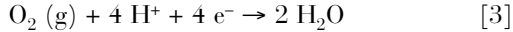
H. Cavendish va identificar la naturalesa el 1766), la invenció de la pila galvànica per Volta el 1800 (Nicholson i Carlisle van fer poc després l'electròlisi de l'aigua) i el descobriment de la catàlisi (J. W. Doebereiner va detectar la combustió espontània del H_2 en contacte amb Pt en pols a temperatura ambient, que dóna aigua, el 1823). Grove i Schönbein ja sabien que la reacció de la pila de combustible era la inversa de l'electròlisi de l'aigua, és a dir:



Hi ha diferents aspectes interessants que caldria comentar respecte a aquesta pila. En primer lloc, que té analogies amb una pila primària com és la coneguda pila Daniell, en què el Zn metàl·lic s'oxida a Zn^{2+} a l'ànode i el Cu^{2+} es redueix a Cu metàl·lic al càtode. En aquest cas, els electrons deixats pel catió Zn^{2+} , que abandona la xarxa cristal·lina del metall, van cap al càtode a través del circuit extern (que equival a una resistència que curtcircuita els terminals metàl·lics del Zn i del Cu) i allí es transfereixen al catió Cu^{2+} en dissolució, el qual es diposita com a Cu metàl·lic (sobre el càtode del mateix metall). Com a incís, podem dir que el mateix Grove havia construït una pila primària similar a la pila Daniell abans de fer la seva pila de combustible i que el mèrit d'aquesta última és el de fer reaccionar gasos. Ara sabem que a l'ànode de la pila de combustible de Grove l'hidrogen gas es transforma en protons:



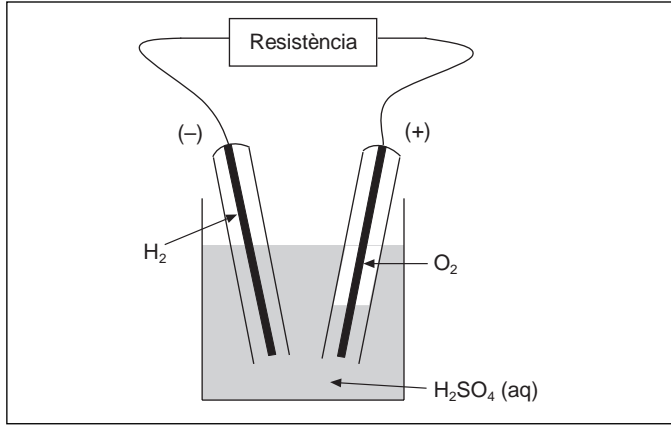
Els electrons alliberats circulen cap al càtode a través del circuit extern i allí redueixen l'oxigen a aigua, prenent protons a la dissolució d'àcid sulfúric:



Noteu que la suma de les reaccions [2] i [3] donen la reacció [1] i que, a diferència del que succeeix a la combustió de l'hidrogen per l'oxigen de l'aire, a la pila de combustible el H_2 i el O_2 no estan en contacte. La reacció associada a la pila té lloc perquè hi ha un transport d'electrons a través del circuit extern, a causa d'una diferència de potencial elèctric entre els terminals. L'aigua produïda s'acumula a la dissolució d'àcid sulfúric, que mulla els elèctrodes. Evidentment, quan circula el corrent a través del circuit extern, a la dissolució d'àcid sulfúric es produeix també un transport de càrrega: els protons (cations) es transporten cap al càtode i els ions sulfat (anions), cap a l'ànode. Els ions sulfat no reaccionen a l'ànode, sinó que neutralitzen la càrrega produïda pels protons que s'hi generen.

Si donem un cop d'ull als elèctrodes de platí de la pila de Grove, veurem que es tracta d'elèctrodes de formes similars a les dels elèctrodes emprats en altres tipus de piles, per exemple la pila Daniell; és a dir, elèctrodes en forma de làmina o barra. L'àrea activa és, en principi, tota la superfície exposada a la dissolució, ja que hi té lloc la reacció electroquímica. Així, un elèctrode de zinc a la pila Daniell es dissol gairebé d'una manera uniforme en tots els punts exposats. L'elèctrode de platí és inert, subministra o accepta els electrons de les reaccions com un conductor electrònic, transporta càrrega, però no canvia el seu estat d'oxidació. No obstant això, la funció de permetre les reaccions electroquímiques com la conversió del H_2 en H^+ i del O_2 en H_2O la pot fer en principi a tota la seva superfície. Encara podem dir més del platí. Aquest metall catalitza el procés d'oxidació de l'hidrogen i el de reducció de l'oxigen (també els processos inversos) i és el millor catalitzador per a aquestes reaccions. Veurem que moltes piles de combustible treballen a temperatures

molt més baixes que les reaccions químiques heterogènies catalitzades i per això l'ús del catalitzador a les piles de combustible és molt important.



290

FIGURA 1. Cel·la elemental de la pila de combustible de Grove en circuit tancat mitjançant una resistència externa.

Així doncs, les reaccions [2] i [3] tenen lloc a la superfície del platí submergit a la dissolució d'àcid sulfúric, la qual cosa vol dir que els gasos H_2 i O_2 s'han de dissoldre primer a la dissolució i després transportar-se fins a la superfície del metall, on reaccionaran. Cal tenir en compte que els gasos H_2 i O_2 són molt poc solubles en aigua i, per tant, la reacció tindrà lloc principalment als punts que hi tinguin més fàcil accés. En conseqüència, podem pensar a bombollejar el gas a través de la dissolució. Així saturarem fàcilment la dissolució amb el gas i, al mateix temps, la convecció produïda permetrà que els gasos dissolts arribin més fàcilment a la superfície del metall. El resultat d'això és que la pila subministra més corrent. Una altra manera de fer que la pila subministri més corrent és augmentar l'àrea dels elèctrodes. Així hi haurà més punts on podrà tenir lloc la reacció. L'efecte de

l'àrea activa exposada a la dissolució ja va ser intuïda per Grove, el qual va provar l'ús d'elèctrodes recoberts de negre de platí (platí en pols dipositat sobre una làmina d'aquest metall). Encara que va trobar una millora en el corrent produït, aquesta no va ser gaire significativa, a causa de la poca solubilitat dels gasos i el seu transport lent en dissolució. Falta donar un salt tecnològic molt important gràcies al qual té sentit parlar ara de les aplicacions pràctiques de les piles de combustible (la primera va ser com a generador de corrent a l'interior de les naus espacials de les missions *Apollo* el 1966). Aquest és el de la construcció dels elèctrodes de difusió de gas (*gas diffusion electrodes*, GDE).

Els elèctrodes de difusió de gas són elèctrodes porosos, hidrofòbics o hidrofílics, o també amb regions de diferent grau d'hidrofobicitat, que proporcionen una àrea activa molt gran amb el mínim impediment per a l'arribada dels reactius a la zona de reacció i l'eliminació dels productes d'aquesta. D'entrada, un elèctrode porós té una àrea interna molt més gran que la seva secció. Addicionalment, quan l'electròlit és un líquid, part dels porus de les cavitats internes estan plens de dissolució. Si l'elèctrode és hidrofílic, per exemple un elèctrode de metall sinteritzat com el níquel amb partícules de platí (preparat mitjançant escalfament i pressió del metall en forma de pols), el líquid penetra en els porus per capil·laritat i forma capes primes sobre el sòlid, com es mostra a la figura 2a. En aquesta figura es pot veure el que es coneix per *regió de tres fases*: una zona de contacte entre el gas, la dissolució i el sòlid. Un símil macroscòpic el trobarem a la platja, on l'aire, el mar i la sorra es troben en contacte al mateix temps. Un cop ha entrat a la interfase dissolució/gas, el gas es transporta ràpidament cap a la superfície del catalitzador, atès que la distància que separa aquesta interfase de la interfase catalitzador/dissolució és molt petita i els gasos dissolts no han de transportar-se distàncies tan grans com a una pila

de Grove. Els elèctrodes de difusió de gas són normalment discos plans, alimentats amb el gas per un costat i amb l'electròlit per l'altre. Com que a l'elèctrode hidrofílic el líquid es pot moure per capil·laritat a través dels porus, s'ha de donar al gas una pressió suficient per tal de controlar la penetració i fer que la zona de tres fases sigui estable. Una alternativa a fi d'evitar les pressions altes és fer un aglomerat de pols de carbó i partícules de catalitzador, cohesionat amb un material plàstic com el PTFE (politetrafluoroetilè). A causa d'aquest material, l'elèctrode és hidrofòbic i repel·leix l'entrada del líquid (figura 2b). Es poden obtenir regions de tres fases amb una àrea molt gran a partir de pólvores metàl·liques de $100 \text{ m}^2/\text{g}$ d'àrea específica o bé de carbó en pols de $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$. Els elèctrodes es construeixen d'acord amb la pila de combustible. En general, tenen diverses capes i només la que està en contacte amb l'electròlit té l'electrocatalitzador, normalment platí i en forma de partícules molt petites i disperses. Així, no s'empra més del que cal i es re-

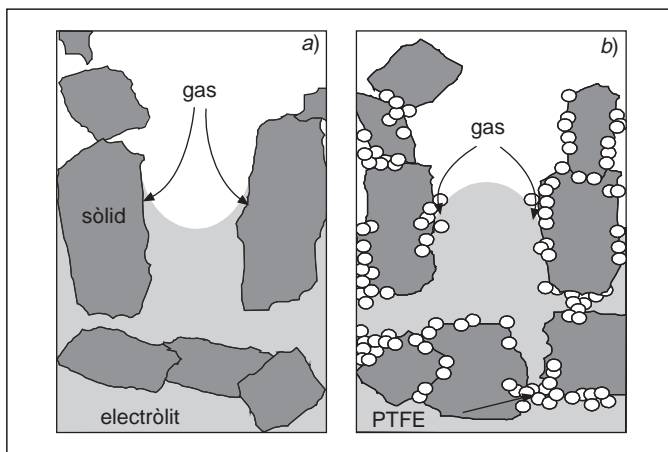


FIGURA 2. Regions de tres fases sòlid-líquid-gas en (a) un elèctrode hidrofílic i (b) en un d'hidrofòbic.

dueix el cost. D'aquesta manera, mentre que els elèctrodes plans de platí poden proporcionar densitats de corrent de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (corrents de μA per cada cm^2 de superfície), els elèctrodes de difusió de gas poden donar A/cm^2 (aquest cm^2 es refereix a la secció de l'elèctrode, no a l'àrea interna).

Atenent els reactius i la forma com es manipulen, les piles de combustible es poden classificar en directes, indirectes i regeneratives. A les primeres, el combustible s'introdueix directament a l'ànode, on s'oxida. A les piles indirectes s'obté el combustible, H_2 , a partir d'una substància orgànica (hidrocarburs, alcohols, etc.), que es transforma per *reforming* (reformació) (pila de combustible de *reforming*) o bé bioquímicament (pila de combustible bioquímica). En aquesta última, la biomassa es transforma en H_2 per l'acció d'un enzim en dissolució (o de bacteris que contenen l'enzim). A les piles regeneratives, es regenera el combustible a partir dels seus productes d'oxidació, emprant energia tèrmica, elèctrica, fotoquímica i/o radioquímica. La taula 1 mostra aquesta classificació i es donen exemples de piles de combustible directes en funció dels reactius i de la temperatura de treball. Aquestes piles reben el nom de *reactius*.

No obstant això, hem de tenir en compte que a la literatura s'han donat altres maneres de classificar les piles de combustible, per exemple atenent la pressió de treball, o bé

TAULA 1. *Classificació de les piles de combustible atenent els reactius i com es manipulen*

Directes			Indirectes	Regeneratives
Temperatura baixa (fins a 100°C aprox.)	Temperatura intermèdia ($100\text{-}500^\circ\text{C}$ aprox.)	Temperatura alta ($500\text{-}1.000^\circ\text{C}$ aprox.)		
$\text{H}_2 - \text{O}_2$	$\text{H}_2 - \text{O}_2$	$\text{H}_2 - \text{O}_2$	de <i>reforming</i>	tèrmiques
Comp. orgànics - O_2	Comp. orgànics - O_2	$\text{CO} - \text{O}_2$	bioquímiques	elèctriques
Comp. nitrogenats - O_2	$\text{NH}_3 - \text{O}_2$			fotoquímiques
H_2 - halogen				radioquímiques
Metall - O_2				

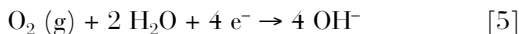
els combustibles i/o oxidants que usen (gasos com H_2 , NH_3 , aire i O_2 ; líquids com alcohols, hidrazina i hidrocarburs, o sòlids com el carbó, els hidrurs i els metalls). Una classificació pràctica és pel tipus d'electròlit. En aquest cas, podem distingir la pila de combustible alcalina o AFC (*alkaline fuel cell*), la d'electròlit polimèric o PEFC (*polymer electrolyte fuel cell*) o la SPEFC (*solid-polymer-electrolyte fuel cell*), la d'àcid fosfòric o PAFC (*phosphoric acid fuel cell*), la de carbonat fos o MCFC (*molten carbonate fuel cell*) i la d'òxid sòlid o SOFC (*solid oxide fuel cell*). Aquesta classificació és la que s'exposa a la taula 2, on consten les seves temperatures de treball, rendiments, l'electròlit i els elèctrodes emprats i les seves aplicacions principals.

3. PILES DE COMBUSTIBLE ALCALINES

Les AFC estan constituïdes per dos GDE, paral·lels i separats per un electròlit alcalí (figura 3), normalment una dissolució de KOH del 35% en pes per a treballar a temperatures de 60-90°C (taula 2). Cada GDE s'alimenta per H_2 o O_2 pur i se sol fer servir un col·lector de níquel per establir un bon contacte elèctric. Els gasos no es mesclen i s'injecten des de costats oposats a l'electròlit. El H_2 de l'ànode es dissol en l'electròlit a prop de la regió de tres fases i reacciona segons el procés:



mentre que el O_2 ho fa a prop de la regió de tres fases del càtode:



TAULA 2. *Classificació de les piles de combustible atinent l'electròlit*

	AFC	PEFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electròlit	35-50% KOH	Membrana polimèrica	H ₃ PO ₄ concentrat	Carbonats fosos (Li ₂ CO ₃ + K ₂ CO ₃)	ZrO ₂ estabilitzat amb Y ₂ O ₃ (YSZ)
Temperatures de treball	60-90°C	50-110°C	160-220°C	620-660°C	650-1.000°C
Electrodes	Metall o Pt sobre carbó	Pt sobre carbó	Pt sobre carbó	(-) Ni-Cr (+) NiO	(-) Ni/YSZ (+) La _{1-x} Sr _x MnO ₃ /YSZ
Combustible	H ₂	H ₂ (també de reforming) o CH ₃ OH	H ₂ de reforming	Mescles H ₂ +CO (de reforming)	Mescles H ₂ + CO (de reforming)
Oxidant	O ₂ o aire	O ₂ o aire	O ₂ o aire	CO ₂ + O ₂ o CO ₂ + aire	O ₂ o aire
Rendiments globals	50-60%	40-60%	55%	60-65%	55-65%
Aplicacions	Sistemes de tracció i aplicacions espacials	Sistemes de tracció i aplicacions portàtils i espacials	Plantes disperses (50-500 kW, 1 MW, 5 MW, 11 MW)	Generadors d'alta potència	Generadors d'alta potència

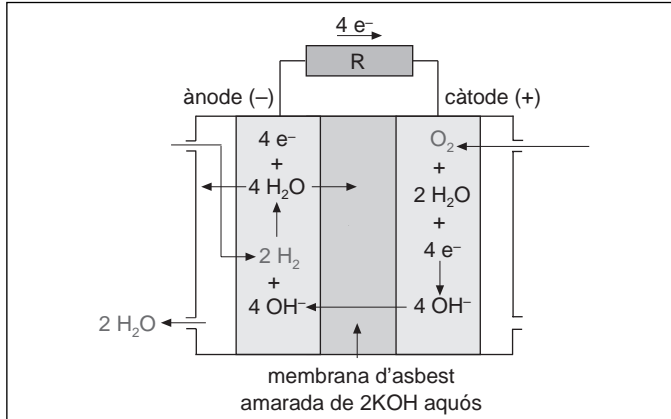


FIGURA 3. Esquema de la pila de combustible alcalina amb electròlit estàtic.

296

La suma d'aquestes dues dóna la reacció [1] indicada anteriorment. El voltatge en circuit obert d'aquesta pila és aproximadament d'1 V (la seva *fem* estàndard és de 1,229 V i els potencials estàndards dels elèctrodes amb les reaccions [4] i [5] són de -0,828 i 0,401 V, respectivament). Noteu que el signe positiu del voltatge indica que l'aigua es forma espontàniament en curtcircuitar els elèctrodes a través d'una resistència externa.

Al principi, els elèctrodes eren de Ni o aliatges de Ni (a vegades amb Pt per augmentar la velocitat del procés), però ara són de carbó-PTFE amb una dispersió de Pt com a electrocatalitzador. En general, es pot emprar menys Pt que a les PEFC i PAFC perquè la velocitat de reducció del O₂ en medi alcalí és més gran que en medi àcid. Per exemple, Elenco fabrica elèctrodes amb una càrrega relativament baixa de 0,6 mg cm⁻² de Pt dispers. També es poden emprar metalls no nobles com a electrocatalitzadors, de menys cost que el Pt. Així, els elèctrodes de Siemens fan servir Ni Raney dopat

amb Ti a l'ànode i Ag al càtode, aquest últim amb una càrrega relativament alta de 60 mg cm^{-2} . Considerant només la generació d'energia per la mateixa pila, l'AFC és la que pot donar un rendiment més alt (fins al 70% en alguns casos).

En aquestes piles se sol emprar H_2 i O_2 purs. En medi alcalí, el CO_2 de l'aire produeix K_2CO_3 , relativament insoluble, el qual pot precipitar als porus dels elèctrodes i disminuir les prestacions de la pila (en tot cas s'hauria d'eliminar el CO_2). Petites quantitats de CO al H_2 (si aquest gas prové de *reforming*) i compostos de sofre són capaços d'enverinar el catalitzador de l'ànode (en particular el Pt).

Quant a l'electròlit, aquest pot ser estàtic o bé circulant. En el primer cas, se sol amarrar una placa porosa (pot ser d'asbest) amb KOH, que també dona consistència a l'estructura de la pila. L'aigua generada a l'ànode s'elimina amb el H_2 , que es fa circular i se separa en un condensador. En el cas de circulació del KOH, és el mateix electròlit el que recull l'aigua generada a l'ànode i també fa les funcions de refrigeració. Llavors es pot prescindir de la purga de gasos a la pila (no obstant això, s'han de fer purgues periòdiques a fi d'eliminar possibles acumulacions de gasos inerts residuals). La dilució de l'electròlit amb l'aigua generada s'ha de compensar amb una evaporació parcial.

4. PILES DE COMBUSTIBLE D'ELECTRÒLIT POLIMÈRIC

Les PEFC o SPEFC tenen com a electròlit una membrana conductora de protons, que pot ser orgànica o inorgànica (taula 2). Aquests conductors protònics s'usen a temperatures inferiors a 150°C , ja que a temperatures altes els sòlids perden aigua i, si condueixen el corrent elèctric, ja no ho fan per transport de protons. Un tipus d'electròlit és una membrana de bescanvi de protons, és a dir, una membrana de $50\text{-}175 \mu\text{m}$

de gruix d'un polímer que sol ser similar al PTFE, però amb grups d'àcid sulfònic o amb altres grups enllaçats (les membranes s'han d'hidratar perquè els protons es puguin transportar). Llavors la pila rep el nom de *pila de combustible de membrana de bescanvi protònic* o PEMFC (*proton exchange membrane fuel cell*). La companyia Dupont de Nemours fabrica des dels anys 1960 les membranes de Nafion, algunes de les quals són de conductivitat similar a la d'una dissolució de H_2SO_4 1 M.

Com que l'electròlit és conductor dels protons, les reaccions dels elèctrodes són les mateixes que per a una pila àcida com la de Grove, és a dir, les reaccions [2] i [3], i evidentment la reacció global és la inversa de l'electròlisi de l'aigua, reacció [1]. A diferència de les AFC, les PEFC produeixen l'aigua al càtode, l'elèctrode on són transportats els protons (figura 4). Aquesta aigua és arrossegada cap a la purga de l'oxigen d'alimentació. S'ha de tenir cura d'evitar la deshidratació de la membrana, que faria disminuir la velocitat de transport dels protons, però també d'evitar l'acumulació d'aigua al càtode, la qual cosa en produiria la inundació.

Els elèctrodes són GDE de carbó-PTFE catalitzats

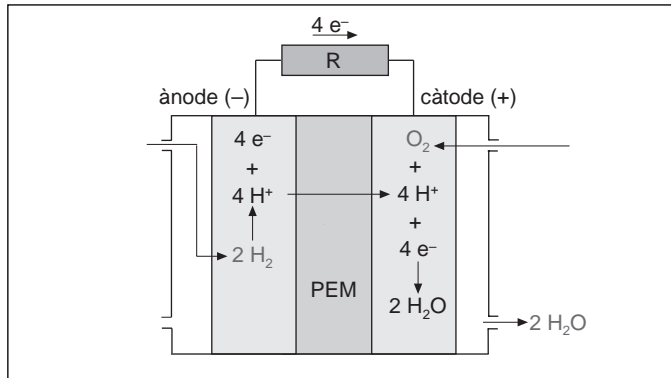


FIGURA 4. Esquema de la pila de combustible d'electròlit polimèric.

amb Pt (per ara és el que dóna més bons resultats). Aquest es prepara dispers en forma de partícules molt petites, de 2-5 nm de diàmetre, amb una càrrega de fins a 4 mg cm⁻². Per a un bon funcionament, s'ha de procurar que el Pt estigui en contacte al mateix temps amb el O₂, la membrana i el carbó. Per això se sol impregnar la superfície de l'elèctrode que estarà en contacte amb la membrana d'una pintura que conté material solubilitzat d'aquesta última.

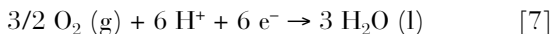
Les PEFC presenten l'atractiu que no empren líquids corrosius (com el KOH de les AFC) i tenen una relació potència-pes (densitat de potència) molt gran, però les membranes tenen un cost relativament alt i només poden treballar a temperatures en què siguin estables. A temperatures inferiors a 100°C, els elèctrodes pateixen més el problema de l'enverinament del Pt pel CO quan el H₂ s'obté per *reforming* (només uns quants ppm de CO disminueixen significativament les prestacions de la PEFC). Una solució és convertir el CO en CO₂ en passar l'hidrogen contaminat a través d'un reactor amb un catalitzador i entrada de O₂. Actualment, s'estan desenvolupant membranes que es mostren estables a temperatures molt superiors als 100°C, la qual cosa permetrà alleugerir el problema de l'enverinament. També s'està treballant en el desenvolupament de catalitzadors menys sensibles al CO residual (com aliatges de Pt-Ru).

La densitat de potència de les PEFC les fa molt atractives per a motors elèctrics de tracció, atès que en aquest cas la mida i el pes de la pila han de ser tan petits com sigui possible. Si s'utilitza H₂ pur, s'ha de tenir en compte que el vehicle haurà de transportar el gas comprimit en botelles. Si el H₂ és de *reforming*, el vehicle haurà de transportar el seu propi *reformer* i el gas (CH₄, per exemple) o el líquid (com el CH₃OH) que es vulgui processar. Per això hi ha un gran interès a desenvolupar (tant a Europa com als Estats Units) una pila de combustible que utilitzi metanol directa-

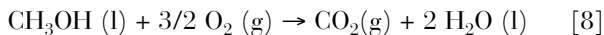
ment com a reactiu de l'ànode, el qual s'oxida segons la reacció:



Hi ha pocs alcohols que puguin donar una reacció com aquesta. L'oxigen de l'aire es pot reduir al càtode segons la reacció:



i, per tant, la reacció global associada a la pila és:



La reacció [8] ja no és la inversa de l'electròlisi de l'aigua, sinó la de *combustió electroquímica* del metanol.

El metanol és un líquid i, per tant, és fàcil de transportar, guardar i dosificar, és abundant i de baix preu, i els seus productes són només CO_2 i H_2O . D'altra banda, l'ús d'una membrana polimèrica permet obtenir una bona relació potència/pes. Una pila com aquesta és una PEFC, però com que utilitza metanol directament com a combustible (no necessita *reforming*) s'anomena *pila de combustible de metanol directe* o DMFC (*direct methanol fuel cell*), o (DMFC)-PEFC. El combustible sol ser una dissolució aquosa de metanol 1-2 M. A la figura 5 se'n mostra l'esquema de funcionament.

Els seus inconvenients principals són: la velocitat de reacció del metanol, sobretot a temperatures baixes, la qual cosa fa que s'hagin de buscar catalitzadors més eficients i treballar a temperatures tan altes com sigui possible; uns rendiments d'un 40%, més baixos que els que tenen altres piles de combustible, tot i fer servir més quantitat d'electrocatalitzador;

una densitat de potència inferior a la PEFC de H_2 ; la permeabilitat del metanol a través de les membranes polimèriques (perfluorosulfòniques) que s'estan fent servir (la qual cosa condueix a una pèrdua del combustible a través del càtode i modifica el potencial d'aquest elèctrode), i l'enverinament del Pt per productes de la reacció (CO i grups COH i CHO).

Millores que permeten solucionar alguns d'aquests problemes són: l'ús d'aliatges de Pt-Ru per tal de disminuir l'enverinament; l'ús de membranes més gruixudes dopades amb Cs^+ i concentracions de metanol fins a 2 M a fi de disminuir el transport de metanol a través de la membrana, i l'ús d'altres catalitzadors al càtode, com $Mo_2Ru_3S_5$ (fase de Chevrel) i Fe-porfirina (que donen millors prestacions que el Pt afectat pel metanol).

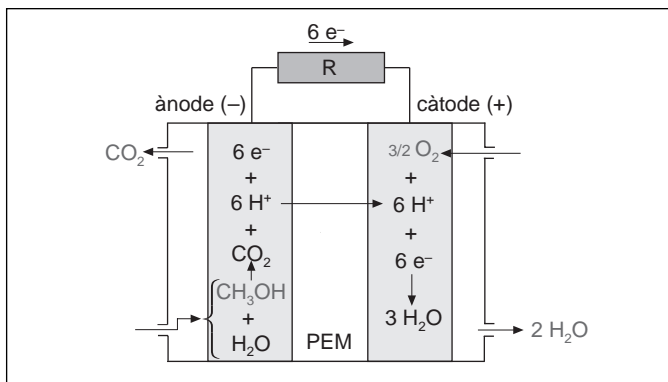


FIGURA 5. Esquema de la pila de combustible de metanol directe.

5. PILES DE COMBUSTIBLE D'ÀCID FOSFÒRIC

Les PAFC van aparèixer com a resultat de la investigació de piles de combustible amb electròlits àcids, ja que els medis alcalins presentaven el problema del CO_2 comentat anteriorment.

Es va trobar que els àcids minerals corrents no tenien la conductivitat suficient a temperatures prou distants de l'ebullició. Els oxoàcids es descomponen amb els catalitzadors a temperatures altes i enverinen els elèctrodes. L'àcid perclòric en contacte amb el combustible és explosiu. Els haloàcids com el fluorhídric i el clorhídric són molt corrosius. Els àcids perfluorosulfònics podrien anar bé per la seva conductivitat, estabilitat tèrmica, alta solubilitat de l'oxigen i poca adsorció sobre els catalitzadors de Pt, però fan que els elèctrodes s'inundin. Tampoc no és convenient treballar a temperatura baixa, ja que la velocitat de reducció de l'oxigen és més petita que en medi alcalí.

L'àcid fosfòric és feble a temperatura ambient, però per sobre dels 150°C, l'àcid pur es troba en forma polimèrica com a àcid pirofosfòric, un àcid fort de conductivitat suficientment gran. La temperatura alta i el fet que l'àcid només s'adsorbeixi molt poc sobre el Pt afavoreixen la reducció del O₂. Altres avantatges (també a temperatures altes) són una bona fluïdesa, la pressió de vapor baixa, la solubilitat alta del O₂ i la corrosivitat baixa. Aquest va ser finalment l'àcid escollit, el qual s'empra a concentracions properes al 100 %.

Els elèctrodes són GDE de carbó-PTFE amb partícules disperses de Pt amb uns 5 m² g⁻¹ de superfície específica com a electrocatalitzador (aproximadament 0,1 mg cm⁻² a l'ànode i 0,5 mg cm⁻² al càtode). Es troben separats per una matriu porosa de partícules de carbur de silici unides amb PTFE (per retenir l'àcid i donar consistència al conjunt), la qual conté l'àcid fosfòric pur. La temperatura de treball és de 160-220°C i la calor despresada a la reacció fa necessari l'ús de refrigerants. Se sol utilitzar H₂ procedent del *reforming* de gas natural com a reactiu anòdic (a la temperatura de treball, l'efecte del CO no és tan important i els elèctrodes el toleren fins a una concentració del 1,5 %). Les reaccions són les mateixes que per a les PEFC i la pila de Grove, és a dir, les reaccions [1] i [3]. Un esquema del seu funcionament es pot veure a la figura 6.

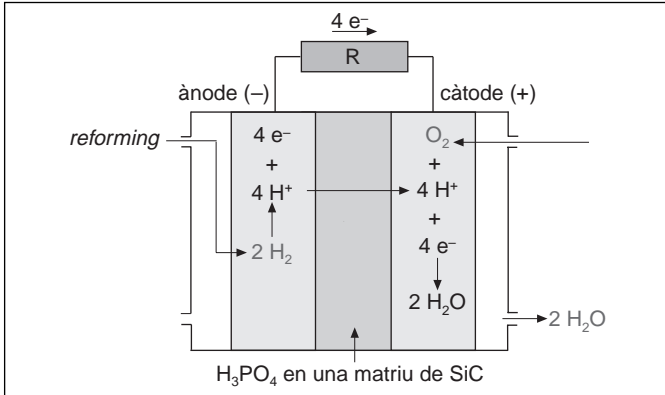


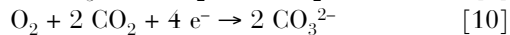
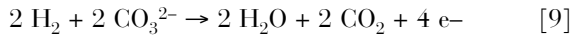
FIGURA 6. Esquema de la pila de combustible d'àcid fosfòric.

El problema que presenten aquestes piles és el de la inestabilitat dels carbons dels elèctrodes en medi aquós a la temperatura de treball, condicions a les quals es corroeixen i donen productes gasosos. La pèrdua de material permet l'agregació de les partícules de Pt, amb la consegüent davallada de les prestacions de la pila. No obstant això, aquest problema es pot disminuir fent tractaments tèrmics adients als carbons, controlant la temperatura i el voltatge de la pila, fent passar N_2 quan la pila no està funcionant i emprant H_3PO_4 pur com a electròlit. D'aquesta manera, s'han aconseguit temps de vida comercialment interessants (unes quaranta mil hores) i són, de fet, les úniques piles de combustible comercials. Les PAFC ja foren introduïdes el 1967 i s'han construït amb potències de fins a 11 MW (aplicacions estacionàries). Tenen un rendiment en energia elèctrica del 40 %, però en cogeneració poden arribar a un rendiment global del 85 %.

6. PILES DE COMBUSTIBLE DE CARBONAT FOS

Les MCFC van ser desenvolupades en cercar piles de combustible amb elèctrodes que no fossin perjudicats pel CO i que no tinguessin la necessitat d'emprar metalls nobles com a catalitzadors. En aquestes piles, l'electròlit és una mescla de carbonats, per exemple la mescla eutèctica 68% Li_2CO_3 + 32% K_2CO_3 , líquida a la temperatura de treball de les MCFC (600-700°C) i que amara una matriu ceràmica porosa de LiAlO_2 .

L'ànode pot ser de Ni porós amb un 10% en pes de Cr (per tal d'evitar la sinterització del Ni), amb porus de 3-6 μm de diàmetre, i el càtode de NiO amb Li, amb porus de 7-15 μm de diàmetre. Els porus de la matriu ceràmica que conté l'electròlit són més petits que els dels elèctrodes per tal de mantenir una regió de tres fases estable (a les temperatures de treball no hi ha un material que faci les funcions del PTFE de les altres piles). Els processos anòdic i catòdic, que no necessiten metalls nobles per ser electrocatalitzats, són, respectivament:



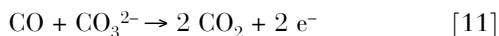
La suma d'ambdues reaccions torna a donar la reacció [1], la inversa de l'electròlisi de l'aigua. S'ha de tenir en compte que el potencial estàndard d'electrode de la pila associada a la reacció és 1,23 V a 25°C, però a 650°C baixa fins a 1,02 V. Per això, les MCFC que treballen a pressió atmosfèrica donen 0,70-0,75 V a 150-160 mA cm^{-2} per cada cel·la unitat. No obstant això, el voltatge de la pila millora significativament en augmentar la pressió.

Com que el CO no perjudica l'ànode, es pot utilitzar directament el gas que es produeix al *reforming* (la composició típica del gas de síntesi que surt d'un *reformer* de gas

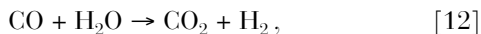
natural és d'un 72% H₂, 15% CO, 11% CO₂ i 2% CH₄). El CO₂ i el vapor d'aigua que es formen a l'ànode són evacuats per una purga junt amb el H₂ i el CO que no han reaccionat. Es pot cremar completament aquesta mescla, separar l'aigua per condensació i el CO₂ es transporta cap al càtode, on es necessita per a la reacció [10]. El rendiment d'aquestes piles és del 60% i pot arribar a un 85% de rendiment global en cogeneració.

La calor després en aquesta pila pot ser emprada en el *reforming* i també en moure una turbina, amb la qual cosa es produeix energia elèctrica addicional. Normalment, el *reforming* es fa fora de la pila, però hi ha també la possibilitat de fer-lo intern, cas en què tenim una pila de combustible de carbonat fos de *reforming* intern o IRMCFC (*internal reforming molten carbonate fuel cell*). En podem veure un esquema del funcionament a la figura 7. S'introdueix el gas natural al compartiment anòdic, on hi ha el catalitzador del *reforming* (químic), i es produeix H₂ a la temperatura pròpia de la pila. S'ha d'eliminar prèviament el sofre del gas per tal que no enverini aquest catalitzador. L'hidrogen generat s'oxida a l'ànode segons la reacció [9]. El CO també s'oxida, però en menor extensió, segons la reacció anòdica següent:

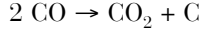
305



A més, es dona la reacció química de desplaçament:



amb la qual cosa el CO també contribueix al funcionament de la MCFC. D'altra banda, és convenient humitejar el gas que ve del *reforming* per tal que no precipiti carbó segons la reacció de Boudouard:



[13]

Les MCFC presenten el problema que, en treballar a temperatures altes, es necessiten materials resistent a la degradació, que tinguin una expansió tèrmica adient i que assegurin l'estanqueïtat. Alguns acers amb Cr són adients, però el seu cost augmenta significativament el de la pila. Un altre problema és que els càtodes de NiO són una mica solubles en el carbonat fos. Els ions Ni^{2+} resultants es redueixen a la matriu ceràmica i poden arribar a curtcircuitar els elèctrodes. S'han trobat solucions que milloren aquest problema: afegir carbonats de Ca, Ba o Sr a l'electròlit o bé emprar altres càtodes, com el LiCoO_2 , que té una velocitat de dissolució molt petita. Les MCFC també tenen l'inconvenient que la reducció del O_2 , que encara és la reacció lenta, condueix a peròxids i a superòxids com a productes inicials de la reacció.

306

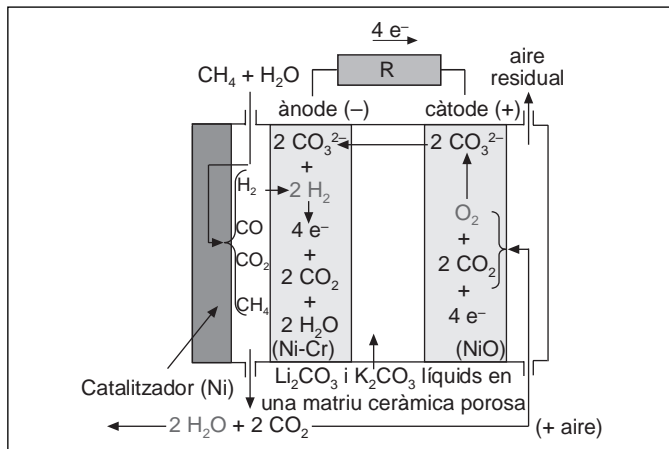


FIGURA 7. Esquema de funcionament d'una pila de combustible de carbonat fos amb reforming intern.

7. PILES DE COMBUSTIBLE D'ÒXID SÒLID

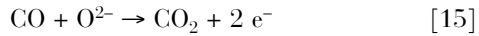
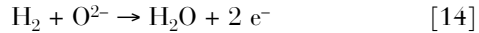
Les SOCF treballen a altes temperatures (650-1.000°C) utilitzant com a electròlit un material ceràmic no porós capaç de conduir el corrent per migració d'ions òxid en fase sòlida i de conductivitat electrònica insignificant. Com les MCFC, tampoc no necessiten l'ús d'electrocatalitzadors cars i, a més, tenen l'avantatge respecte d'aquestes que no s'han de controlar possibles pèrdues d'electròlit líquid ni s'ha de fer circular CO₂ cap al càtode.

Típicament s'empra com a electròlit ZrO₂ estabilitzat per Y₂O₃ (8-10 % molar), anomenat *YSZ* (*yttrium-stabilized zirconia*). L'itri estabilitza l'estructura de fluorita del ZrO₂ i li proporciona una conductivitat alta. En aquest òxid, hi ha vacants d'ions O²⁻ (la conducció es realitza per transport dels ions òxid a través d'aquestes vacants), ja que tres ions O²⁻ substitueixen quatre ions O²⁻ quan dos ions Zr⁴⁺ són substituïts per dos ions Y³⁺. S'està estudiant l'ús de CeO₂ dopat o bé Bi₂O₃, que són més bons conductors a temperatures inferiors, la qual cosa comportaria un menor cost de materials, però tenen l'inconvenient que es redueixen a l'ànode a conductors electrònics amb més facilitat que el YSZ.

Els elèctrodes han de ser bons catalitzadors, bons conductors electrònics, estables químicament i mecànica, i d'expansió tèrmica compatible amb els altres elements de la pila. A més, l'ànode ha de ser tolerant als contaminants amb sofre. L'ànode pot ser una mescla íntima de Co o Ni i ZrO₂ (es tracta d'un *cermet*, ja que consta d'un material ceràmic i un altre de metàl·lic). Ara per ara, el més recomanable per les seves prestacions és de Ni/YSZ, amb un 35 % de Ni. El càtode més adient és una perovskita de LaMnO₃ dopat amb Sr (LSM), de fórmula La_{1-x}Sr_xMnO₃ (0,10 < x < 0,15), mesclada íntimament amb YSZ. Tant l'ànode com el càtode han de ser porosos per deixar passar els gasos cap a les regions de tres fases,

que són microscòpiques i estan esteses per tot l'elèctrode (en no haver-hi cap líquid, no hi ha problemes d'estabilitat d'aquestes regions).

La figura 8 mostra un esquema del funcionament d'aquesta pila quan s'empra combustible procedent d'un *reforming* (mescla de H_2 i CO). A l'ànode, les reaccions que hi tenen lloc són:



Les proporcions de H_2 i CO poden ser variables, de manera que en general la reacció que tindrà lloc es pot escriure com:

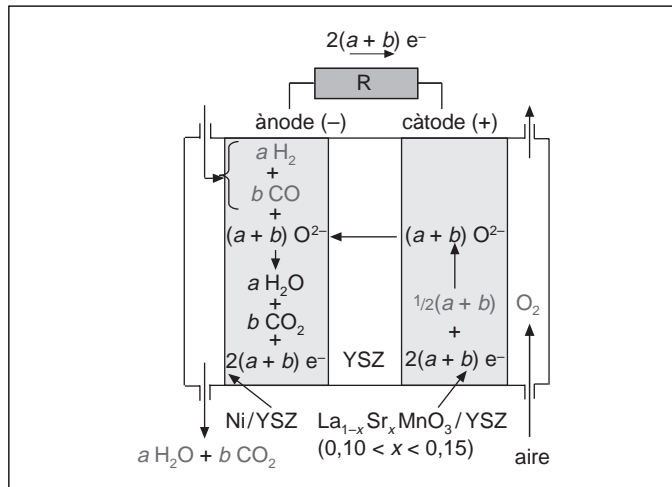
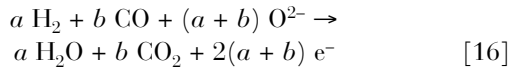
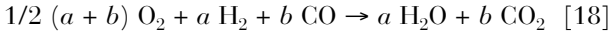
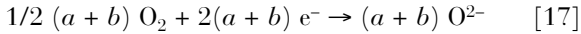


FIGURA 8. Esquema del funcionament d'una pila de combustible d'òxid sòlid.

D'acord amb aquest procés anòdic, la reacció catòdica i el procés global seran:



Les SOFC, més que les MCFC, necessiten materials resistents a la degradació, que tinguin una expansió tèrmica adient i que assegurin l'estanqueïtat a les temperatures de treball. Les connexions elèctriques es poden realitzar amb aliatges de Cr o La-Ca-Y i l'estanqueïtat es pot obtenir amb vidre Pyrex, però els problemes relacionats amb l'expansió tèrmica i l'estabilitat mecànica són difícils de resoldre. S'està estudiant l'ús d'electròlits amb conductivitat més gran que permetin treballar a temperatures inferiors i, d'aquesta manera, disminuir el cost. El rendiment de les SOFC és d'un 60% i, amb cogeneració, el rendiment global pot arribar fins a un 85%.

309

8. APLICACIONES DE LES PILES DE COMBUSTIBLE

Com s'ha indicat abans, la fem estàndard d'una pila en què la reacció associada sigui la inversa de l'electròlisi de l'aigua és de 1,229 V. Com que les piles de combustible reals no reuneixen les condicions per arribar a l'estat estàndard, la seva fem és d'aproximadament 1,0 V. Òbviament, aquest valor pot ser suficient per a aplicacions de molt poc consum, però en general necessitarem voltatges molt més grans. La solució és la connexió de cel·les elementals en sèrie, ajuntant-ne tantes com siguin necessàries (com a les piles primàries i acumuladors); d'aquesta manera es poden fer funcionar des d'instruments portàtils fins a grans instal·lacions estacionàries.

El pioner de més èxit en el desenvolupament de piles de combustible amb aplicacions tecnològiques va ser F. T. Bacon, que justament va desenvolupar les AFC. El 1938 va construir-ne una fent servir elèctrodes de malla de níquel separats per un tub d'asbest amarat amb una dissolució de KOH al 27%. Treballava fins a una temperatura de 200°C i a una pressió de 210 bar. També podia funcionar com a electrolitzador. El 1949 Bacon va construir-ne una altra amb elèctrodes porosos de níquel (metall sinteritzat), que van permetre augmentar la densitat de corrent des de 13 mA cm⁻² (pila del 1938) fins a 1,076 A cm⁻². Cap als anys 1950 va obtenir una pila de 5 kW amb elèctrodes porosos de Ni (ànode) i d'òxid de níquel i liti (càtode), separats per un electròlit circulant de KOH al 30%. Treballava a 200°C amb una pressió màxima de 50 bar per evitar l'ebullició de l'electròlit. Els elèctrodes tenien dues capes amb diferent porositat: la que estava en contacte amb el gas tenia porus d'uns 30 µm de diàmetre, mentre que la que estava en contacte amb l'electròlit tenia porus amb un diàmetre màxim de 16 µm. La regió de tres fases es mantenia estable ajustant la pressió dels gasos, atès que no hi havia llavors un plàstic hidrofobitzant estable a la temperatura de treball.

La companyia Pratt & Whitney Aircraft Division va modificar la pila de Bacon per aplicar-la al programa espacial *Apollo* de la NASA els anys 1960-1965. Va afegir Pt als elèctrodes de la pila de Bacon per poder treballar a una pressió de 3,3 bar. En aquest cas, els elèctrodes feien 20 cm de diàmetre i una gruixària de 2,5 mm (la pila de combustible estava constituïda per 31 cel·les elementals, és a dir, parelles ànode-càtode). L'electròlit era KOH al 85% (sòlid a temperatura ambient, però líquid per sobre de 100°C), concentració que impedia l'ebullició de l'electròlit a 200-230°C (temperatura de treball). Cada pila pesava 109 kg i tenia una potència aproximada de 1,5 kW. Se'n van construir 92, i 54

van ser utilitzades en 9 vols a la Lluna i a les missions *Sky-lab* i *Apollo-Soyuz*.

La companyia United Technologies Corporation (UTC) va produir la pila de combustible del transbordador espacial *Space Shuttle* a partir del gener del 1974 i va ser emprada per primer cop el 1981. Cada transbordador tenia 3 piles. Cada una tenia 32 cel·les elementals (de 465 cm² d'àrea activa), 2 kW de potència màxima (27,5 V i 436 A) i 100 kg de pes aproximadament. En una missió de 7 dies consumia 750 kg de H₂ i O₂ per proporcionar corrent elèctric a la nau i produïa aigua potable i de refrigeració (el vapor d'aigua generat a l'ànode es condensava en una centrifugadora per l'absència de gravetat). L'ànode era de carbó-PTFE amb 10 mg cm⁻² de Pt i Pd (relació de 80 a 20) com a catalitzador (el col·lector del corrent era una malla de Ni recoberta de Ag). El càtode era també de carbó-PTFE amb 20 mg cm⁻² de Au i Pt (relació de 90 a 10) com a catalitzador (el col·lector de corrent era de Ni recobert d'Au). L'electròlit era KOH al 35-45%, totalment immobilitzat per un separador d'asbest. La pila treballava a 92°C i a una pressió de 4,0-4,4 bar. Posteriorment, la pila ha estat millorada per disminuir-ne el pes (elèctrodes més primers, materials més lleugers), de manera que les relacions potència-pes i energia-volum superen les d'altres sistemes galvànics, amb la possible excepció de futures PEFC. S'han documentat temps de vida de 15.000 hores en alguns prototips de mida més petita.

Fins als anys 1980 es pot dir que pràcticament només els centres universitaris estudiaven les piles de combustible. El convenciment que arribarà un dia que s'exhauriran els combustibles fòssils i la lluita contra la contaminació d'aquests combustibles han fet que s'anessin desenvolupant fonts d'energia alternatives. Les propietats de les piles de combustible, l'actual conjuntura energètica i els estudis que n'indiquen la viabilitat econòmica fan que s'hagi despertat

un interès per comercialitzar-les. Actualment, es fa un esforç important per millorar i optimitzar els catalitzadors, les membranes, les connexions elèctriques i el tractament dels combustibles i dels gasos residuals per tal de reduir-ne el cost. El resultat és l'existència d'una gran quantitat de prototips a tots els nivells, en aplicacions portàtils, en el transport i en aplicacions estacionàries. Encara que les úniques piles de combustible comercials són les PAFC, no hi ha dubte que les altres podran entrar al mercat en un futur immediat, no com a fonts d'energia excloents d'altres, sinó més aviat complementàries.

Les piles de combustible troben aplicacions en diferents camps segons la seva naturalesa i propietats (taula 2). Per exemple, s'han trobat adients les PEMFC (que poden emprar el H_2 acumulat en un hidrur metàl·lic) i les DMFC (que poden emprar una dissolució emmagatzemada de metanol) per a aplicacions portàtils com telèfons mòbils, càmeres de vídeo, ordinadors i alarmes antirobatori. El consum d'energia relativament petit es pot satisfer amb aquestes piles de temperatura baixa.

Les AFC, PEFC i DMFC es posen ràpidament en marxa i la seva velocitat de resposta és superior a les d'alta temperatura. Respecte dels vehicles elèctrics que funcionen amb acumuladors, tenen l'avantatge que el temps de recàrrega és molt inferior (recarregar un acumulador consumeix molt més temps que omplir el dipòsit amb hidrogen o metanol). Per això es poden aplicar amb èxit com a fonts d'energia per als motors elèctrics de vehicles, des de motocicletes fins a autobusos. En aquests, tant poden ser font d'energia principal com suplementària. Pràcticament totes les companyies de vehicles de transport han construït prototips amb piles de combustible. N'hi ha que funcionen amb el H_2 emmagatzemat en botelles a pressió, en forma líquida o en hidrurs, i també amb el H_2 produït a partir del *reforming* del metanol, el gas natural o la

gasolina. També n'hi ha que utilitzen un dipòsit de metanol per alimentar una DMFC. El càtode s'alimenta amb el O_2 de l'aire. Hi ha bones perspectives en aquestes aplicacions, atès que l'emissió de gasos contaminants i d'efecte d'hivernacle disminuirien de manera significativa, la qual cosa seria molt benvinguda. Segons enginyers de la General Motors, el cost d'aquests vehicles resultarà comparable als actuals. En relació amb això, hem de fer esment del projecte CUTE (Transports Urbans Nets per a Europa), que compta amb l'ajut de la Unió Europea i té com a objectiu la implantació de l'hidrogen com a font d'energia per al transport públic; hi participen Barcelona, Madrid, Amsterdam, Estocolm, Hamburg, Stuttgart, Londres, Luxemburg i Porto. Aquest projecte comprèn 30 autobusos Mercedes-Benz Citaro, de 12 m de llargada, amb capacitat per a 70 passatgers, una autonomia de 200-250 km i una velocitat màxima de 80 km/h, tres dels quals Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) té en funcionament des de 2003. Els autobusos porten botelles d'hidrogen al sostre i recarreguen el gas en 7 minuts a l'*hidrogena* de la Zona Franca de BP, que obté l'hidrogen per electròlisi de l'aigua a partir d'energia fotovoltaica.

313

Les PEFC i les PAFC són suficients per a les aplicacions domèstiques (en trobar-se situades a prop del punt de consum elèctric, no hi ha pèrdues importants de potència a les línies). Més de 200 PAFC de més de 200 kW ja han estat instal·lades amb èxit en hospitals, hotels, edificis amb oficines, escoles i altres llocs. Per a grans aplicacions estacionàries, es poden fer servir les MCFC i les SOFC, en les quals el CO del *reforming* no és perjudicial sinó útil i no necessiten Pt com a catalitzador (metall car que no és gaire abundant). Tenen una posada en marxa més lenta que les de baixa temperatura, però les seves temperatures de treball permeten generar energia elèctrica addicional mitjançant una turbina i també produir aigua calenta i per a la calefacció.

Hem vist que la majoria de les piles de combustible necessiten H_2 , que no es troba lliure a la naturalesa i, per tant, s'ha de produir (no són fonts d'energia primàries). No obstant això, ens podem preguntar: què farà servir la humanitat com a font de llum i calor quan els combustibles naturals s'hagin exhaurit? Cyrus Harding, l'enginyer fictici de l'obra *L'illa misteriosa*, escrita per Jules Verne l'any 1874, ja la va contestar d'una manera força encertada: aigua, però descomposta en els seus elements químics i, sens dubte, descomposta per electròlisi. Sense oblidar que podem obtenir energia elèctrica dels salts d'aigua, del vent, del mar i del Sol (a partir de plaques fotovoltaïques), quan parlem de combustibles l'hidrogen es perfila com un candidat segur (un altre candidat segur és la biomassa, però també en podem obtenir hidrogen). L'electroquímic australià J. O'M. Bockris ja va proposar l'any 1962 una *economia de l'hidrogen* obtingut a partir de l'energia solar i va augurar que l'hidrogen seria el combustible de tots els mitjans de transport. Podem pensar en motors d'explosió d'hidrogen i en motors elèctrics que funcionen amb piles de combustible. Els rendiments d'aquests últims dupliquen els dels sistemes d'explosió. Bona perspectiva per a les piles de combustible.

BIBLIOGRAFIA

Barcelona Verda, núm. 90 (octubre 2003).

CABOT, P. L. (2002). «Les piles de combustible com a sistemes electroquímics per a les alternatives energètiques». *Revista de la Societat Catalana de Química*, núm. 3, p. 49-61.

CARRETTE, L.; FRIEDRICH, K. A.; STIMMING, U. (2000). «Fuel cells: Principles, types, fuels, and applications». *Chemphyschem*, núm. 1, p. 162-193.

- Fuel Cells (2000) [en línia]. <<http://www.fuelcells.org/>>
- FUNDACIÓ TERRA [ed.] (abril 2003). *Perspectiva Ambiental*, núm. 27.
- KORDESH, K.; SIMADER, G. (1996). *Fuel cells and their applications*. Weinheim: VCH.
- VIELSTICH, W.; GASTEIGER, H. A.; LAMM, A. [ed.] (2003). *Handbook of fuel cells: Fundamentals, technology and applications*. Vol. 1-4. Chichester: Wiley.
- WILKINSON, D. P. (2001). «Fuel cells. An electrochemical solution to global climate change in the 21st century». *Interface*, núm. 10, p. 22-25.



**SOCIETAT CATALANA
DE FÍSICA
I SOCIETAT CATALANA
DE QUÍMICA**

FONTS ALTERNATIVES

D'ENERGIA

**MATERIALS AVANÇATS
PER A L'ENERGIA FOTOVOLTAICA,
A CÀRREC DE
JORDI ANDREU BATALLÉ,
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA**

El subministrament energètic actual depèn, en gran mesura, dels combustibles fòssils. Durant quant temps es pot mantenir aquesta situació? Quina és l'aportació actual de la producció fotovoltaica d'energia? Quines són les limitacions de la tecnologia fotovoltaica actual? Quines perspectives de futur obren els nous materials per a la producció de la propera generació de plaques fotovoltaïques?

1. INTRODUCCIÓ

Dins del cicle «El foc i el medi», organitzat per l'Institut d'Estudis Catalans, aquesta conferència tracta sobre els materials avançats per a la conversió fotovoltaica de l'energia solar. En el nostre cas, bé podríem fer un joc de paraules: què podria fer el foc per al medi? La resposta és que hi pot fer molt. El Sol, com a màxim representant del foc, pot ser la font d'energia més respectuosa amb el medi ambient. La conversió fotovoltaica de l'energia solar és el mètode més avançat i eficaç de conversió de l'energia del Sol en energia elèctrica.

Tractarem a continuació la situació actual del mercat energètic, la viabilitat de la conversió fotovoltaica de l'energia solar, així com la contribució que podem esperar dels nous materials a la producció de plaques fotovoltaïques més eficients i econòmiques.

2. SITUACIÓ DEL MERCAT ENERGÈTIC

El consum mundial d'energia ha crescut el 2,6% l'any 2002; aquest valor és superior al creixement mitjà en els darrers deu anys, que ha estat de l'1,4%. La Xina, amb un creixement del 20%, és el país que més ha contribuït a aquest augment, ja que la resta del món ha crescut menys de l'1%.

En la figura 1 observem que l'energia consumida s'extreu, majoritàriament, dels combustibles fòssils: petroli, gas natural i carbó. Només una petita part es produeix a partir de les centrals hidroelèctriques. També hi ha una petita contribució dels combustibles nuclears.

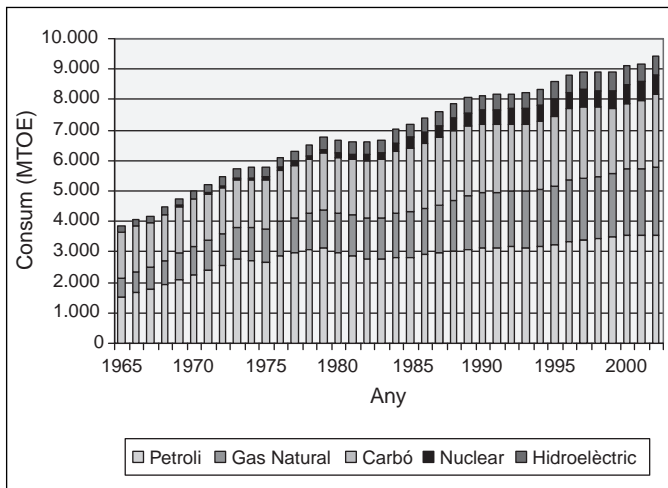


FIGURA 1. *Evolució del consum mundial d'energia.*

Els combustibles fòssils són responsables de l'augment de CO_2 a l'atmosfera, que té com a conseqüència l'escalfament global del nostre planeta. Per aquest motiu, s'estan fent esforços per reduir l'ús d'aquests combustibles.

D'altra banda, cal tenir present que les reserves mundials de combustibles fòssils s'estan exhaurint. És molt difícil estimar durant quant temps podrem disposar de combustibles fòssils, però en podem obtenir un paràmetre indicatiu: el quocient entre les reserves i el consum anual. Aquest paràmetre és actualment de seixanta anys per al gas natural i de quaranta anys per al petroli.

No és raonable esperar un acabament sobtat de les reserves de combustible, però sí un increment gradual del preu dels combustibles fòssils, el qual impulsarà el desenvolupament de noves fonts energètiques. La conversió fotovoltaica de l'energia solar és una d'aquestes fonts. Com que prové directament de l'energia del Sol, diem que aquesta font d'energia és renovable i, segons els materials utilitzats, molt respectuosa amb el medi ambient.

3. CONVERSIÓ FOTOVOLTAICA DE L'ENERGIA SOLAR

Una placa fotovoltaica permet convertir la radiació solar que arriba a la seva superfície en corrent elèctric. Com que la radiació solar que arriba a la superfície varia segons l'hora solar i la situació atmosfèrica, una placa fotovoltaica produeix una potència variable. Per classificar la producció energètica de les plaques, s'ha definit una il·luminació de referència (AM1,5), que correspon a una energia de 1.000 W/m^2 amb un espectre normalitzat que s'ha obtingut amb mesures estadístiques sobre la radiació solar real. La potència nominal de les plaques és la potència que produeix la placa quan la il·luminem amb aquesta radiació de referència (AM1,5). Una placa d'un metre quadrat amb un rendiment del 15% té una potència nominal de 150 W. La potència nominal d'una central fotovoltaica és la potència elèctrica que subministraria aquesta central amb la radiació de referència.

Com que la radiació solar és variable, la potència que produeix una central fotovoltaica sota il·luminació solar també varia. Però en un lloc determinat, l'energia que envia el Sol durant un any és pràcticament constant. Això permet confeccionar mapes de la radiació solar que fan possible calcular l'energia anual que produirà una central fotovoltaica. A Catalunya, l'energia anual que proporciona el Sol és approxi-

madament equivalent a 1.500 hores de radiació AM1,5 (unes quatre hores diàries). Una central de 1 kW pic produiria 1.500 kWh anuals. Hi ha diferents causes que fan que les centrals produeixin una mica menys d'energia que la que determinem amb aquest càlcul simple. Per a centrals fotovoltaïques situades a Catalunya s'obté una producció anual de 1.200 kWh per cada kW pic.

Sovint s'han presentat objeccions a la conversió fotovoltaica de l'energia solar que es basen en un desconeixement o mala informació de les característiques d'aquesta tècnica. Una primera objecció és que l'espai necessari per instal·lar les centrals fotovoltaïques és excessiu. És molt fàcil estimar la superfície necessària per abastir un determinat territori amb la tecnologia actual. A Catalunya, amb un consum anual per habitant de 6.000 kWh d'energia elèctrica i una població de 6 milions d'habitants, calen 36.000 milions de kWh anuals. Per produir aquesta energia, necessitem una potència nominal instal·lada de 30 milions de kW pic. Amb plaques con-

321

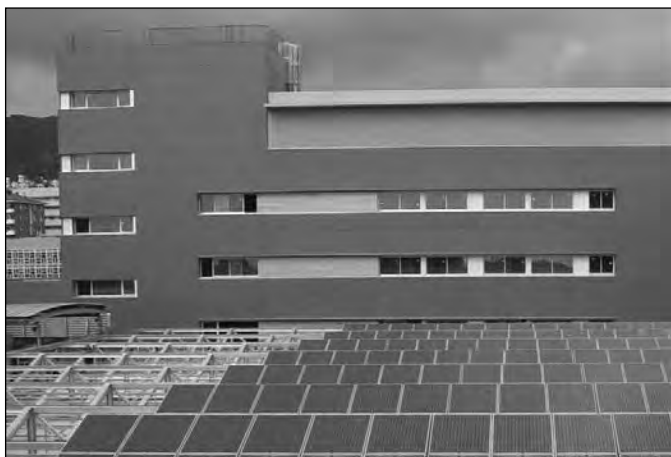


FIGURA 2. Atri solar de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona.

vencionals del 15 % de rendiment, cal una superfície de 200 milions de m², que representa una superfície inferior a la d'un quadrat de menys de 15 km de costat. Cal tenir present que les centrals fotovoltaïques s'integren en edificis o altres infraestructures i que no ocupen un espai exclusiu. Un exemple d'aquestes centrals integrades és l'atri solar de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona, que es mostra a la figura 2.

Una altra objecció és que l'energia necessària per produir una placa fotovoltaica és més gran que l'energia que subministrarà en tota la seva vida útil. Això no és cert, ja que les plaques actuals proporcionen l'energia que s'ha utilitzat en produir-les en menys de tres anys i la seva vida útil és superior als trenta anys.

Malgrat el que hem dit fins ara, la producció fotovoltaica d'energia solar és actualment marginal si la comparem amb el consum mundial d'energia.

Però és important destacar que el creixement de la producció de plaques fotovoltaïques ha mantingut una mitjana superior al 20 % anual durant els darrers vint anys. Els punts de la figura 3 mostren una estimació de l'energia anual que produeixen els sistemes fotovoltaïcs, expressada en equivalents energètics de tones de petroli (TEP). La línia blava representa l'evolució de l'energia produïda anualment per aquests sistemes fotovoltaïcs, la qual suposa un creixement de la producció anual de plaques del 23 %. La línia vermella discontinua representa el consum mundial anual de totes les fonts d'energia per al 2002. Veiem que aquest consum anual d'energia es podria abastir amb energia solar fotovoltaica l'any 2050. Per tant, si es manté el creixement actual, la producció fotovoltaica d'energia solar entrarà en el mercat global de l'energia en un període de quaranta a cinquanta anys. Un creixement del 50 % anual de la producció de plaques permetria escurçar aquest període a només vint anys, tal com

mostra la línia verda de la gràfica. Aquest creixement de la producció és fàcilment assolible si alguna de les noves tècniques de plaques en capa prima passa a industrialitzar-se en una producció en sèrie a escala mundial.

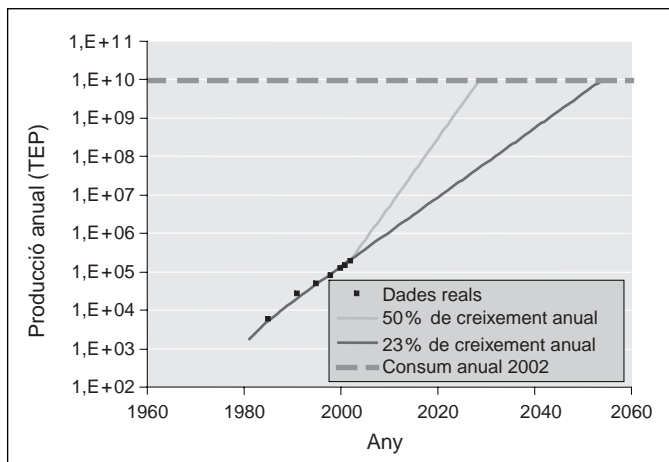


FIGURA 3. *Creixement de l'energia produïda per centrals fotovoltaïques.*

No ens ha de sorprendre el temps que cal perquè la producció fotovoltaica de l'energia solar estigui en condicions de substituir, totalment o parcial, la producció d'energia elèctrica a partir de combustibles fòssils. Això passa sempre que un sistema tecnològic ha de substituir un d'anterior. Podem posar-ne un exemple en el desenvolupament de l'automòbil. Al principi, es veia només com un divertiment exòtic digne d'aristòcrates. La producció d'automòbils era marginal i no es considerava un sistema de transport comparable al tren o als sistemes de tracció animal. Van caldre molts anys de desenvolupament tecnològic i d'industrialització per arribar a l'actual estat de desenvolupament.

4. TECNOLOGIA CONVENCIONAL

El descobriment de l'efecte fotovoltaic s'atribueix a Edmond Becquerel, que el 1839 va observar que una bateria augmentava la seva tensió quan un dels elèctrodes s'exposava a la llum. Albert Einstein va donar, el 1905, una explicació convincent del fenomen, per la qual va ser guardonat amb el Premi Nobel.

Pearson, Chapin i Fuller, dels Laboratoris Bell, van iniciar el 1950 el desenvolupament pràctic de les cèl·lules solars per a la producció d'energia. El seu objectiu era construir una petita central de producció d'energia elèctrica per alimentar els satèl·lits artificials.

La tecnologia actual de cèl·lules fotovoltaïques utilitza cristalls de silici, amb procediments de producció similars als utilitzats en la indústria electrònica. Un cristall de silici de gran àrea té una cara que incorpora una petita quantitat d'àtoms de fòsfor i la conducció elèctrica es realitza pel moviment de càrregues negatives (electrons), mentre que l'altra cara incorpora una petita quantitat d'àtoms de bor i la conducció elèctrica es realitza pel moviment de càrregues positives (forats). Entre les dues cares apareix, de manera natural, un camp elèctric. Tenim, així, un dispositiu anomenat *unió p-n*.

Quan la llum incideix sobre el silici, crea càrregues positives i negatives, que són separades pel camp elèctric. Entre el contacte metàl·lic superior (en forma de reixa) i el contacte metàl·lic inferior, apareix un corrent elèctric. La figura 4 mostra una cèl·lula de silici cristal·lí.

Els cristalls de silici es fabriquen amb un procés complicat. S'extreu l'oxigen de la sorra mitjançant un procés de reducció química. El silici obtingut es purifica en diferents etapes i un procés de creixement de cristall de silici permet obtenir lingots cilíndrics que són tallats a llesques d'uns 300 μm de gruix. El procés és molt car i actualment gran part del silici que

s'utilitza per fabricar plaques fotovoltaïques ha estat rebutjat per la indústria electrònica.

Encara que els processos de producció de cèl·lules de silici cristal·lí evolucionen contínuament, el cost de fabricació de les plaques fotovoltaïques basades en cristall de silici és molt alt i és la principal causa que el cost de producció de l'energia elèctrica amb centrals fotovoltaïques sigui més de quatre vegades més alt que el de la producció basada en centrals convencionals. Per tant, hi ha un gran interès a desenvolupar tècniques de producció de plaques fotovoltaïques que en permetin disminuir els costos de producció.

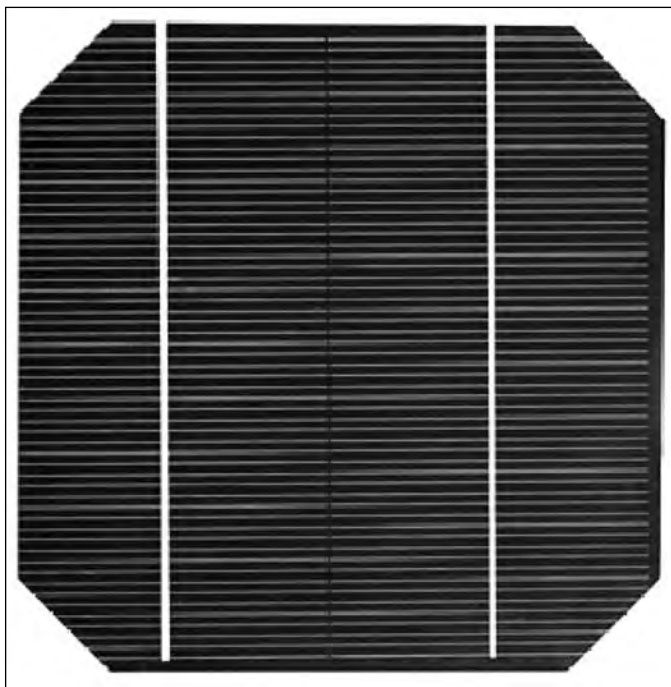


FIGURA 4. Cèl·lula solar de silici cristal·lí.

5. TÈCNiques EN CAPA PRIMA

Una de les tècniques amb més perspectives de futur es basa en capes primes de silici microcristal·lí hidrogenat ($\mu\text{-Si:H}$). El Grup d'Energia Solar Fotovoltaica i Electrònica de Gran Superfície, integrat en el Centre de Referència en Materials Avançats per a l'Energia de la Generalitat de Catalunya (CeRMAE), està desenvolupant aquesta tecnologia de plaques fotovoltaïques.

Les plaques fotovoltaïques en capa prima es basen en el mateix principi de les cèl·lules de cristall de silici, però el semiconductor amb què es construeix la placa és només una capa molt prima dipositada sobre un suport (substrat). Les primeres plaques de silici en capa prima que s'han desenvolupat es basen en silici amorf hidrogenat (a-Si:H) i ja fa uns anys que s'utilitzen per alimentar petits dispositius electrònics (calculadores, rellotges...). També existeixen comercialment plaques de silici amorf per a la construcció de centrals fotovoltaïques. El rendiment inicial d'aquestes plaques pot assolir valors prou grans (del 13%), però disminueix al cap d'unes mil o dues mil hores d'exposició a la llum solar i s'estabilitza en valors de només 6,5% o 7%. Aquest rendiment s'aconsegueix mitjançant una tècnica molt sofisticada basada a dipositar tres cèl·lules una sobre l'altra.

326

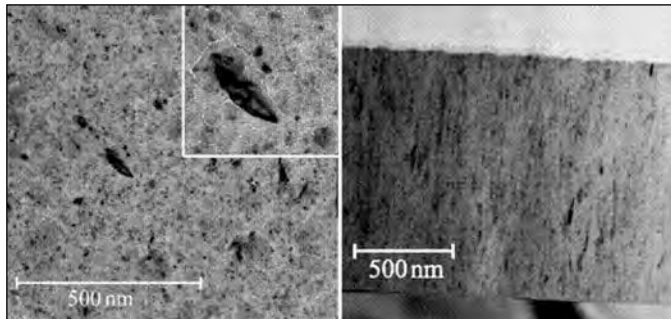


FIGURA 5. *Imatges de microscopi electrònic del silici microcristal·lí hidrogenat.*

Aquest efecte de degradació induïda per la llum no apareix en el silici microcristal·lí. Hi ha una intensa activitat de recerca per tal d'utilitzar aquest material en la producció de plaques de baix cost i alt rendiment.

El silici microcristal·lí és un material semiconductor no homogeni format per cristalls de silici d'uns 10 nm de grandària dins d'una matriu de silici amorf hidrogenat. Els cristalls ocupen la major part del volum del material i el silici amorf hidrogenat ocupa l'espai entre els cristalls. Les característiques òptiques del material són molt similars a les del silici cristal·lí. Les característiques de transport de corrent són més similars a les del silici amorf; en particular, la mobilitat dels portadors és baixa i cal utilitzar cèl·lules amb una capa activa intrínseca situada entre la capa dopada tipus p i la capa dopada tipus n. Hi ha dues configuracions possibles: amb substrats transparents se sol utilitzar la configuració p-i-n, mentre que si el substrat és opac se sol utilitzar la configuració n-i-p. En tots dos casos la llum entra primer per la capa p de la cèl·lula).

Una cèl·lula d'unió p-i-n o n-i-p funciona bé si la capa intrínseca és molt prima (entre 500 nm i 1.000 nm). Però el silici microcristal·lí té una absorció òptica baixa (transició òptica indirecta) i caldria un gruix gran de la capa de silici intrínsec (i) per absorbir tota la llum incident sobre la cèl·lula. És fàcil calcular el corrent màxim que podríem obtenir amb una cèl·lula de silici en funció del gruix. La figura 6 mostra aquest resultat per a silici cristal·lí i per a silici microcristal·lí hidrogenat.

Podem observar que, amb una cèl·lula de 1.000 nm, només obtenim una petita part del corrent màxim, que és de 43 mA/cm².

El mètode principal per millorar el rendiment de les cèl·lules de silici microcristal·lí és augmentar el corrent de la cèl·lula mitjançant tècniques que permetin incrementar la quantitat de llum absorbida. Aquestes tècniques s'anomenen *tècniques de confinament òptic* i les descriurem a continuació.

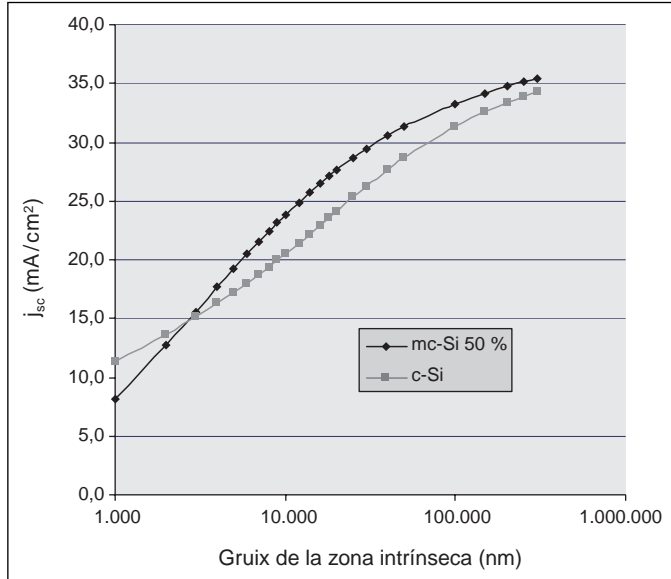


FIGURA 6. Densitat de corrent de la cèl·lula en funció del gruix.

La figura 7 mostra un esquema d'una cèl·lula n-i-p de silici amb una estratègia de confinament òptic. Sobre un substrat de vidre es diposita una capa metàl·lica reflectora; al damunt, un conductor transparent (SnO_2 o ZnO); després, les capes de silici n-i-p i, finalment, un altre conductor transparent. La llum incident travessa l'estructura n-i-p de silici, on és parcialment absorbida, es reflecteix en el mirall metàl·lic posterior i torna a travessar la n-i-p. L'òxid conductor transparent és rugós i dispersa la llum incident; en conseqüència, la llum travessa l'estructura n-i-p obliquament i, per tant, el seu recorregut efectiu a través del silici és diverses vegades el gruix de la capa de silici. Aquest fet augmenta la quantitat de llum absorbida i, per tant, el corrent de la cèl·lula.

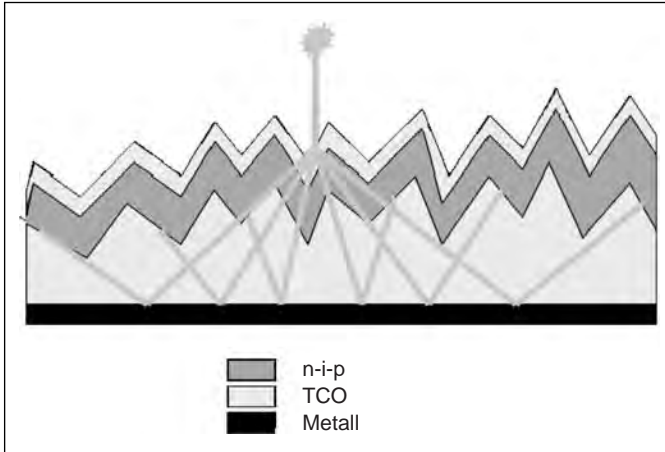


FIGURA 7. Confinament òptic d'una cèl·lula d'unió n-i-p.

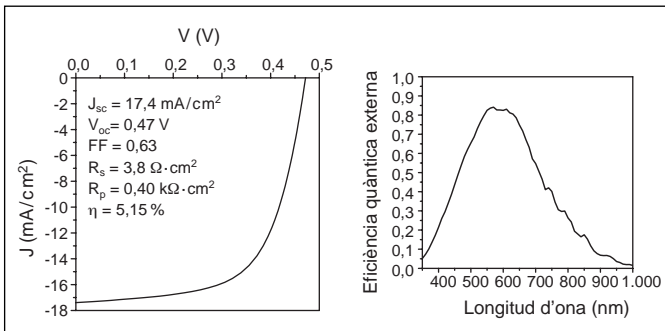


FIGURA 8. Corba $I(V)$ i eficiència quàntica externa per a una cèl·lula de $\mu\text{c-Si:H}$.

La figura 8 mostra la corba $I(V)$ d'una cèl·lula solar de silici microcristal·lí obtinguda pel nostre grup. La primera gràfica mostra el corrent en funció de la tensió. Encara que el rendiment és moderat, un resultat important és que es manté estable després de cinc mil hores d'il·luminació. D'altra

banda, veiem que el corrent és molt més petit que el màxim de 43 mA/cm^2 que obtindríem si tota la llum solar fos absorbida per la capa intrínseca.

La segona gràfica mostra l'eficiència quàntica externa en funció de la longitud d'ona de la llum incident. Aquest paràmetre ens indica la proporció de fotons d'una determinada longitud d'ona que són absorbits per la cèl·lula. Aquesta gràfica és de gran utilitat per estudiar el confinament òptic en cèl·lules de silici microcristal·lí.

Quan es comença a desenvolupar una nova tecnologia de plaques fotovoltaïques, és molt útil estimar quin és el màxim rendiment que podem assolir. Aquesta estimació es basa en els paràmetres optoelectrònics del material i en un model del comportament del dispositiu. Si utilitzem un model teòric per a la cèl·lula p-i-n o n-i-p de silici microcristal·lí i suposem que aconseguim absorbir tota la llum en una cèl·lula de només 500 nm , obtenim un rendiment de més del $19,3\%$, mentre que si aconseguim absorbir tota la llum solar en una cèl·lula de 1.000 nm obtenim un rendiment del $17,1\%$.

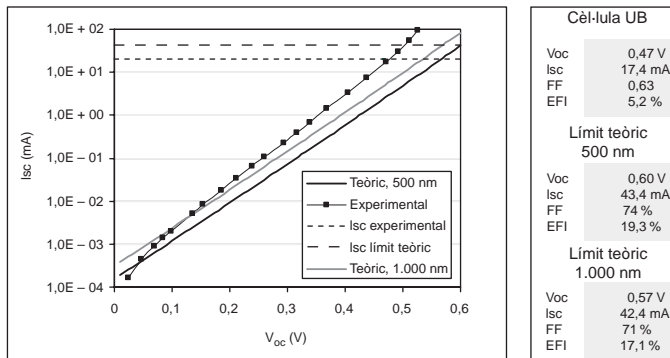


FIGURA 9. Estimació del rendiment màxim d'una cèl·lula de silici microcristal·lí.

6. SUBSTRATS PLÀSTICS FLEXIBLES

Quan un substrat sobre el qual s'ha de dipositar el silici en capa prima s'introdueix en el sistema de dipòsit, cal esperar un temps determinat abans de començar a dipositar la capa de silici. Si la superfície de substrat que es carrega en cada operació és petita, el temps d'espera pot ser més gran que el temps que s'utilitza per dipositar la capa. Per això cal dissenyar sistemes de dipòsit que permetin introduir una gran superfície de substrat en cada operació de càrrega. Això és molt més fàcil si s'utilitzen substrats flexibles, que es poden carregar en forma de bobines que contenen grans superfícies de substrat. Un altre avantatge d'aquesta estratègia consisteix a fabricar les plaques flexibles en una planta de producció i distribuir-les a diferents plantes de producció secundàries que utilitzen aquestes plaques flexibles per construir el producte final (plaques integrades en mòduls arquitectònics, sostres per a vehicles, etc.).

Els substrats flexibles metàl·lics permeten temperatures de dipòsit més altes, però fan més difícil la interconnexió entre cèl·lules. Els substrats flexibles plàstics permeten una interconnexió més fàcil (no són conductors), però la temperatura de dipòsit ha de ser més baixa (entre 90 i 150°C).

El nostre grup està desenvolupant una tècnica de dipòsit químic en fase de vapor activat per catàlisi superficial en un fil calent (*hot-wire chemical vapor deposition*, HWCVD), que permet dipositar silici microcristal·lí de bona qualitat a baixa temperatura a partir d'un precursor en fase gas (SiH_4). Utilitzem aquesta tècnica per desenvolupar cèl·lules de silici microcristal·lí sobre substrat plàstic (naftalat de polietilè, PEN).

7. CONFINAMENT ÒPTIC SOBRE PEN

Hem comentat abans la tècnica de confinament òptic, basada en reflector posterior i òxids conductors transparents amb rugositat controlada. El grup de la Universitat de Barcelona està desenvolupant una tècnica de confinament òptic basada en el control de la textura superficial del plàstic (PEN) mitjançant litografia d'impressió a escala nanomètrica. Amb aquesta tècnica es preparen substrats de PEN amb textura controlada i s'hi diposita una capa de conductor metàl·lic i una capa prima (uns mil nanòmetres) d'òxid conductor transparent. Les capes de silici (n-i-p) es dipositen sobre aquest reflector i la cèl·lula es completa amb un contacte superior d'òxid conductor transparent. L'esquema d'una cèl·lula que incorpora aquest reflector es presenta a la figura 10.

332

La tècnica de litografia d'impressió a escala nanomètrica (NIL) utilitza un tampó amb textura superficial controlada i transfereix aquesta textura sobre la superfície del polí-

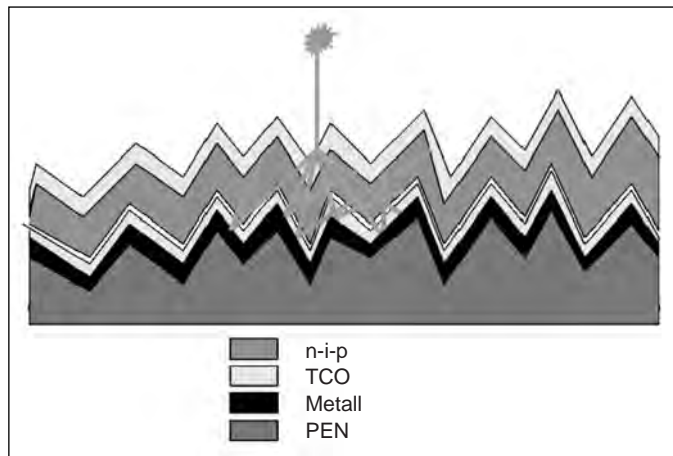


FIGURA 10. Cèl·lula solar amb reflector posterior sobre plàstic texturat.

mer aplicant una pressió i una temperatura controlades durant un temps determinat. La figura 11 mostra l'esquema d'un procés d'impressió, mentre que la figura 12 mostra el sistema experimental utilitzat.

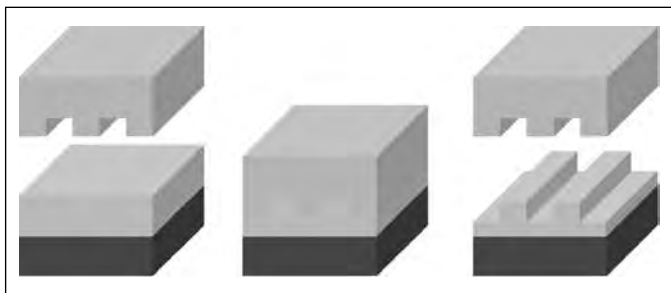


FIGURA 11. *Procés d'impressió a escala nanomètrica mitjançant NIL.*

Amb la tècnica NIL és possible preparar tant textures aleatòries com textures fabricades. L'objectiu és que la cèl·lula absorbeixi el màxim de llum incident perquè es transformi en corrent elèctric. Per aconseguir aquest fi, cal estudiar el comportament òptic de la superfície texturada.

Aquest estudi es realitza utilitzant un mesurador de la transmitància i reflectància òptiques en funció de l'angle. La figura 13 mostra un esquema d'aquest aparell, mentre que la figura 14 en mostra una fotografia.

L'estudi òptic es basa a controlar els diferents processos tecnològics:

- texturat del PEN amb NIL
- dipòsit del reflector metàl·lic
- dipòsit de l'òxid conductor transparent
- dipòsit del semiconductor n-i-p
- dipòsit del conductor transparent posterior.

Com a conductor transparent s'utilitza ZnO o SnO_2 . Per a cada capa dipositada, es determina la transmitàn-



FIGURA 12. *Sistema NIL.*

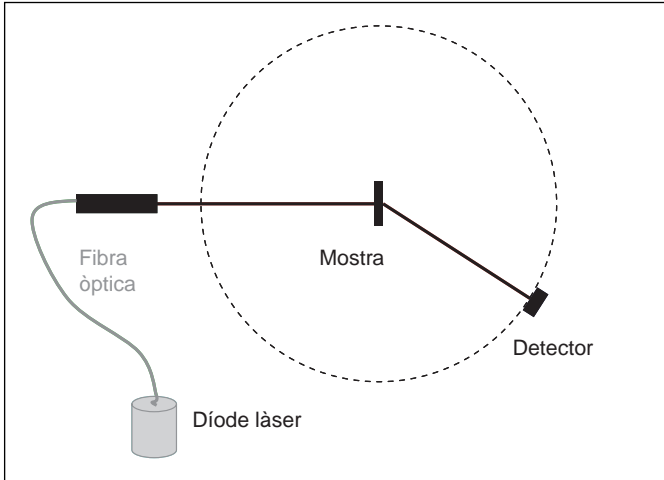


FIGURA 13. Esquema d'un sistema de mesura de transmissió i reflectància en funció de l'angle.

335

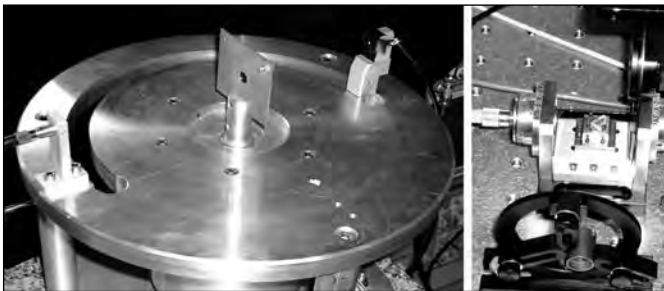


FIGURA 14. Sistema de mesura de transmissió i reflectància en funció de l'angle.

cia i la reflectància òptica en funció de l'angle. Aquestes mesures permeten estimar la quantitat de fotons absorbits en el semiconductor i el màxim corrent que pot produir la cèl·lula solar.

Un exemple de la influència de la textura superficial en la dispersió de la llum que incideix en una superfície es

pot veure a la figura 15. S'hi mostra l'energia de la llum detectada en funció de l'angle per a una capa d'òxid conductor transparent d'una rugositat de quaranta nanòmetres i per a un vidre esmerilat de rugositat molt superior.

Aquesta dispersió de la llum està directament relacionada amb l'augment de l'absorció òptica de la cèl·lula.

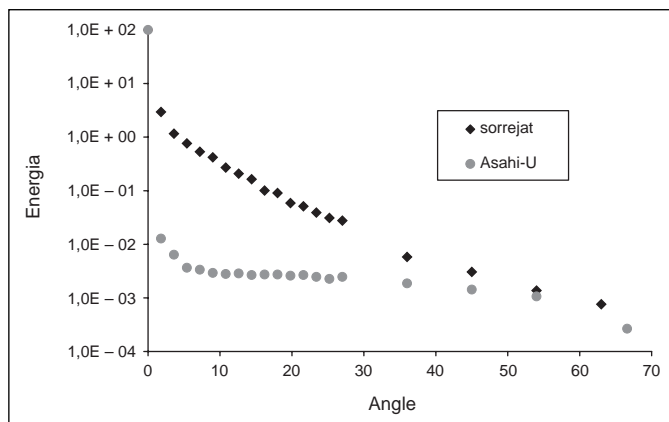


FIGURA 15. *Dispersió de la llum en funció de l'angle.*

8. CONCLUSIONS

— La producció d'energia elèctrica a partir de la transformació fotovoltaica de l'energia solar pot subministrar la major part de l'energia elèctrica el 2050 si es manté el creixement anual de més del 20% de la producció de plaques.

— Les tècniques en capa prima basades en silici tenen un marge important per augmentar-ne l'eficiència i disminuir-ne els costos de producció.

— El mercat fotovoltaic està actualment en els seus inicis i cal un gran esforç en R + D.

— Moltes empreses multinacionals importants tenen activitat en el sector.

— Actualment, encara és possible per a moltes empreses entrar en el sector. Això ja no serà tan fàcil quan els volums de producció siguin més importants.



**SOCIETAT CATALANA
DE PEDAGOGIA**

ENS ALIMENTEM DE SOL:

UNA PROPOSTA CURRICULAR

PER A L'ESO,

A CÀRREC DE

MERCÈ IZQUIERDO AYMERICH,

DE LA UNIVERSITAT

AUTÒNOMA DE BARCELONA

Tot i que el concepte de *energia* és fonamental per a les ciències, és molt difícil ensenyar-lo bé i aconseguir que els estudiants l'apreguin i el puguin aplicar amb una certa autonomia. Els obstacles principals són *a)* l'ús que es fa d'aquest terme en la vida quotidiana i *b)* l'aparent contradicció entre la conservació de l'energia (segons el primer principi de la termodinàmica) i les recomanacions de no malbaratar-la perquè «se'ns acaba».

Aquesta sessió es dedicarà a analitzar aquests dos punts i a extreure'n idees que puguin ser útils per a la formació científica bàsica de tots els ciutadans. Caldrà reconèixer que les explicacions científiques sobre l'energia no són fàcilment comprensibles i que, per tant, s'ha de començar per identificar situacions quotidianes en les quals es parla d'energia *avant la letre* per intentar, a continuació, fer evolucionar els plantejaments inicials cap a d'altres de més científics.

Es proposarà aquí unificar els dos principis entorn del concepte de *energia lliure* i centrar la reflexió sobre diferents sistemes, més o menys eficaços, de «mobilitzar l'energia». Els éssers vius destaquen per la seva excel·lència en aquest aspecte: gestionen molt bé l'energia que regala diàriament el Sol. Ara tots tenim el repte d'intentar fer el mateix per a les necessitats i els usos quotidians d'energia que la nostra societat «consumeix» en escreix.

1. ENSENYAR A PENSAR DE MANERA CIENTÍFICA A L'ESCOLA BÀSICA

La meua aportació en aquest cicle dedicat al foc es fa en el marc de la Societat Catalana de Pedagogia i tracta de l'ensenyament. Ensenyar és una de les activitats més interessants que algú pot dur a terme perquè n'ha de permetre una altra, encara més interessant, una de les millors experiències de

totes les persones: aprendre. Ensenyar per «fer aprendre» no té res a veure amb una transmissió de coneixements definitius, perquè els coneixements científics no són «dogmes» ni les persones poden incorporar de manera significativa les idees dels altres sense un procés complex d'elaboració pròpia.

Les ciències cognitives han aportat plantejaments teòrics que ajuden a comprendre com és que les persones poden «conèixer» i, per tant, s'interessen tant pels processos d'ensenyar i d'aprendre com pels processos de recerca que condueixen a la formació de coneixement científic. En efecte, conèixer és elaborar una nova manera de mirar el món, és fer-ne l'experiència, és parlar-ne d'una manera nova, amb noves paraules, amb noves metàfores... Aprendre és una activitat personal i intransferible que s'ha de dur a terme amb l'acompanyament del mestre. Així, ensenyar i aprendre formen part d'un sol procés dinàmic que requereix interacció entre persones que s'interessen per comprendre, per fer comprensible el món i per comprendre's elles mateixes.

Guidoni (1935) destaca tres «dimensions» irreductibles en el complex sistema cognitiu humà: fer (l'àmbit de l'experiència), pensar (l'àmbit de les representacions mentals), comunicar (l'àmbit dels llenguatges). Aquesta idea ha estat desenvolupada també des de la semiòtica, que destaca la capacitat humana d'elaborar signes que la cultura humana reconstrueix una vegada i una altra i amb els quals es representa un «món» on es pot intervenir identificant relacions noves i obrint noves perspectives d'interacció, de reflexió, de goig estètic. Així, Eco (1999) fa notar que això passa si «quelcom tiba de nosaltres», és a dir, si hi ha una finalitat interessant que fa actuar, comunicar i parlar amb coherència per fer-ne un coneixement significatiu.

Una altra aportació interessant de les ciències cognitives actuals és considerar que totes les persones (i també els científics) pensen sobre el món mitjançant «models mentals»

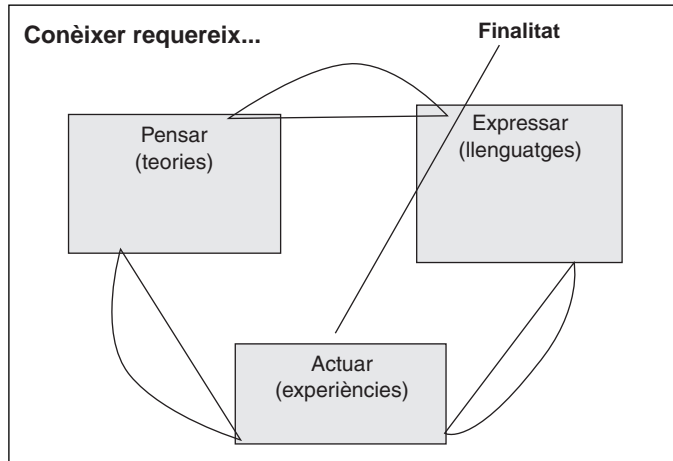


FIGURA 1. *Les dimensions del sistema cognitiu, segons Guidoni 1985.*

342

que, sense ser estrictament «món», tampoc no són només idees, perquè tenen sentit en tant que permeten fer quelcom en el món i, per tant, transformar-lo, amb paraules i accions. Això ho saben fer els nens i nenes des que són ben petits i juguen de manera simbòlica; de la mateixa manera, ho fan els científics quan, en el seu treball, es guien per «teories científiques» que són «famílies de models teòrics», amb els quals recullen de manera simple una gran quantitat de situacions experimentals que queden relacionades les unes amb les altres gràcies a les entitats teòriques dels models.

L'afirmació que encapçala el paràgraf anterior permet explorar-ne una altra: pot ser que totes les persones puguin pensar com ho fan els científics? La resposta que hi donem des de la didàctica de les ciències és afirmativa, però sempre que l'ensenyament generi activitat científica entorn de les idees bàsiques i irreductibles que donen sentit als fenòmens que cal conèixer en les etapes de formació bàsica de totes les persones. Cal, per tant, seleccionar fets rellevants que es

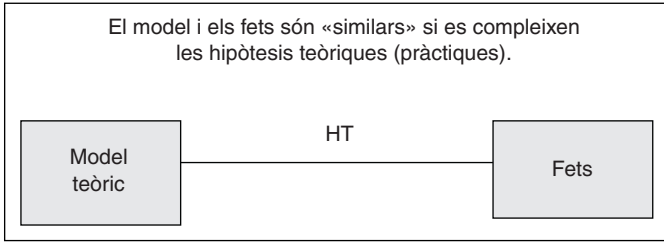


FIGURA 2. *Pensar en models.*

puguin relacionar els uns amb els altres en el marc dels principals «models teòrics» de les ciències.

La novetat de l'enfocament cognitiu aplicat a les ciències és que aquests models científics que «expliquen» i permeten «intervenir» poden ser igualment explicatius per a l'audiència a la qual es comunica la ciència que per als científics..., sempre que es regulin alhora (per tal que connectin) el «model», les accions en el món i els llenguatges amb els quals se'n parla. Així, un model tècnic ha estat definit amb llenguatges diversos al llarg de la història i, malgrat tot, ha orientat la intervenció i el pensament científics, i també «pot ser dit», a l'escola, de manera diversa sense ser errònia.

La nostra finalitat, com a professors, és promoure l'activitat humana que busca comprendre per tal de poder actuar i l'aconsegueix quan pot comunicar-la amb els llenguatges apropiats. L'escola ha de ser un lloc on hi hagi activitat d'aquesta mena, que és científica quan utilitza els models teòrics adients per actuar, pensar i comunicar. La feina del professor, molt sovint d'una gran delicadesa i creativitat, consisteix a saber enfocar la mirada dels estudiants cap a les principals qüestions que les ciències intenten respondre i establir a poc a poc les regles del joc que van fent comprensibles alguns dels aspectes d'un món físic i biològic en el qual es vol intervenir amb finalitats diverses.

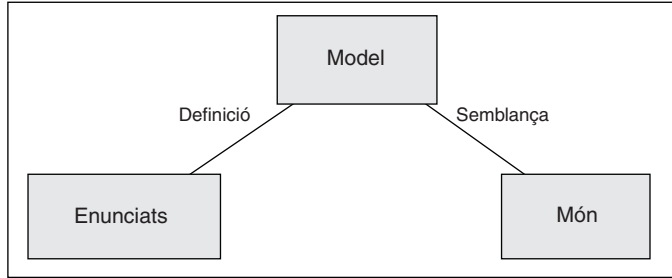


FIGURA 3. *Caracterització dels models segons Giere, 1988.*

Ara veurem com ens ho fem quan reflexionem sobre què és el foc, és a dir, sobre l'energia i els canvis.

2. QUÈ ÉS EL FOC? ELS CANVIS I L'ENERGIA

344

Què en pensa la gent, del foc? Què suggereix aquesta paraula? Quin significat té i per què hem de saber-ne quelcom?

Heràclit d'Efes, en el segle VI aC, deia que el foc és la substància primària de totes les coses que, per un procés de condensació o camí descendent, es converteix en vapor, aigua i terra, i de nou, per un camí ascendent, en aigua, vapor i foc. Per ell, tot existeix en estat de canvi, tot i que els sentits ens enganyin donant-nos la impressió d'estabilitat, que no és altra cosa que l'equilibri entre les forces «ascendents» i «descendents». Així, el coneixement o la saviesa que permet comprendre com funciona l'Univers és un do de la raó, no dels sentits.

Un segle més tard, Empèdocles considera que hi ha quatre substàncies primàries i no només una, els quatre elements: aigua, aire, terra... i foc. Aristòteles, en el segle IV aC, atorga qualitats específiques a aquests elements: aire i foc tenen moviments ascendents i són calents, mentre que aigua i terra tenen moviment descendent i són freds.

El foc és també, segons la mitologia grega, allò que Prometeu va robar als déus, pujant fins a l'Olimp per encendre una teia amb el Sol; és allò que va donar als homes per millorar la seva vida i que els va fer semblants als déus... I, per fer-ho, va ser castigat amb severitat.

Aquestes idees encara ara tenen sentit, tot i que es formulen amb unes altres paraules. El foc flama és destructor, però escalfa i és símbol de valentia, de passió, de creativitat; és generador de canvis. El foc llum ens fa pensar en el Sol, en la vida que neix allí on n'hi ha, en quelcom que forma part de les coses. El foc caldera ens remet a l'economia, a la comodat, però també a la dificultat d'obtenir combustibles. Detectem, encara, l'ambigüitat del foc: és perill però és vida; és un bé preuat però escàs; i mirem cap al Sol per mirar de «robar-li» no ja una flama, però sí la «caldera» molt més sofisticada que ara necessitem (ja no en tenim prou amb una teia!).

Així doncs, hi ha diverses idees entorn del foc, algunes de les quals metafòriques, i que són ben boniques d'analitzar i comentar des d'altres àmbits, com s'està fent en aquest cicle de conferències. Des del punt de vista de la formació científica, n'hem de destacar dues: el foc genera canvis i, per això, el foc és útil, si es poden arribar a controlar els canvis i aprofitar-los bé. Des de sempre, la humanitat ha intentat aprofitar els canvis que es produeixen espontàniament, que «es fan sols» (les pedres que cauen, les molles que s'expandeixen, el gas que s'escampa...), per aconseguir-ne d'altres: aixecar objectes pesants, per exemple, la qual cosa ens costaria molt esforç.

Els canvis són processos que es generen quan hi ha diferències (de temperatura, de concentració...). Però les diferències desapareixen a causa dels canvis espontanis i no tornen a aparèixer fàcilment... Cal que apareguin de nou les diferències. El més interessant és que els processos de canvi

es poden gestionar bé o malament, perquè si bé en tots es modifiquen els sistemes (desapareixen les diferències inicials), n'hi ha alguns que mantenen la capacitat de canvi més que uns altres.

Amb això, tot seguit es veu que hi ha uns límits que condicionen les possibilitats que es produeixin canvis i que es puguin aprofitar. Necessitem els conceptes de *treball*, de *calor* i de *llum*, que són processos de canvi, i el concepte de *energia*, per portar el compte del que els sistemes perden o guanyen en produir-se aquests processos de canvi. L'energia es conserva, es pot «conrear»: en el nostre hortet d'energia hem de fer que hi creixi poca calor i molt treball!

El foc s'associa, doncs, a dues idees diferents: processos de canvi (calor, treball i llum), que es poden gestionar per mantenir la possibilitat de nous canvis, i energia, que es conserva.

Tot això resulta força complicat. Efectivament, és molt difícil parlar de l'energia, perquè no és «res» en si mateixa, al marge dels fenòmens que explica —com comencen i com acaben, com es poden repetir els canvis...— i de les intervencions que permet. I ho és encara més si pensem que parlar d'energia requereix aclarir les idees que té tothom sobre l'energia i els canvis, confosos ambdós per foc.

S'ha de procurar que l'ensenyament transformi aquestes «idees prèvies» en altres de més científiques. El foc, aquest conglomerat d'idees tan suggerents, ha d'esdevenir energia i canvi i hem de trobar la millor manera de fer necessària aquesta entitat tan difícil de copsar, però tan cabdal per entendre la continuïtat dels canvis i per gestionar-los bé.

3. LES «IDEES PRÈVIES» I LES DIFERENTS PROPOSTES TRADICIONALS D'ENSENYAMENT DE L'ENERGIA

L'energia és una entitat teòrica amb significat en tots els camps científics; però és també una paraula del llenguatge quotidià que s'aplica a un altre àmbit molt diferent, el dels sentiments, el caràcter, l'equilibri personal. Això ens obliga a ser molt curiosos i a procurar mostrar amb la màxima claredat a quina mena de fenòmens es refereixen les ciències i què és el que poden (i el que no poden) explicar.

Els alumnes, com totes les persones, han sentit a parlar de l'energia i se la imaginem d'una determinada manera: li atribueixen propietats que no sempre corresponen a les que li atribueixen els científics i que, per tant, interfereixen en el seu aprenentatge si no s'integren de manera adequada en les propostes docents. Vegem alguna d'aquestes idees. Són les següents:

a) S'associa l'energia amb els éssers vius, perquè es mouen i han de menjar; amb el moviment i l'activitat: una joguina té energia quan es mou, no quan se li ha donat corda i encara no es mou. No es pensa que una pedra, per exemple, pugui «tenir energia». (Sembla que recordi el foc canvi.)

b) Així, es considera que l'energia és la font de l'activitat (una persona activa «té molta energia», les vitamines «donen energia»). És sinònim de combustible i fins i tot d'alguns aliments «energètics». És una «cosa», un ingredient, quelcom que pot ser emmagatzemat i que «es dispara» en un moment donat (per exemple, quan es crema un objecte, quan hi ha foc), que és com un fluid, que passa d'un lloc a l'altre sense que la veiem. (Sembla que recordi el foc element.)

c) En conseqüència, es confon la força amb l'energia i costa acceptar que l'energia es conserva, perquè sembla que es perd en les flames, en la calor... i es parla amb preocupa-

ció del «consum d'energia» i de l'esgotament de les fonts d'energia!

Quina d'aquestes «mitges veritats» ens resulta més útil com a punt de partida? Moltes s'han generat a partir del llenguatge amb el qual es parla de l'experiència quotidiana. Com que permeten explicar fets concrets, per més que de manera parcial, són valuoses malgrat que no siguin prou adequades i per això plantegen un dilema: els professors no en poden prescindir, però han de procurar canviar-les, presentant noves situacions que requereixin un plantejament més ampli i d'aplicació més general.

En general, a l'escola es parla de «formes d'energia» i es treballa molt la transformació d'unes formes a les altres, però no tant la conservació i la degradació, ni tampoc es parla del control dels processos ni de l'origen dels canvis en les «diferències». Segons diversos autors (Pintó, 1991; Duit, 1981; López Rupérez *et al.*, 1983; Ogborn, 1990), s'ha de començar per donar una visió intuïtiva i descriptiva de l'energia i anar incorporant gradualment noves propietats.

Com a proposta d'innovació es recomana:

— Analitzar situacions de canvi fent ús del terme *energia*.

— Fer veure que calor, treball i llum no són energia, sinó que són processos en els quals hi ha transferència d'energia.

— Considerar que l'energia pot canviar de lloc, emmagatzemar-se, canviar de manifestació, però es conserva. A mesura que és utilitzada, va perdent qualitat, és a dir, possibilitats de ser emprada de nou: disminueix l'energia útil.

— Generar llenguatges adequats i calcular, sempre que es pugui, per arribar a comprendre que l'energia no és «una cosa», sinó més aviat una manera de «portar el compte». No confondre força i energia: la força requereix dos sistemes i l'energia no; la força és una magnitud vectorial i l'e-

nergia és una magnitud escalar; l'energia només es manifesta en les transformacions i les forces es poden manifestar en situacions d'equilibri.

Si contrastem la llista d'idees prèvies amb les recomanacions docents, veurem que es poden concentrar els esforços a explicar bé com es produeixen els canvis (les interaccions entre sistemes) i com podem aprofitar-los; a continuació, a anar fent veure, a poc a poc, que l'energia no és «res que flueix», sinó que es relaciona amb una «manera d'estar» dels sistemes que poden canviar. En podem parlar com si estigués amagada en els sistemes i només es deixés mesurar quan es transfereix en els processos de calor, treball o llum. Aquesta energia invisible no ens serviria de res si es quedés sempre així; el que ens interessa és el procés en el qual diem que l'energia d'un sistema disminueix perquè la de l'altre augmenta. Així, quan diem que un sistema «té energia», volem dir que coneixem algun procés que permet transferir-ne i que sabem quanta en té perquè sabem relacionar-la amb alguna de les propietats del sistema.

Qualsevol proposta docent ha de partir d'una «idea potent»; a partir d'aquesta idea, cal trobar «fets del món» concrets (els canvis que s'estudien en les diferents disciplines científiques, a partir dels seus models teòrics) que puguin generar en el grup la mena de discussió que ens interessa i que puguin ser analitzats per identificar magnituds que puguin ser calculades. Amb tot això, es van generant els llenguatges adients per poder parlar de les regularitats identificades i representar-les.

4. SELECCIONAR UNA IDEA POTENT: «MENGEM SOL!»

En la proposta que fem, la «idea potent» és el Sol i els éssers vius.

Si l'energia no és la causa dels canvis, sinó que ho són les diferències, es fa evident la importància del Sol gràcies al qual es produeixen els canvis que fan possible la vida. Si per als alumnes és evident la relació entre l'energia i els éssers vius, podem començar per aquí; com que hi pot haver interacció entre una persona (un ésser viu) i una pedra (l'agafa del terra, la llança...) o una joguina (pot donar-li corda), ja veuran que també aquests objectes poden participar en el joc de les interaccions i els intercanvis d'energia encara que no es belluguin sols.

Aquesta idea atractiva serà la guia per a tota la proposta docent:

— A poc a poc s'anirà creient que imaginar l'energia com un fluid que passa d'un lloc a l'altre sense deixar-se veure és una metàfora que ajuda a pensar, però que en realitat l'energia no és una «cosa», sinó una idea que ajuda a portar el compte dels canvis que s'han fet i els que encara es poden fer.

— Finalment, es podrà diferenciar *energia* del *procés d'intercanvi* o d'interacció entre sistemes (que pot ser treball, calor o llum) i, per tant, entre energia i força; no es farà a partir d'una definició prèvia, que seria incomprensible, sinó que aquesta definició sorgirà com a resultat d'una activitat científica.

Proposem començar per connectar amb la necessitat de «canvis que es produeixen sols» per poder-los fer servir per arrossegat-ne uns altres que «ens cansen». La història de la humanitat ofereix molts exemples d'aquesta dinàmica de generar diferències per produir canvis i aprofitar-los tan bé com es pugui. En el Projecte Ciències 12-16, la unitat «Els canvis. Com hi intervé l'energia?» es comença amb una lec-

tura, de la qual reproduïm un fragment (Izquierdo *et al.*, 1994).

La Humanitat començà a servir-se dels canvis que es produïen espontàniament, com per exemple, un salt d'aigua, una pedra que rodola per un pendent o un foc que crema sense aturador.

Aprendre a fer foc va ser sens dubte el primer i més important descobriment de la humanitat i el que va fer possible tots els altres... Els pobles que habitaven la Mesopotàmia varen descobrir que l'aigua corrent els era útil per a diverses feines. La varen aprofitar per moure sínies i pedres de molí. Així mateix, es va aprendre a utilitzar l'aire en moviment per moure vaixells i accionar els molins situats en llocs on hi havia aigua.

Més recentment, s'utilitzaren els molins de vent per accionar les bombes hidràuliques que extreïen l'aigua de les mines o s'elevaven des dels pous i sèquies per poder regar. Així es varen iniciar les explotacions industrials.

La construcció de màquines semblants a les d'ara correspon ja a l'època moderna. Les primeres màquines funcionaren amb carbó o petroli, però les màquines actuals ho fan amb gasolina o electricitat, que s'obté aprofitant els salts d'aigua, mitjançant la combustió del carbó i els hidrocarburs o en els reactors nuclears.

Tot i això, la humanitat sencera no ha resolt encara el problema de sobreviure sense cansar-se [...].

Aquesta lectura permet comprendre què és el que interessa la gent: aprofitar els canvis «que roden sols» per arrossegat-ne uns altres que no ho fan però que poden ser també útils. Hi ha pocs tipus fonamentals de canvis espontanis, que poden ser representats tal com proposen Boohan i Ogborn (1996) (figura 4a) i Ametller (2002) per afavorir

que els alumnes en parlin i aprenguin a combinar-los. L'energia forma part dels canvis i per això cal comptar-hi: en els esquemes es representa amb les fletxes que indiquen si, en l'estat final, el sistema ha guanyat energia o n'ha perdut. D'aquesta manera, es pot fer veure la importància del Sol perquè genera una mena de canvis en els sistemes que fan que aquests continuïn canviant (comencin a «rodar cap avall»). En la figura 4b es representen els canvis que es produeixen en la funció clorofil·lica.

El Sol (la llum) ha produït canvis en la clorofil·la de la cèl·lula i aquests canvis n'han comportat uns altres: es forma

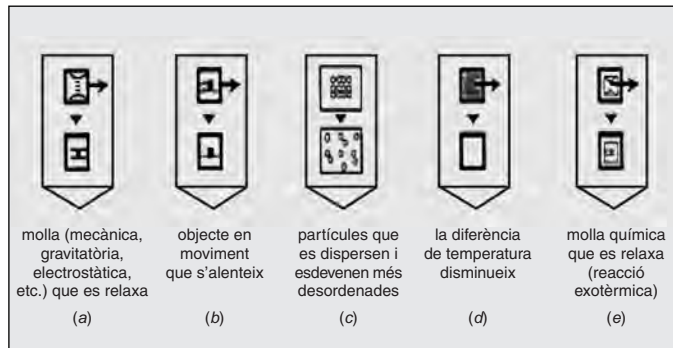


FIGURA 4a. Els principals canvis espontanis segons Boohan i Ogborn.

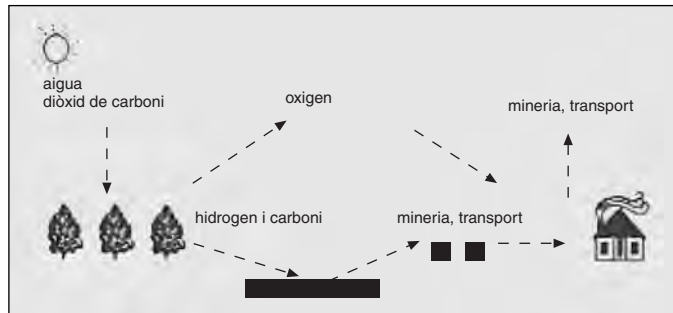


FIGURA 4b. Els canvis en la funció clorofil·lica.

una molècula grossa, la glucosa, i altres hidrats de carboni a partir de dues molècules petites, diòxid de carboni i aigua, i es transfereix energia del Sol a aquestes noves substàncies. Finalment tenim un aliment: un cacauet, per exemple. Si el cremem, es formen flames; podem escalfar aigua fins a fer-la bullir i obtenim, de nou, diòxid de carboni i aigua. I si ens el mengem? L'aigua del nostre organisme no es posa a bullir, perquè el procés de canvi del cacauet en l'organisme està molt ben controlat: es produeix menys calor i més treball, que és moviment, construcció de nous materials, impulsos elèctrics per veure-hi.

Molts organismes es mengen els uns als altres com ho fem nosaltres: ens mengem el cacauet, però es com si ens haguéssim menjat el Sol. Ara bé, a mesura que ens mengem els uns als altres, les possibilitats de canvi disminueixen.

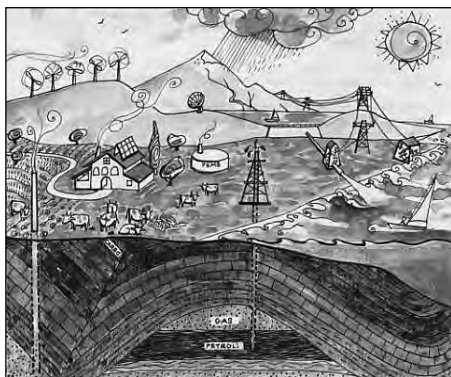


FIGURA 5. Nosaltres ens «menjem» el Sol.

El Sol en genera moltes altres, de diferències: de temperatura, de pressió, de càrrega elèctrica, de potencial químic... Per això, gràcies al Sol els canvis no s'acaben. Ens mengem els cacauets, però gràcies a ell, que ens regala llum cada dia, tindrem nous cacauets!

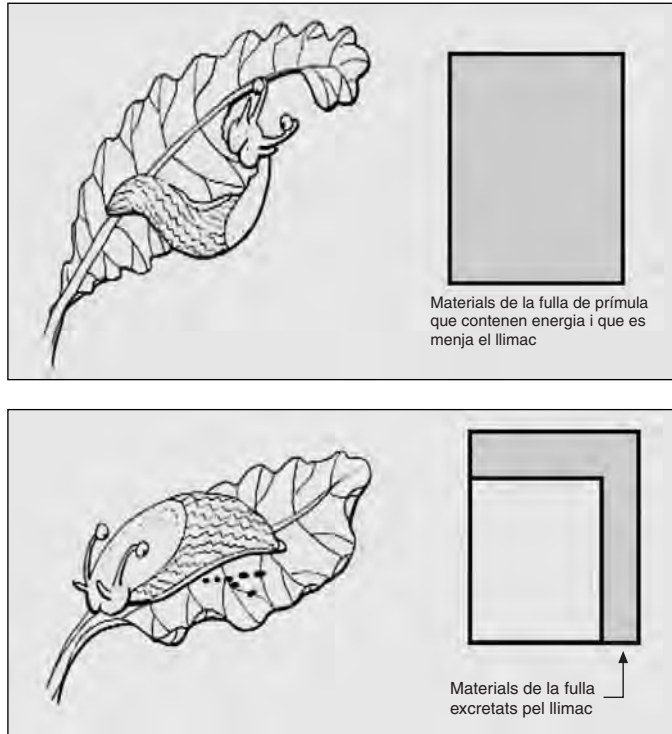
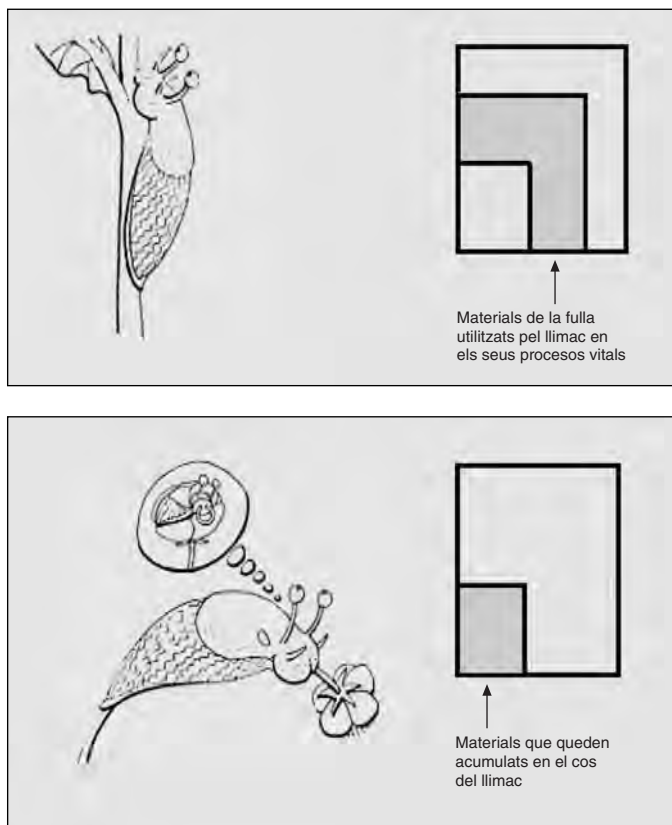


FIGURA 6. *El llimac es menja la fulla.*

Finalment ens podem preguntar: com és que patim tant per l'energia, si cada dia el Sol ens en regala molta més de la que podem aprofitar? Aquesta pregunta és clau, perquè fa veure que, en dir això, confonem dues idees diferents. Tots els sistemes del món poden presentar-se en diferents estats i a cada un d'ells els correspon una energia fixa; per això, l'energia total no canvia: l'element foc és indestructible. No patim per l'energia, sinó pels canvis: sense el Sol s'acabarien les diferències i, per tant, el foc canvi. I la vida és un canvi

constant, molt ben aprofitat. Encara que l'energia es conserva, es pot conrear i aprofitar més o menys, segons com sigui el procés de canvi.



355

FIGURA 7. *I el gripau es menjarà el llimac.*

5. QUÈ EN FEM, DE L'ENERGIA DEL SOL? (A TALL DE CONCLUSIÓ)

Jorge Wagensberg, en una entrevista per la ràdio, ens deia que la Terra roda cada vegada més a poc a poc i que, per tant, el dia i la nit s'allarguen; i, responent al locutor que opinava que potser en algun altre moment la Terra es tornarà a accelerar, feia notar que no, que això no passaria espontàniament. És interessant, oi? Hi ha canvis que no van endarrere. La vida és un canvi constant en el qual es modifica irreversiblement l'entorn. L'arbre cremat no torna a ser mai més el mateix arbre: el temps passa...

Per sort, com diu la cançó:

Cada dia surt el Sol
I tot recomença...

Però el Sol és de tots: com és que no l'aprofitem millor?
Com és que no compartim els recursos que proporciona?

BIBLIOGRAFIA

- AMETLLER, J. (2002). *Dificultats dels alumnes en la interpretació de dissenys visuals sobre l'energia*. Barcelona: Universitat Autònoma. [Treball de recerca]
- BOOHAN, R.; OGBORN, J. (1996). *Energy and change*. Londres: Institute of Education, University of London.
- DUIT (1981). «Understanding energy as a conserved quantity». *European Journal of Science Education*, núm. 3 (3), p. 291-301.
- GUIDONI, P. (1985). «On natural thinking». *International Journal of Science Education*, núm. 7 (2), p. 133-140.
- GIERE, R. N. (1988). *Explaining Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press.

- ECO, H. (1999). *Kant i l'ornitorinc*. Barcelona: Destino.
- IZQUIERDO, M.; SOLSONA, N.; CABELLO, M. (1994). *Projecte 'Ciències 12-16'*. Barcelona: Generalitat de Catalunya.
- LÓPEZ RUPÉREZ [et al.] (1983). «Las nociones de trabajo y energía: Análisis conceptual y didáctico». *Bordón*, núm. 249, p. 497-509.
- OGBORN, J. (1990). «Energy, change, difference and danger». *School Science Review*, núm. 72, p. 81-85.
- PINTÓ, R. (1991). *Algunos conceptos implícitos en la 1ª y 2ª leyes de la termodinámica: Una aportación al estudio del aprendizaje*. Barcelona: Universitat Autònoma de Bellaterra.



SOCIETAT CATALANA
DE TECNOLOGIA
ELS INCENDIS
D'HIDROCARBURS,
A CÀRREC
D'EULÀLIA PLANAS CUCHI,
DEL CENTRE D'ESTUDIS
DEL RISC TECNOLÒGIC
DE LA UNIVERSITAT
POLITÈCNICA DE CATALUNYA

A la indústria en general i, més particularment, a la indústria química, un dels accidents més freqüents són els incendis. I els combustibles amb més contingut energètic i que més sovint s'hi troben involucrats són els hidrocarburs.

En la conferència s'exposarà, en primer lloc, una anàlisi històrica dels accidents ocorreguts, que posarà de manifest la importància dels incendis d'hidrocarburs i la freqüència relativa dels diversos tipus d'incendi: de bassa, de doll, de núvols de vapor, etc. A continuació s'exposaran les principals característiques dels hidrocarburs com a combustibles i dels diversos tipus d'incendi. Finalment s'analitzaran els models matemàtics més adients per a l'estimació dels efectes i de les conseqüències d'aquests tipus d'accidents.

1. INTRODUCCIÓ

El foc té moltes cares diferents, i aquest fet s'ha posat clarament de manifest al llarg d'aquest cicle de conferències «El foc i el medi», organitzat per l'Institut d'Estudis Catalans. El foc, aquest fenomen de despreniment de calor i llum produït per la combustió d'un cos, ha influït considerablement en l'evolució de la humanitat des que fou descobert ara fa milers d'anys (a Catalunya el fogar més antic descobert data de fa 53.000 anys; els més antics es troben a la Xina i són de fa uns 460.000 anys). Nogensmenys, el foc també ha estat, des del seu descobriment, un element de destrucció, en alguns casos voluntari (com en les guerres o en la creació de zones de cultiu), però en molts altres involuntari. La cara més violenta i destructiva del foc són els incendis.

D'incendis, n'hi ha de diversos tipus, tot i que se'n pot fer una classificació genèrica en tres grans grups: els incendis forestals, els incendis en recintes tancats (edificis i túnels, per exemple) i els incendis industrials.

Dels diversos accidents que poden ocórrer en una indústria, l'incendi és el que, en termes generals, té un radi d'acció més reduït. Malgrat això, els seus efectes poden ser temibles, ja que la radiació tèrmica pot afectar altres parts de la planta i generar altres accidents. D'altra banda, el fum després pot complicar notablement l'actuació dels equips d'intervenció i sotmetre'ls a un perill addicional (manca de visibilitat o intoxicació).

Un altre element important és que sovint incendis i explosions es produeixen alhora. Això vol dir que les instal·lacions de protecció hauran d'estar especialment dissenyades per a suportar aquests dos accidents.

És evident l'interès que té la predicció dels efectes d'un incendi, tant pel que fa a l'establiment de distàncies de seguretat com per a la determinació dels cabals de refrigeració necessaris per a protegir els equips sotmesos a radiació. En definitiva, la modelització matemàtica d'un incendi permet la predicció dels possibles danys a persones i instal·lacions, i l'establiment de les mesures que cal prendre per a reduir aquests danys.

361

1.1. Els hidrocarburs

Els hidrocarburs són compostos orgànics formats per carboni i hidrogen. Els àtoms de carboni poden unir-se i formar cadenes més o menys llargues, per mitjà d'enllaços simples, dobles o triples, i les valències que resten lliures són saturades amb hidrogen. Hom distingeix els hidrocarburs *acíclics*, de cadena oberta, dels *cíclics*, de cadena tancada. Els acíclics, anomenats també *alifàtics*, poden ésser saturats o insaturats, i llurs cadenes poden ésser lineals (*derivats normals*) o ramificades (*isoderivats*). Els hidrocarburs saturats només tenen enllaços simples i hom els anomena també *alcans* o

parafines. Els hidrocarburs insaturats presenten dobles i triples enllaços en les molècules i, per tant, contenen menys àtoms d'hidrogen que els hidrocarburs saturats del mateix nombre de carbonis. Hom els divideix en *alquens*, *etilènics* o *olefines* i *alquins* o acetilènics, segons que tinguin dobles o triples enllaços. Els hidrocarburs cíclics formen dos grans grups: els *alicíclics*, anomenats també *naftènics*, que comprenen els cicloalcans, els cicloalquens i els cicloalquins, de propietats semblants a les parafines, i els *aromàtics*, que tenen propietats especials, a causa de l'estructura de l'anell benzènic. Els hidrocarburs són obtinguts principalment del gas natural (saturats de baix pes molecular i metà, età, propà i butà), del petroli (parafines, aromàtics i alicíclics) i del quitrà de l'hulla (preferentment aromàtics: benzè, toluè, xilè, naftalè, antracè, etc.) i, en menys quantitat, de les ceres, les resines i els olis essencials d'origen vegetal. Els hidrocarburs naturals es formen per maduració de la matèria orgànica disseminada en roques sedimentàries; segons les condicions de la maduració es produeix petroli o gas natural. Hom obté una àmplia gamma d'hidrocarburs per destil·lació del petroli en brut (vegeu la taula 1).

1.2. Anàlisi històrica

L'anàlisi històrica d'accidents és una tècnica identificativa orientada a la recerca d'informació d'accidents industrials succeïts en el passat (Casal *et al.*, 1999). Aquesta tècnica d'anàlisi és essencialment qualitativa, però també permet extreure resultats quantitius si el nombre d'accidents és suficientment elevat per a permetre una anàlisi estadística significativa. La tècnica es basa en l'existència de reculls d'accidents en forma de bancs de dades on es troba emmagatzemada la informació relativa als accidents (tipus, pro-

ducte involucrat, conseqüències, etc.). Les dades utilitzades en aquesta anàlisi històrica s'han extret de la base de dades MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service, 2003) desenvolupada pel Safety and Reliability Directorate (Regne Unit), la qual inclou accidents ocorreguts a la indústria química i en el transport de mercaderies perilloses des de l'inici del segle XX fins al mes d'octubre de 2003. La versió que s'ha utilitzat per a fer aquest estudi conté 13.341 registres, que corresponen a 11.790 accidents.

TAULA 1. *Característiques i nom dels hidrocarburs segons el nombre de carbonis*

<i>Estat a temperatura ambient</i>	<i>Nombre de carbonis</i>	<i>Nom</i>	<i>Temperatura d'ebullició (°C)</i>
Gas	C ₁	Metà	-107
	C ₂	Età	-67
	C ₃	Propà	-43
	C ₄	Butà	-18
Líquid lleuger	C ₅ a C ₇	Nafta lleugera, dissolvents i fluids de neteja en sec	40-70
Líquid	C ₆ a C ₁₂	Gasolina	60-150
	C ₁₀ a C ₁₅	Querosè	120-300
	C ₁₀ a C ₂₀	Gasoli i fuel	250-350
Líquid dens	C ₁₆ a C ₂₀	Lubrificants, grasses semisòlides, vaselina	> 300
Sòlid	> C ₂₀	Parafines i asfalts	

Els accidents enregistrats es poden classificar en una primera aproximació en quatre tipus generals: fuga, incendi, explosió i núvol de gas. La taula 2 mostra la distribució dels registres en funció del tipus general d'accident. Com es pot observar, l'incendi és, després de la fuga, l'accident que presenta un nombre més gran de registres.

La base de dades MHIDAS considera set tipus diferents d'origen. Si s'agafen els registres en els quals s'ha pro-

duït un incendi i es classifiquen en funció del seu origen, s'obtenen els resultats de la taula 3, on es pot veure que el 77 % dels incendis es produeixen en plantes de procés, d'emmagatzematge o durant el transport.

TAULA 2. *Distribució en funció del tipus general d'accident*

<i>Tipus d'accident</i>	<i>Nre. d'accidents</i>	<i>Percentatge*</i>
Fuita	6.369	59,7
Incendi	3.912	36,7
Explosió	3.117	29,2
Núvol de gas	940	8,8
Total	14.337	134,4

* Aquest percentatge està calculat dividint pel nombre d'accidents de la base de dades (11.790), dels quals s'ha restat els tipus d'accident que són desconeguts (1.124).

TAULA 3. *Distribució dels registres corresponents a incendis segons l'origen de l'accident*

<i>Origen</i>	<i>Nre. de registres</i>	<i>Percentatge</i>
Planta de procés	1.212	31
Transport	1.036	26,5
Planta d'emmagatzematge	765	19,6
Domèstic/comercial	313	8
Càrrega i descàrrega	275	7
Magatzem de mercaderies	199	5
Desconegut	62	1,6
Magatzem de residus	50	1,3
Total	3.912	100

La base de dades MHIDAS distingeix els set tipus d'incendis següents: bassals de foc, foc en un dipòsit, incendi d'un núvol de gas (flamarada), doll de foc, bola de foc, tempesta de foc i incendi indeterminat. La taula 4 mostra la distribució dels registres corresponents als incendis segons la seva tipologia.

TAULA 4. *Distribució dels registres segons el tipus d'incendi*

<i>Tipus d'incendi</i>	<i>Nre. de registres</i>	<i>Percentatge</i>
Incendi indeterminat	3.412	87,2
Incendi d'un dipòsit	139	3,6
Bola de foc	124	3,2
Incendi d'un núvol de vapor	118	3
Incendi d'un bassal	100	2,6
Doll de foc	17	0,4
Tempesta de foc	2	0,05
Total	3.912	100

Es pot observar que en la majoria dels casos no s'ha pogut establir el tipus d'incendi, però si s'agafen aquells en què sí que s'ha pogut determinar —exceptuant els dolls i les tempestes de foc, que són més minoritaris—, veiem que presenten una freqüència semblant.

També resulta interessant la classificació dels incendis segons l'estat físic del producte involucrat. S'observava que aproximadament en un 60% dels accidents la substància involucrada es trobava en estat líquid; en un 30%, en estat gasós (gasos i gasos líquats a pressió o criogènicament), i el 10% restant, en estat sòlid.

365

2. TIPUS D'INCENDIS D'HIDROCARBURS

D'incendis d'hidrocarburs, n'hi ha de molts tipus diferents, tal com ja s'ha pogut apreciar en l'apartat 1.2. Que tingui lloc un tipus d'incendi o un altre dependrà bàsicament de l'estat de la substància (gas, líquid o sòlid) i de les característiques del vesselament. Generalment, perquè hi hagi un incendi s'ha de produir la pèrdua de contenció d'un producte inflamable, i aquesta pot tenir lloc per la ruptura total o parcial del recipient que el conté (dipòsit, canonada, vàlvula, etc.). A continuació es fa una classificació i descripció dels diversos tipus incendis (Planas, 1998).

2.1. Incendi d'un líquid

Quan es produeix la fuga d'un líquid inflamable, es poden generar diferents tipus d'incendi, depenent del tipus de fuga i d'on té lloc:

- bassals de foc sobre el sòl (*pool fire on land*)
- bassals de foc sobre l'aigua (*pool fire on water*)
- incendi d'un dipòsit (*tank fire*)
- incendis en moviment (*running fire*).

2.1.1. Bassals de foc sobre el sòl

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix la ignició d'una fuga o vessament d'un líquid inflamable sobre el sòl. Quan la fuga és instantània (per exemple, en la ruptura total d'un dipòsit), el líquid vessat s'anirà escampant fins que trobi una barrera o fins que s'hagi consumit tot el combustible en l'incendi. En el cas d'una fuga contínua (per exemple, en la ruptura parcial d'una canonada), el bassal anirà creixent fins que la velocitat de combustió iguali el cabal de vessament; s'arriba aleshores a un diàmetre d'equilibri, que es manté mentre no s'aturi la fuga. D'altra banda, si el líquid queda retingut dins algun recipient o àrea protegida, com pot ser una cubeta, aleshores les mides del bassal no dependran tant de si la fuga és instantània o contínua.

En aquest tipus d'incendi, el líquid rep calor de la flama per radiació i convecció, i alhora també perd o guanya calor per conducció des del sòl. Es pot dir que hi ha un mecanisme de retroalimentació mitjançant el qual es desenvolupa l'incendi, ja que la calor provinent de les flames vaporitza combustible i aquest fa que es puguin mantenir les flames. Aquest mecanisme de retroalimentació a través del qual la flama governa el seu propi subministrament de combustible

es pot considerar característic dels incendis de bassals. El vapor que abandona el basal és escalfat ràpidament per les flames. Alhora les flames arrossegueu l'aire de l'entorn, i això crea grans turbulències on es barregen l'aire amb el combustible no cremat i els gasos calents producte de la combustió. En aquest tipus d'incendi la combustió és generalment incompleta, es produeix sutge i s'emet calor en forma de radiació.

2.1.2. Bassals de foc sobre l'aigua

Aquest és un escenari molt similar al de l'apartat anterior, amb la particularitat que el vessament de combustible es produeix sobre la superfície de l'aigua, generalment del mar. És un cas relativament freqüent al voltant de vaixells petrolers i plataformes petrolíferes.

Un factor important que cal tenir en compte en aquest cas és que les pèrdues de calor cap a l'aigua seran molt importants; això fa que la temperatura del basal no sigui tan gran i l'evaporació sigui menor que en el cas anterior, fins al punt que sovint la flama no es pot mantenir. D'altra banda, si la ignició del basal no es produeix de manera immediata, el basal anirà augmentant el seu diàmetre, però alhora reduirà el seu gruix; pot arribar un moment que el gruix sigui prou petit per a fer que la ignició esdevingui impossible —aquest gruix sol estar al voltant d'1,25 mm (Scandpower-Sintef, 1992). En el cas dels combustibles que es troben emmagatzemats en condicions criogèniques, el comportament descrit varia considerablement, ja que la transferència de calor es produeix des de l'aigua cap al basal i no en sentit contrari, i pot arribar a igualar la calor transferida de la flama cap al basal.

Estudiar i modelitzar el comportament d'aquest tipus

d'incendis és molt complex. Cal tenir en compte les condicions especials de l'entorn i el fet que el vent i els corrents marins confereixen al basal formes molt variades i normalment allargades; a més, les propietats físiques del combustible van variant amb el temps a causa de l'evaporació dels components més volàtils, la dissolució en l'aigua i la degradació biològica.

2.1.3. Incendi d'un dipòsit

Els incendis en dipòsits d'emmagatzematge d'hidrocarburs són relativament freqüents i involucren, generalment, grans quantitats de producte (un sol dipòsit pot arribar a contenir uns 500.000 barrils,¹ uns 80.000 m³). La causa més freqüent d'aquest tipus d'incendi és el sobrecompliment, que pot fer esclatar la zona del vapor i, al seu torn, fer que salti la tapa del dipòsit i l'incendi quedi retingut dins d'aquest. Una vegada iniciat, l'incendi tindrà unes característiques molt semblants als dos descrits anteriorment; la diferència en aquest cas radica en la durada que aquest pot tenir, que pot arribar a ser d'alguns dies, i en el fet que sovint es desenvolupa un fenomen extremament perillós —tant per la magnitud de les seves conseqüències com per la seva difícil predicció— anomenat *boilover*.

El *boilover* es pot produir sobretot en dipòsits que contenen barreges de diversos hidrocarburs. En iniciar-se l'incendi, la capa superficial d'hidrocarburs es va escalfant per la radiació, de manera que s'inicia l'ebullició, la qual provoca un procés de destil·lació: els components més volàtils són els que passen preferentment al vapor i alimenten la flama. D'aquesta manera, la capa superficial es va enriquint

1. Un barril Brent (bbl) són 0,159 m³.

en els components més pesants, alhora que en va augmentant la temperatura. A mesura que passa el temps, aquesta capa rica en productes pesants augmenta de gruix i es fa més profunda; la velocitat a la qual augmenta el seu gruix és més gran que la velocitat a la qual retrocedeix la superfície del líquid contingut en el dipòsit. D'aquesta manera, una «ona de calor» es propaga cap a la part inferior del dipòsit. Si aquest conté aigua, en algun moment aquesta ona de calor (a una temperatura superior a la d'ebullició de l'aigua) arribarà a la capa aquosa i farà que es vaporitzi. La generació pràcticament instantània d'una gran quantitat de vapor, amb un volum específic molt superior al líquid, provocarà una violenta erupció, amb la formació d'una bola de foc i la projecció de combustible inflammat cap a l'exterior, que pot arribar a distàncies considerables.

No tots els combustibles són susceptibles d'experimentar el fenomen del *boilover*; en general, aquest està associat amb els combustibles formats per una barreja de components amb una àmplia gamma de temperatures d'ebullició (un bon exemple n'és el petroli cru).

369

2.1.4. Incendis en moviment

Els incendis en moviment tenen lloc quan el líquid inflamable es vessa sobre una superfície inclinada. Si es produeix la ignició, l'incendi es desplaçarà cap allà on es desplaça el líquid. Aquest tipus d'incendis són molt perillosos, ja que en pocs moments poden arribar a tenir grans dimensions i cobrir zones molt grans dins una planta.

Per les seves característiques són molt difícils d'estudiar i avui dia el seu comportament és encara poc conegut. El que s'ha comprovat experimentalment és que requereixen cabals més grans d'aigua (o escuma) per a la seva extinció, si

es compara amb un incendi de característiques similars però estàtic.

2.2. Incendi d'un gas

Quan es produeix la fuga d'un gas o vapor inflamable es poden generar, essencialment, tres tipus d'incendi:

- incendi d'un núvol de gas (*flash fire*)
- incendi d'un doll de gas (*jet fire*)
- bola de foc (*fireball*).

2.2.1. Incendi d'un núvol de gas

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix la ignició retardada del vessament d'un gas o un vapor inflamable que forma un núvol que es va dispersant. És difícil definir el punt de transició entre l'explosió i l'incendi d'un núvol de vapor. En un incendi, els efectes de la pressió es poden considerar negligibles; per això, cal que no hi hagi obstacles o un confinament que puguin accelerar el front de la flama, prop del punt d'ignició. La flama es mou —a velocitats d'entre 5 i 30 m/s— des del punt d'ignició cap al punt d'emissió del gas, a través de les zones del núvol on el gas es troba dins els límits d'inflamabilitat. Aquest tipus d'incendi té una durada molt curta, generalment inferior a un minut.

En determinades situacions, l'incendi d'un núvol de vapor derivarà en una explosió, és a dir, es generarà una ona de sobrepressió. Perquè això succeeixi, la velocitat de propagació del front de flama ha de ser gran; com més gran sigui, més grans seran els efectes de l'explosió. Hi ha dos mecanismes bàsics per a la propagació de la flama en una explosió: la deflagració i la detonació. Generalment, quan es produeix

l'explosió d'un núvol de vapor és pel mecanisme de deflagració, on les velocitats del front de flama poden estar entre 100 i 1.000 m/s (que generen sobrepressions d'entre 1 i 10 bar aproximadament). Iniciar directament l'explosió d'un núvol de vapor com una detonació és extremament difícil, ja que es requereixen unes condicions de turbulència i homogeneïtat elevades en el núvol, així com una energia d'ignició gran, que difícilment es donen en situacions reals. Sí que es pot produir, però, la transició des d'una deflagració cap a una detonació si la turbulència en el núvol és gran. En una detonació les velocitats del front de flama poden ser aproximadament de 1.700 a 2.100 m/s (que generen sobrepressions d'entre 18 i 22 bar), amb la qual cosa superen entre dues i cinc vegades la velocitat del so (CPR 14E, 1997).

2.2.2. Incendi d'un doll de gas

371

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix el vessament accidental de vapors o gasos inflamables en un cert moment inicial. Aquest tipus d'incendi no sempre és accidental; en el cas de les torxes de producció s'utilitzen per a evacuar subproductes no volguts, i en les torxes de procés, per a evacuar gasos a través de vàlvules de seguretat. Pràcticament no hi ha diferències entre els dolls generats de manera accidental i els intencionats; potser cal destacar que, en aquest darrer cas, els gasos surten a través d'una vàlvula i això fa que puguin assolir, si es vol, velocitats supersòniques. En el cas dels dolls accidentals, el gas surt a través d'un orifici en un dipòsit, una canonada trencada o una brida, i la velocitat màxima que pot assolir el gas en aquestes condicions és la sònica.

Un factor important que els distingeix dels incendis de basal és que aquí no hi ha retroalimentació de la flama i, per tant, el cabal de gas que passa a la flama no depèn d'aques-

ta, sinó únicament de les característiques del vessament. Depenent del tipus de combustible emès i de la seva velocitat de sortida, s'obtenen dolls de característiques diferents.

2.2.3. Bola de foc

Aquest tipus d'incendi té lloc quan es produeix la despressurització sobtada d'un gas líquid inflamable que ha estat sobreescalfat, generalment per l'acció d'algun altre incendi sobre el recipient que el conté i que provoca la ruptura d'aquest a causa de la disminució de la resistència de l'acer amb la temperatura. Aquesta despressurització provoca la vaporització del líquid, que serà abocat a l'exterior en forma de barreja bifàsica líquid/vapor, la qual immediatament s'inflamarà i donarà lloc a una foguera de forma aproximadament hemisfèrica que s'estendrà inicialment arran de terra. Aquesta massa de combustible només pot cremar en la seva superfície perquè el seu interior, molt ric en combustible i pràcticament sense aire, es troba fora dels límits d'inflamabilitat. Posteriorment, la turbulència de l'incendi fa que vagi entrant aire dins la massa de combustible. Al mateix temps, la radiació procedent de les flames va evaporant les gotes de líquid i escalfant el conjunt. Com a resultat de tot aquest procés, la massa en ignició va augmentant de grandària de manera turbulenta, adquireix una forma més o menys esfèrica i va ascendint deixant una cua semblant en la forma a la del típic bolet d'una explosió nuclear.

Aquest tipus d'incendi va generalment associat amb l'explosió BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*), ja que l'esclat del dipòsit i la vaporització sobtada del líquid, amb el consegüent increment extraordinari de volum que experimenta aquest, generen una ona de pressió d'efectes molt greus. L'accident BLEVE - bola de foc és tractat de

manera específica en una altra ponència dins d'aquestes jornades i, per tant, aquí no s'hi aprofundirà més.

2.3. *Incendi d'un sòlid*

En el cas dels hidrocarburs, aquest tipus d'incendi és poc freqüent en el sector industrial (tal com s'ha vist en l'anàlisi històrica) i, tot i que davant d'un incendi generalitzat aquests compostos també cremarien, pràcticament mai no en són els iniciadors. L'incendi de sòlids és més típic trobar-lo en edificis, on hi ha combustibles sòlids de diversa tipologia, alguns dels quals derivats dels hidrocarburs, com poden ser els plàstics. És per aquest motiu que no seran tractats aquí.

3. CÀLCUL D'EFECTES I CONSEQÜÈNCIES

373

3.1. *Efectes derivats d'un incendi*

L'efecte més important dels incendis és la calor que emeten i que incidirà sobre un element receptor, com poden ser les persones o altres instal·lacions. Cal fer aquí la distinció entre el cas en què l'element receptor estigui immers en les flames —aleshores rep calor per radiació i convecció— o que sigui a una certa distància d'aquestes —rep calor únicament per radiació. En general, els models més utilitzats per a determinar els efectes derivats dels incendis estan pensats per a objectes situats a una certa distància de la flama i, per tant, tenen en compte únicament la radiació emesa per aquesta. Dins d'aquest grup, cal distingir-ne tres categories: els models semiempírics, els models CFD (*computational field dynamics*) i els models integrals (Muñoz *et al.*, 2003).

Els models semiempírics són els més simples i més àmpliament utilitzats en el camp de l'anàlisi de risc. Es basen en dades experimentals sovint extretes a escala de laboratori, que són posteriorment extrapolades a escala real. Els models del tipus CFD són els més complexos. S'hi resolten les equacions de Navier-Stokes mitjançant mètodes numèrics incorporant submodels que descriuen els processos físics i químics que tenen lloc en el foc. Per causa de la seva complexitat, aquests models no s'utilitzen en el camp de l'anàlisi del risc a la indústria. Els models integrals són un compromís entre els dos anteriors, tot i que estan formulats d'una manera més propera als CFD i això ha fet que tampoc no hagin estat implementats en el camp de l'anàlisi del risc.

Si ens centrem, doncs, en els models semiempírics, en el camp dels incendis d'hidrocarburs cal destacar dos models: el model de font puntual i el model del cos sòlid, els quals es descriuen a continuació.

3.1.1. Model de font puntual

El model de font puntual suposa que la flama es pot representar com un punt que emet energia en totes direccions. Considera també que l'energia emesa per la flama en forma de radiació és una fracció de l'energia alliberada en la combustió i que la seva intensitat disminueix proporcionalment a l'invers de la distància entre el punt emissor i l'objecte receptor [1].

$$\dot{q}'' = \frac{Q_r}{4\pi x^2} \quad [1]$$

La manera de determinar l'energia emesa en forma de radiació (Q_r) depèn del tipus d'incendi: en el cas de bassals i

dolls de foc caldria utilitzar [2], mentre que per a boles de foc, que tenen una durada limitada, [3] seria l'adequada.

$$Q_r = \eta \cdot \dot{m} \cdot \Delta H_c \quad [2]$$

$$Q_r = \eta \cdot \frac{M \cdot \Delta H_c}{t_f} \quad [3]$$

Un dels paràmetres més importants d'aquest model és la fracció d'energia que s'emet en forma de radiació, η , que s'ha d'obtenir a partir de dades experimentals resultants de mesures fetes amb radiòmetres o càmeres infraroges. En el cas dels incendis de bassals, η depèn principalment del tipus de combustible i de les dimensions de la flama. En el cas dels dolls de foc, a més de dependre d'aquests dos paràmetres, depèn també de la velocitat de sortida del gas per l'orifici (u_j); a velocitats baixes, les flames (laminars) generen més fum perquè la barreja aire/combustible és pobra, mentre que a velocitats altes les flames són turbulentes i generen menys fum; això fa que aquestes darreres emetin més radiació, ja que el fum actua com a atenuant. A la taula 5 es recullen alguns valors obtinguts experimentalment per a incendis de bassals i dolls de foc (Muñoz *et al.*, 2003).

375

En el cas de les boles de foc, conèixer el paràmetre η de manera experimental és molt més difícil i això fa que sigui el paràmetre, de tots els que apareixen al model de font puntual, que presenta una incertesa més gran. L'equació [4] mostra una correlació per a determinar la fracció d'energia radiant en boles de foc, en funció de la pressió en el recipient just abans que es produeixi l'esclat d'aquest (Roberts, 2000).

$$\eta = 0,27 \cdot P_0^{0,32} \quad [4]$$

TAULA 5. *Fracció d'energia emesa en forma de radiació i poder emissiu de les flames*

<i>Típus d'incendi</i>	<i>Combustible</i>	<i>Fracció radiant, η (%)</i>	<i>Poder emissiu</i>	<i>Observacions (kW/m²)</i>
Dolls de foc	Hidrogen	20		
	Metà	20	157	
	Età		362	
	Etilè	25	498	
	Propà	30	336	
	n-Butà	30	383	
	Pentà	40		
	Propilè		279	
Bassals de foc	Benzè	37		
	Butà	19,9-26,9		$D = 0,3-0,76$ m
	Etanol	20		
	Gasolina	13		
	Petrolí cru	60,1-10	60-130	$D = 1-10$ (*)
	Hexà	40		
	JP5		30-50	$D = 1-30$ m
	Querosè		10-25	$D = 30-80$ m
	GNL (sobre aigua)	12-31		$D = 8,5-15$ (*)
	GNL (sobre el sòl)	36	150-200	$D = 20$ m
	GLP (sobre el sòl)		60-160	$D = 2-17$ m
Metanol	17,7		$D = 1,22$ m	
		70	$D = 3$ m	

* Els incendis de diàmetre més gran irradien menys a causa de l'atenuació que provoca el fum.

El model de font puntual presenta l'inconvenient de predir en excés el flux de calor en punts molt propers a la flama i, per tant, no es pot utilitzar per a determinar distàncies de seguretat per a persones o equipament. D'altra banda, el model pot resultar relativament acurat per a punts allunyats, que en el cas dels bassals de foc es podrien correspondre amb distàncies entre la flama i l'observador cinc vegades superiors al diàmetre del bassal. Un altre inconvenient que presenta aquest model és que no té en compte la forma de la flama, tot i que això es pot resoldre suposant una font amb

múltiples punts, cada un dels quals emet una part de l'energia total irradiada.

3.1.2. Model del cos sòlid

Aquest és el model més utilitzat per a calcular la radiació que incideix sobre un objecte que es troba a una certa distància de la flama, independentment que aquesta distància sigui gran o petita. En aquest model, la flama es representa com un cos gris que emet radiació tèrmica des de la seva superfície [5], i el cos pot prendre diferents formes o geometries segons el tipus d'incendi. Així, en un incendi de basal la flama s'acostuma a representar com un cilindre, mentre que una bola de foc es representa com una esfera:

$$\dot{q}'' = \tau \cdot F \cdot E \quad [5]$$

377

3.1.2.1. Geometria de la flama

Tal com s'ha pogut comprovar a l'apartat 2, cada tipus d'incendi presenta una geometria diferent. Tot i que una flama no és un cos estàtic amb una geometria fixada, per a poder utilitzar el model del cos sòlid cal definir-ne una que s'aproximi tant com sigui possible a la realitat. En el cas dels incendis de basal, la més utilitzada ha estat la geometria cilíndrica, que en el cas que hi hagi vent passa a ser un cilindre inclinat; no-gensmenys, alguns autors han proposat altres geometries (vegeu la figura 1), que tot i permetre resultats més acurats sovint compliquen l'aplicació del model del cos sòlid.

Els paràmetres més importants per a definir la geometria en el cas dels incendis de bassals i en dipòsits són el diàmetre (D), la longitud de la flama (H) i, en el cas que hi hagi

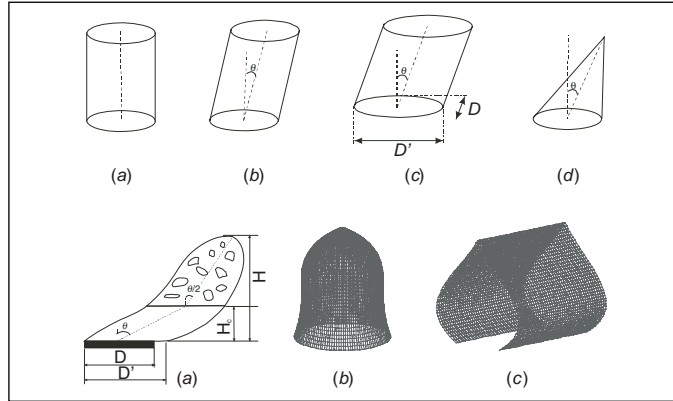


FIGURA 1. Diverses geometries de flama per a incendis de bassals.

378

vent, la seva inclinació (θ) i el desplaçament de la base (D'). En el cas dels dols de foc, la flama s'acostuma a representar com un cilindre o bé com un tronc de con (vegeu la figura 2), les dimensions dels quals es determinen a partir de la velocitat del gas a la sortida de l'orifici, del diàmetre d'aquest i de la velocitat del vent.

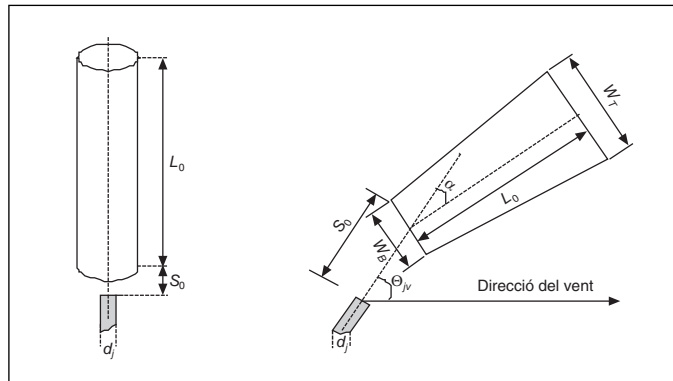


FIGURA 2. Geometries més utilitzades en el cas dels dols de foc.

Pel que fa a les boles de foc, es consideren esferes elevades a una certa altura respecte del sòl. El seu diàmetre i altura depenen en la majoria de correlacions existents de la massa de combustible involucrat en la bola de foc.

En els incendis de núvols de vapor, la geometria de l'incendi en si mateixa no és excessivament important, donada la curta durada que tenen; sí que ho són, però, la posició i la mida del núvol en el moment de produir-se la ignició, ja que això permetrà conèixer l'àrea afectada per la radiació.

3.1.2.2. Poder emissiu

El poder emissiu és la quantitat d'energia que emet la flama per unitat de superfície. Suposant que la flama és un cos gris, aquesta energia es pot relacionar amb la temperatura de la flama a través de la llei de Stefan-Boltzmann [6].

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_a^4) \quad [6]$$

Com que $T_f > T_a$ aquesta equació se sol simplificar d'acord amb l'equació [7], on l'emissivitat de la flama (ε) i la seva temperatura (T_f) cal dir que no són fàcils de determinar. Ambdós paràmetres depenen del tipus de combustible i varien amb la posició i el temps.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad [7]$$

Això fa que sovint s'utilitzin expressions empíriques per determinar el poder emissiu (a la taula 5 es poden veure alguns valors experimentals per diferents tipus d'incendis i combustibles). Per a incendis de bassals o dipòsits d'hidrocarburs, on les flames generen molt de fum, les equacions més utilitzades prenen formes semblants a l'equació [8].

$$E = E_{\max} \cdot e^{-S_c D} + E_s \cdot (1 - e^{-S_c D}) \quad [8]$$

En el cas dels dolls de foc i de les boles de foc, el poder emissiu es determina habitualment a partir de l'energia total emesa en la combustió i de la fracció d'energia emesa en forma de radiació.

3.1.2.3. Transmissivitat atmosfèrica

L'energia emesa per les flames en forma de radiació és parcialment atenuada en el seu recorregut entre la flama i l'objecte receptor. Això es deu al fet que alguns dels components de l'atmosfera absorbeixen la radiació, especialment el vapor d'aigua i el CO₂. A la taula 6 es donen algunes correlacions per a l'estimació de la transmissivitat atmosfèrica.

TAULA 6. Correlacions per a la determinació de l'emissivitat

Correlació	Observacions	Referència
$\tau = 2,02(P_{wr} x)^{-0,09}$	[9] $10^4 < P_{wr} x < 10^5$	TNO, 1997
$\tau = 1 - 0,058 \ln(x)$	[10]	Satyanarayana <i>et al.</i> , 1991
$\tau = \log(14,1 R_H^{-0,108} x^{-0,13})$	[11] $T_f = 1.500 \text{ K}$ $x < 500 \text{ m}$	Satyanarayana <i>et al.</i> , 1991
$\tau = 1,389 - 0,135 \log(P_{wr} x)$	[12]	Cook <i>et al.</i> , 1990
$\tau = 1,304(R_H x)^{-1/16}$	[13]	Scandpower-Sinteg, 1992

3.1.2.4. Factor de vista

El factor de vista es defineix com la relació entre la radiació que rep l'objecte i la radiació total que emet la flama. És un paràmetre que depèn de la forma i la mida de la flama, així com de la

distància entre la flama i l'objecte i de la posició i l'orientació d'aquest. Avui dia, la manera més freqüent de calcular aquest paràmetre és mitjançant mètodes numèrics; no gensmenys, David i Bagster (1989 i 1990) han determinat els factors de vista per a diferents geometries de bassals i dolls de foc.

3.2. *Conseqüències derivades d'un incendi*

Tan bon punt es coneix l'efecte d'un incendi —és a dir, la radiació tèrmica—, es poden avaluar també les conseqüències que se'n poden derivar, és a dir, què passarà quan aquesta radiació arribi a les persones o l'entorn (edificis, equips, etc.). L'estimació de conseqüències es pot fer mitjançant dades tabulades (vegeu la taula 7) o mitjançant els denominats *models de vulnerabilitat*.

TAULA 7. *Conseqüències observades per a diversos valors de radiació tèrmica*

Radiació tèrmica (kW/m ²)	Conseqüència
1,4	Inofensiu per a les persones sense cap protecció especial.
1,7	Mínim necessari per a provocar dolor.
2,1	Mínim necessari per a provocar dolor al cap d'1 min.
4,0	Suficient per a provocar dolor en 20 s; cremades de primer grau.
4,7	Provoca dolor en 15-20 s; ferides al cap de 30 s.
11,7	L'acer prim, parcialment aïllat, pot perdre la integritat mecànica.
12,5	La fusta es pot encendre després d'una exposició perllongada; fusió del recobriments plàstic en cables elèctrics; 100% de letalitat.
25,0	L'acer prim aïllat pot perdre la integritat mecànica.
37,5	Suficient per a produir danys en equips de procés i col·lapse d'estructures.

Els models de vulnerabilitat més utilitzats són els de l'anàlisi pròbit (*probability unit*), que relaciona la variable pròbit (Y) amb la dosi de radiació rebuda (V). La variable pròbit és una mesura del percentatge de població vulnerable sot-

mesa a una determinada dosi que rep un dany determinat. Les funcions pròbit solen tenir la forma següent:

$$Y = a + b \ln(V), \quad [9]$$

on a i b són constants que es determinen experimentalment a partir de la informació procedent d'accidents o, en determinats casos, a partir d'experimentació amb animals. La relació entre Y i el percentatge de població afectada es pot trobar a la bibliografia en forma de taula (Casal *et al.*, 1999). A la taula 8 es donen les funcions pròbit per estimar algunes de les conseqüències de la radiació tèrmica sobre les persones.

TAULA 8. Funcions pròbit per a la radiació tèrmica

Conseqüència	Funció pròbit*	
Cremades de primer grau	$Y = -39,83 + 3,0186 \ln(\dot{q}^{m/3} \cdot t)$	[14]
Cremades de segon grau	$Y = -43,14 + 3,0186 \ln(\dot{q}^{m/3} \cdot t)$	[15]
Mortalitat sense protecció	$Y = -36,38 + 2,56 \ln(\dot{q}^{m/3} \cdot t)$	[16]
Mortalitat amb protecció	$Y = -37,23 + 2,56 \ln(\dot{q}^{m/3} \cdot t)$	[17]

* t en segons i \dot{q}'' en W/m^2 .

4. NOMENCLATURA

D	diàmetre de la flama (m)
ΔH_c	entalpia de combustió (kJ/kg)
E	poder emissiu de la flama (kW/m^2)
E_{max}	poder emissiu màxim (kW/m^2)
E_s	poder emissiu del fum (kW/m^2)
F	factor de vista
\dot{m}	velocitat màssica de combustió (kg/s)
M	massa total de combustible involucrat en la bola de foc (kg)

P_0	pressió en el recipient abans que es produeixi l'esclat en una BLEVE (MPa)
\dot{q}''	flux de calor que incideix en un objecte receptor (kW/m ²)
Q_r	energia emesa per la flama en forma de radiació per unitat de temps (kW)
S_e	paràmetre determinat experimentalment (m ⁻¹)
T_a	temperatura ambient (K)
T_f	temperatura de la flama (K)
t_f	temps que dura la bola de foc (s), a les equacions 14 a 18, temps d'exposició (s)
V	dosí d'un determinat efecte
x	distància entre la font emissora i l'objecte receptor (m)
Y	variable pròbit
ε	emissivitat de la flama
η	fracció de l'energia despresada en la combustió que s'emet en forma de radiació
σ	constant d'Stefan-Boltzmann
τ	transmissivitat atmosfèrica

BIBLIOGRAFIA

- CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J. A. (1999). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona: Edicions UPC.
- COOK, J.; BAHRAMI, Z.; WHITEHOUSE, R. J. (1990). «A comprehensive program for calculation of flame radiation levels». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 3, núm. 1, p. 150-155.
- DAVIS, B. C.; BAGSTER, D. F. (1990). «The computation of view factors of fire models. 2. Finite targets». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 3, p. 327-329.

- (1989). «The computation of view factors of fire models. 1. Differential targets». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 2, núm. 4, p. 224-234.
- MHIDAS (2003). Major Hazard Incident Data Service.
- MUÑOZ, M.; CASAL, J.; ARNALDOS, J.; PLANAS, E. (2003). «Modelling thermal radiation hazards, a review». A: *Chemical Industry and Environment IV*. Ed. A. Macías Machin i J. Umbría: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- PLANAS, E. (1998). *Incendis d'hidrocarburs: Efectes sobre equips de procés*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia. (Arxius de les Seccions de Ciències; 118)
- ROBERTS, M. W. (2000). *Analysis of boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): Events at DOE Sites*. Safety Analysis Workshop 2000.
- SATYANARAYANA, K.; BORAH, M.; RAO, P. G. (1991). «Prediction of thermal hazards from fireballs». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 4, núm. 5, p. 344-347.
- SCANDPOWER-SINTEF (1992). *Handbook for fire calculations and fire risk assessment in the process industry*. Noruega: Scandpower.
- THE NETHERLANDS ORGANIZATIONS OF APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH [TNO] (1997). BOSCH, C. J. H. van den; WETERINGS, R. [ed.]. *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*. *Yellow Book*. 3a ed. La Haia: Committee for the Prevention of Disasters.

**SOCIETAT CATALANA
DE TECNOLOGIA**

L'ACCIDENT BLEVE - BOLA DE FOC,

A CÀRREC DE

JOAQUIM CASAL I FÀBREGA,

DEL CENTRE D'ESTUDIS

DEL RISC TECNOLÒGIC

DE LA UNIVERSITAT

POLITÈCNICA DE CATALUNYA

La BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*) és un dels accidents més severos que poden ocórrer a la indústria de procés, en l'emmagatzematge d'hidrocarburs i en el transport de determinats productes perillosos. De BLEVE n'hi ha de tant en tant i, malauradament, és molt difícil que deixin d'haver-n'hi.

En la conferència es presentaran les principals característiques d'aquest accident, així com la seva freqüència i les substàncies més usuals en les quals té lloc.

S'exposaran també les metodologies emprades per estimar-ne els efectes (radiació tèrmica, ona de sobrepressió i fragments) i les seves conseqüències (models de vulnerabilitat), així com les mesures preventives més adients. Finalment es discutiran alguns dels accidents ocorreguts.

1. INTRODUCCIÓ

Les explosions BLEVE són accidents que, per les seves característiques i, sovint, per les circumstàncies en què ocorren, solen presentar una gran severitat. Tot i que, estrictament parlant, la BLEVE és una explosió mecànica —pot succeir, per exemple, en una caldera de vapor d'aigua— que no ha d'incloure per força efectes tèrmics, sovint el líquid involucrat és un combustible que origina una bola de foc immediatament després de l'explosió. És per això que normalment es parla de la combinació BLEVE - bola de foc, és a dir, un accident que comprèn alhora els efectes d'una explosió i d'un incendi.

Aquest tipus d'accident succeeix amb una certa freqüència, atès que les substàncies que el poden produir (propà, butà, clorur de vinil, clor, etc.) són relativament corrents a la indústria i, d'altra banda, es troben tant en instal·lacions fixes com en el transport per carretera o per tren.

La taula adjunta mostra les causes més freqüents de BLEVE (Prugh, 1991). Tot i que en algun cas poden coincidir més d'una d'aquestes causes, és evident que els incendis, els descarrilaments i el sobrecompliment són les causes més freqüents d'aquests accidents.

TAULA 1. *Causas més freqüents de BLEVE*

<i>Causa</i>	<i>%</i>
Incendi	26
Descarrilament	20
Sobrecompliment	18
Reacció fora de control	12
Col·lisió	10
Sobrepresió	6
Altres	8

En aquest text es comenten les principals característiques d'aquest tipus d'accident, així com la metodologia per estimar-ne els efectes.

2. QUÈ SÓN LES EXPLOSIONS BLEVE?

Si un recipient que conté un líquid a pressió és escalfat —per exemple, per un incendi—, la pressió al seu interior anirà augmentant. Arribarà un moment que la paret del dipòsit no la podrà resistir i aquest esclatarà. Això és més probable que passi a la part superior del dipòsit, on la paret no està en contacte amb el líquid i, per tant, no està refrigerada; en augmentar la temperatura, disminueix la resistència mecànica. En canvi, la part del dipòsit que es troba en contacte amb el líquid serà refrigerada per aquest, amb la qual cosa mantindrà una temperatura molt més baixa.

Quan el recipient esclata, la despressurització instantània fa que el líquid passi a tenir momentàniament un

altíssim grau de sobreescalfament, cosa que provoca una vaporització brutal. Si la temperatura del líquid en el moment de la despressurització és superior a un valor determinat per a cada substància, denominat *temperatura límit de sobreescalfament*, tindrà lloc la vaporització violenta i instantània d'una part del líquid; aleshores l'increment sobtat de volum —1.750 vegades en el cas de l'aigua i 250 en el cas del propà— originarà una violenta explosió. L'ona de sobrepressió generada pot ser extraordinàriament destructiva i els fragments del dipòsit poden ser projectats fins a grans distàncies.

Si la substància involucrada no és combustible, la sobrepressió i la projecció de fragments seran els únics efectes de l'explosió. Ara bé, si es tracta d'un combustible (per exemple, gas de petroli líquat), llavors la massa alliberada en

388



FIGURA 1. Bola de foc en una planta de procés. La xemeneia de la dreta té una altura de 180 m.

l'explosió —una barreja de vapor i petites gotes de líquid— s'inflamarà i es formarà un núvol de foc de forma aproximadament hemisfèrica, inicialment arran de terra. El combustible només pot cremar per la perifèria d'aquest núvol, ja que a l'interior es troba fora dels límits d'inflamabilitat. Posteriorment, la turbulència del foc fa entrar aire dins la bola de foc. Al mateix temps, la radiació tèrmica evapora les gotetes de líquid i escalfa la barreja; per consegüent, tot el conjunt augmenta de volum i evoluciona cap a una forma aproximadament esfèrica que ascendeix deixant al darrere un solc de diàmetre variable. La radiació despresa per aquestes boles de foc, molt lluminoses, sol ser d'una gran intensitat. L'acció combinada de l'explosió i la bola de foc, doncs, produeix els efectes següents:

- radiació tèrmica
- ona de sobrepressió
- ejecció de fragments.

És interessant observar que és pràcticament impossible establir el moment exacte en el qual tindrà lloc l'explosió. Fa vint anys es pensava que, una vegada iniciada l'emergència —per exemple, perquè el foc havia començat a afectar un dipòsit— es disposava encara d'un cert temps abans de l'explosió per a emprendre determinades mesures (per exemple, els bombers refrigerar amb mànegues el dipòsit). A mesura que es va disposar de més informació, però, es va veure que aquest temps podia ser extraordinàriament curt, com en el cas de l'accident de San Juan Ixhuatepec (Ciutat de Mèxic, 1984), en el qual entre l'aparició de les primeres flames i la primera BLEVE van transcórrer només 69 segons.

L'instant en el qual pot ocórrer una BLEVE en un dipòsit sotmès a l'acció del foc depèn dels factors següents:

— el flux tèrmic des del foc, que estarà en funció de la distància i de la grandària de les flames i, sobretot, de si hi ha o no contacte directe entre les flames i el dipòsit

- el nivell de líquid en el dipòsit
- la capacitat de descàrrega de les vàlvules de seguretat
- l'existència d'una capa d'aïllament, dispositius de refrigeració, etc.

Encara que han estat suggerits diferents criteris, atesa la incertesa sobre quan pot ocórrer la BLEVE una vegada iniciada l'emergència, la pràctica més aconsellable és acceptar que l'explosió pot produir-se en qualsevol moment des del començament de l'acció del foc sobre el dipòsit i, per tant, evacuar ràpidament l'àrea afectada.

3. CONDICIONS PER A L'OCURRÈNCIA D'UNA BLEVE

Tot i que l'explosió d'un tanc que conté un líquid inflamable pressuritzat anirà seguida quasi sempre d'una bola de foc, l'explosió no sempre serà estrictament una BLEVE. Perquè ho sigui, cal que hi hagi un important sobreescalfament del líquid en el dipòsit i una despressurització instantània.

Diversos autors (Reid, 1979) han estudiat la manera d'establir la temperatura límit de sobreescalfament a partir de la qual, per a una substància determinada, l'explosió serà una BLEVE. Les condicions que teòricament limiten el sobreescalfament al qual pot produir-se la nucleació espontània i homogènia en el líquid poden establir-se a partir de la tangent a la corba pressió-temperatura en el punt crític. Això representa el límit a què pot escalfar-se el líquid abans que tinguin lloc la nucleació espontània i l'explosió.

La relació entre la pressió de vapor i la temperatura ve donada per l'equació de Clausius-Clapeyron:

$$\ln P = -\frac{A}{T} + B \quad [1]$$

Pot determinar-se l'equació de la línia tangent a la corba de saturació en el punt crític, i s'obté:

$$P = \operatorname{tg}\alpha \cdot T + b \quad [2]$$

Suposem, per exemple, un dipòsit que conté butà a temperatura ambient (20°C), amb vapor i líquid en equilibri (punt M de la figura 2). Si, a causa de la radiació despresa per un incendi, la temperatura augmenta fins a 70°C, la pressió en el dipòsit serà de 8 atm. Si, en aquestes condicions, el recipient esclata, hi haurà una despressurització des de 8 atm fins a la pressió atmosfèrica, corresponent a la línia NO. Com que aquesta línia no assoleix la tangent a la corba de saturació en el punt crític, segons la teoria àmpliament acceptada l'explosió no serà una BLEVE, tot i que hi haurà vaporització instantània i una forta explosió. En canvi, si durant l'es-

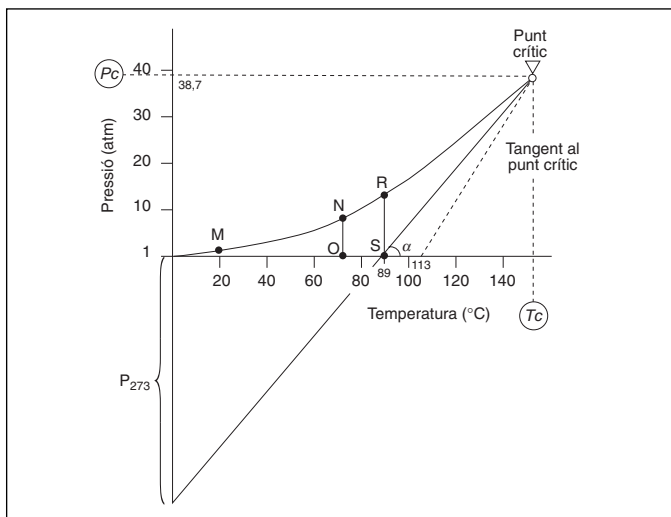


FIGURA 2. Corba de saturació per al butà i condicions límit per a la BLEVE.

calfament la temperatura del líquid assoleix els 89°C (punt R), durant la despressurització s'arribarà a la línia tangent (punt S). En aquest cas, hi haurà una nucleació espontània dins tota la massa de líquid i l'evaporació instantània serà pràcticament explosiva, amb la qual cosa s'originarà una BLEVE més violenta que en el cas anterior.

4. ESTIMACIÓ DELS EFECTES DE L'ACCIDENT BLEVE - BOLA DE FOC

Una BLEVE seguida d'una bola de foc produeix els efectes següents:

- radiació tèrmica
- ona de sobrepressió
- projecció de fragments.

La radiació tèrmica i l'ona de sobrepressió afectaran tota una zona, en principi circular, fins a una distància determinada. Els fragments projectats tindran, en canvi, una acció de tipus lineal o puntual.

A continuació s'exposa de manera breu la metodologia que pot emprar-se per a calcular de manera aproximada la intensitat (flux tèrmic, sobrepressió) i la distància assolida per aquests efectes. Una vegada quantificats, l'aplicació de models de vulnerabilitat o de valors llindar permet estimar-ne les conseqüències sobre persones o béns.

5. RADIACIÓ TÈRMICA

Quan en l'explosió BLEVE hi ha implicada una substància inflamable, sol formar-se una bola de foc que desprèn una intensa radiació: en un radi igual com a mínim al de la bola de foc (que pot arribar a ser de més de 150 m), la radiació

tèrmica és letal. És un fenomen molt ràpid, que elimina pràcticament la possibilitat de fugida de les persones properes i que ha ocasionat la mort de força persones (entre les quals, nombrosos bombers).

Els paràmetres que cal avaluar per predir la radiació tèrmica a una distància determinada són el diàmetre de la bola de foc i l'altura a la qual ascendeix i la radiació despresada des de la superfície de les flames. Diversos autors han proposat expressions per predir el diàmetre i la duració d'una bola de foc (Casal *et al.*, 2001). Les més àmpliament acceptades actualment són aquestes:

$$D = 6,14 \cdot M^{0,325} \quad [3]$$

$$t = 0,41 \cdot M^{0,340} \quad [4]$$

en què les unitats són m (D), kg (M) i s (t).

Evidentment, les prediccions fetes amb aquestes equacions són només aproximacions, ja que un càlcul exacte és pràcticament impossible. Una dificultat important és la constituïda per la impossibilitat de conèixer amb precisió la massa exacta de combustible en la bola de foc. Una part del combustible pot haver estat sortint per les vàlvules de seguretat durant una bona estona; una altra part pot haver sortit en forma de solc rere els fragments del dipòsit projectats en l'explosió; d'altra banda, és pràcticament impossible saber quin serà el grau d'ompliment del dipòsit el dia que hi hagi l'accident. És per això que alguns autors recomanen el criteri conservador de prendre com a massa de combustible en la bola de foc el 90 % de la cabuda del dipòsit.

Per estimar la radiació rebuda per una superfície situada a una distància determinada, pot emprar-se el model del cos sòlid:

$$I = \tau \cdot F \cdot E_p \quad [5]$$

Cal conèixer, doncs, el poder emissiu de la flama (E), el factor de vista (F), la transmissivitat atmosfèrica (τ) i la distància entre la flama i l'objectiu. Per calcular aquesta distància, cal saber l'altura a la qual ascendeix la bola de foc, que pot estimar-se mitjançant l'expressió següent:

$$H = 0,75 D, \quad [6]$$

en què H és l'altura (en m) a la qual es troba el centre de la bola de foc i D és el seu diàmetre.

El poder emissiu de la flama pot obtenir-se de l'equació següent:

$$E_p = \frac{\eta M H_c}{\pi D^2 t}, \quad [7]$$

394

en què H_c és la calor de combustió ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) i t , la durada de la bola de foc (s). η és la fracció de l'energia alliberada que és emesa en forma de radiació tèrmica; de fet, és la incertesa més gran en tot aquest càlcul. Ha estat proposada aquesta expressió (Roberts, 1982) per estimar-ne el valor:

$$\eta = 0,27 \cdot P_0^{0,32} \quad [8]$$

on P_0 és la pressió (relativa) en el recipient just abans de l'explosió, en MPa. El valor de η està comprès entre 0,13 i 0,40.

A causa de l'extrema simplicitat geomètrica del sistema, el factor de vista per a una superfície perpendicular a la bola de foc pot calcular-se amb una expressió molt senzilla:

$$F = \frac{D^2}{4 r^2}, \quad [9]$$

on r és la distància entre la superfície receptora i el centre de la bola de foc.

Finalment, la transmisivitat atmosfèrica pot estimar-se amb l'expressió següent:

$$\tau = 2,02 \cdot (P_w \cdot x)^{-0,09} \quad [10]$$

6. ENERGIA MECÀNICA ALLIBERADA EN L'EXPLOSIÓ

Quan un recipient esclata en una explosió BLEVE, l'energia mecànica que conté és alliberada instantàniament. Hi ha un augment molt important de volum a causa de l'expansió del vapor prèviament existent i de la vaporització instantània d'una part del líquid.

L'energia alliberada es distribueix, bàsicament, en els apartats següents:

- l'energia requerida per al trencament del recipient
- l'energia en l'ona de sobrepressió
- l'energia cinètica dels fragments.

És molt difícil establir amb precisió quina fracció de l'energia alliberada s'invertirà en la formació de l'ona de sobrepressió. Un aspecte molt important és el tipus de fractura (fràgil o dúctil) i l'eventual acció de les flames sobre les parets. S'ha suggerit que, en el trencament fràgil d'un recipient, el 80% de l'energia alliberada contribueix a l'ona de sobrepressió, mentre que si el trencament és dúctil (que és el cas més usual) l'energia en l'ona és només un 40%. En ambdós casos, la resta de l'energia s'inverteix pràcticament tota en el trencament i en l'energia cinètica dels fragments.

Pel que fa al vapor inicialment present en el recipient, l'energia alliberada en la seva expansió és:

$$E_v = m(u_1 - u_2), \quad [11]$$

on E_v és l'energia alliberada en l'expansió del vapor (kJ), m és la massa de vapor que ja existia en el recipient en el moment del trencament (kg), u_1 és l'energia interna del vapor en les condicions de trencament ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) i u_2 és l'energia interna del vapor després de l'expansió fins a la pressió atmosfèrica ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Suposant que l'expansió és isoentròpica —simplificació que termodinàmicament no és gaire correcta però que sol aplicar-se— i que el vapor es comporta com un gas ideal, aquesta energia és (Prugh, 1991):

$$E_v = 10^2 \cdot \left(\frac{P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right), \quad [12]$$

396

on P_a és la pressió atmosfèrica (bar), V és el volum inicial de vapor (m^3), γ és la relació de calors específiques i P és la pressió (bar) en el recipient just abans de l'explosió.

Aquesta energia pot expressar-se en forma de massa equivalent de TNT mitjançant el factor de conversió adient (aproximadament 1.120 cal per gram de TNT):

$$W_{\text{TNT}} = \left(\frac{0,021 \cdot P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right), \quad [13]$$

on W_{TNT} és la massa equivalent de TNT (kg).

Si, a més a més, el recipient contenia líquid sobreescalfat —com és el cas en les explosions BLEVE—, cal tenir en compte que la massa de líquid s'evaporarà parcialment i sobtadament en trobar-se a la pressió atmosfèrica. El volum d'aquest vapor a la pressió del recipient just abans de l'ex-

plosió s'ha d'afegir al volum real; la massa equivalent de TNT és llavors:

$$W_{\text{TNT}} = \left(\frac{0,021 \cdot P \cdot V^*}{\gamma - 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right), \quad [14]$$

on V^* és el volum del vapor en el recipient més el volum (a la pressió dins del recipient) del vapor generat en l'explosió, en m^3 :

$$V^* = V + V_l f \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \quad [15]$$

V és el volum de vapor dins el recipient abans de l'explosió, V_l és el volum de líquid en el recipient abans de l'explosió (m^3) i f és la fracció vaporitzada (*flash*), és a dir, la fracció de líquid que s'evapora en la despressurització; el seu valor pot calcular-se mitjançant l'expressió següent:

$$f = 1 - e^{\left(-2,63 \cdot \frac{C_p}{H_v} \cdot (T_c - T_b) \cdot \left(1 - \left(\frac{T_c - T_b}{T_c - T_0} \right)^{0,38} \right) \right)}, \quad [16]$$

on T_c és la temperatura crítica de la substància (K), T_b és la temperatura d'ebullició de la substància a la pressió atmosfèrica (K), T_0 és la temperatura de la substància en el moment de l'explosió (K) i H_v és l'entalpia d'evaporació de la substància ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Han estat proposats altres mètodes per calcular l'energia alliberada en l'explosió. Entre aquests cal esmentar el denominat *mètode de Brode* —probablement el més senzill—, que determina l'energia requerida per elevar la pressió del gas a volum constant des de la pressió ambient fins a la pressió de trencament del recipient. Un altre és el que suposa que el gas s'expandeix isotèrmicament. Finalment, un altre encara està basat en l'aplicació de l'exergia o disponibilitat ter-

modinàmica (Crowl, 2003). Tots donen valors superiors als obtinguts en el procediment basat en la suposició de procés isoentròpic. Donen, doncs, valors de l'energia excessivament elevats, que condueixen a resultats excessivament conservadors en aplicar-los a la pràctica.

Recentment ha estat proposat un altre procediment per calcular l'energia alliberada en l'explosió, basat en la suposició d'un procés d'expansió adiabàtic i irreversible (Planas-Cuchi *et al.*, 2004), condicions molt més properes a les existents en la realitat.

7. ONA DE SOBREPRESSIÓ

La sobrepressió generada per l'explosió pot estimar-se a partir de la massa equivalent de TNT. Aquest mètode implica una certa imprecisió, però és senzill i permet fer estimacions útils.

A causa del fet que l'energia alliberada ocupava inicialment un volum molt més gran que el que ocuparia la massa equivalent de TNT, cal corregir la distància des del centre de l'explosió fins al lloc on es vol estimar la sobrepressió. Aquesta correcció es fa utilitzant la distància «escalada», basada en el principi de similitud de Hopkinson. La distància escalada està relacionada amb la distància real i amb la massa equivalent de TNT mitjançant l'expressió següent:

$$d_n = \frac{d}{(\beta \cdot W_{\text{TNT}})^{1/3}}, \quad [17]$$

on d_n és la distància escalada ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$), β és la fracció de l'energia alliberada convertida en sobrepressió i d és la distància real (des del centre de l'explosió) a la qual es vol

estimar la sobrepressió (m). Del valor de d_n , és possible obtenir-ne la sobrepressió mitjançant la representació gràfica adient (Casal *et al.*, 2001).

8. FRAGMENTS

Els efectes dels fragments projectats per l'explosió són molt difícils de quantificar per la seva naturalesa aleatòria. Tenen una acció restringida i direccional o puntual, però amb un radi més gran que el corresponent als efectes tèrmics i a la sobrepressió; d'altra banda, poden originar efecte dòmino sobre altres equips.

El nombre de projectils «primaris» (és a dir, grans trossos del dipòsit) depèn del tipus de trencament i de la forma del dipòsit. En el cas de dipòsits cilíndrics, solen trencar-se en dos trossos: el fons i la resta del dipòsit. També és possible la formació de tres grans fragments: dos fons i la resta del dipòsit, o bé un fons i la resta del dipòsit que es divideix en altres dues peces seguint la línia imaginària que separaria el líquid del vapor (figura 3). Les fissures sovint segueixen les soldadures.

399

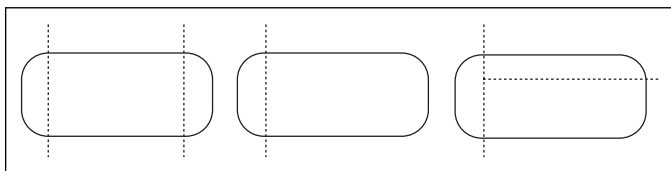


FIGURA 3. *Trencaments típics en recipients cilíndrics.*

Pel que fa a la direcció, els fragments de recipients cilíndrics tendeixen a seguir la direcció de l'eix del cilindre. La taula i la figura adjuntes mostren les dades de quinze accidents (Holden i Reeves, 1985). La màxima distància

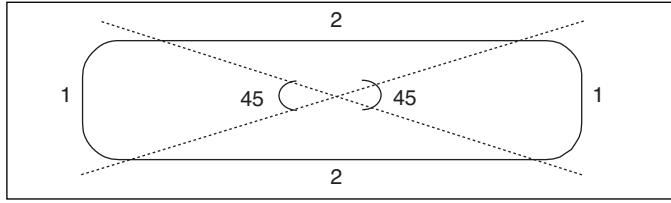


FIGURA 4. Distribució dels projectils d'un recipient cilíndric.

assolida per un d'aquests fragments ha estat de 1.100 m (accident de San Juan Ixhuatepec, 1984).

TAULA 3. Probabilitat de direcció de fragments en recipients cilíndrics

Sector	Probabilitat
1	0,62
2	0,38

400

Els fragments procedents de recipients esfèrics solen assolir distàncies menors que els de recipients cilíndrics, ja que són menys aerodinàmics. La màxima distància assolida per un d'aquests fragments ha estat de 600 m (accident de San Juan Ixhuatepec, 1984). D'altra banda, és pràcticament impossible predir cap on aniran.

9. MESURES DE PREVENCIÓ

En cas d'una emergència que pugui conduir a un accident del tipus BLEVE - bola de foc, és molt difícil improvisar accions per controlar la situació i, per tant, la mesura més recomanable és l'evacuació de la gent fins a distàncies d'aproximadament 1 km. Qualsevol acció que impliqui la presència de persones és molt perillosa, ja que és impossible predir quan

tindrà lloc l'explosió. Les mesures, que permeten reduir el risc de BLEVE a nivells tolerables, han d'haver estat adoptades, doncs, prèviament. Poden esmentar-se les següents:

- terreny en pendent (i drenatge de qualsevol fuita)
- aïllament tèrmic del dipòsit
- refrigeració amb aigua del dipòsit
- enterrament del dipòsit (mesura que té molts detractors)
 - reducció de la pressió amb vàlvules de seguretat
 - protecció d'impactes mecànics
 - control de sobreiximents
 - distàncies mínimes de separació entre equips.

10. NOMENCLATURA

<i>A</i>	constant en l'equació de Clausius-Clapeyron
<i>B</i>	constant en l'equació de Clausius-Clapeyron
<i>b</i>	constant
<i>C_p</i>	calor específica a pressió constant ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
<i>D</i>	diàmetre de la bola de foc (m)
<i>d_n</i>	distància escalada ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)
<i>E_p</i>	poder emissiu ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>E_r</i>	energia alliberada en l'expansió del vapor (kJ)
<i>F</i>	factor de vista
<i>f</i>	factor de vaporització
<i>H</i>	altura a què es troba el centre de la bola de foc (m)
<i>H_c</i>	calor de combustió ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
<i>H_v</i>	entalpia d'evaporació ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
<i>I</i>	intensitat de radiació ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>M</i>	massa de combustible (kg)
<i>m</i>	massa de vapor existent inicialment (kg)
<i>P</i>	pressió de vapor (bar)
<i>P_a</i>	pressió atmosfèrica (bar)

P_0	pressió relativa (bar)
P_c	pressió parcial de l'aigua (Pa)
T	temperatura (K)
T_c	temperatura crítica (K)
T_b	temperatura d'ebullició (K)
T_0	temperatura de la substància en el moment de l'explosió (K)
t	temps (s)
u	energia interna del vapor ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
V	volum de vapor en el recipient (m^3)
V_l	volum de líquid en el recipient just abans de l'explosió (m^3)
x	distància entre la superfície de la flama i l'objectiu (m)
W_{TNT}	massa equivalent de TNT (kg)
α	angle format per l'eix d'abscisses i la tangent a la corba de saturació en el punt crític ($^\circ$)
β	fracció de l'energia alliberada convertida en sobrepressió
γ	relació de calors específiques
η	coeficient de radiació
ρ_l	densitat del líquid ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ρ_v	densitat del vapor ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
τ	transmissivitat atmosfèrica

BIBLIOGRAFIA

- BAGSTER, D. F.; PITBLADO, R. M. (1989). «Thermal hazards in the process industry». *Chem. Eng. Prog.*, p. 69-75.
- BAUM, M. R. «Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: The velocity of end-cap and rocket missiles». *J. Loss Prev. Process Ind.*, núm. 12, p. 137-145, 1999.
- BESTRATÉN, M.; TURMO, E. (1991). *Explosiones BLEVE (I): Evaluación de la radiación térmica*. Barcelona: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. [Nota técnica de prevención NTP-293]

- (1991). *Explosiones BLEVE (II): Medidas preventivas*. Barcelona: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. [Nota técnica de prevención NTP-294]
- BIRK, A. M. (1996). «Hazards from Propane BLEVEs: An Update and Proposal for Emergency Responders». *J. Loss Prev. Process Ind.*, núm. 9, p. 173-181.
- CASAL, J.; ARNALDOS, J.; MONTIEL, H.; PLANAS-CUCHI, E.; VÍLCHEZ, J. A. (2001). «Modelling and understanding BLEVE». A: FINGAS, M. [ed.]. *The handbook of hazardous materials spills technology*, p. 22.1-22.27. Nova York: McGrawHill.
- CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J. A. (2001). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Mèxic: Alfaomega.
- CROWL, D. A. (2003). *Understanding explosions*. Nova York: CCPS.
- HOLDEN, P. L.; REEVES, A. B. (1985). «Fragment hazards from failures of pressurized liquefied gas vessels». *Chem. Eng. Symp. Ser.*, núm. 93, p. 205-217.
- PLANAS-CUCHI, E.; SALLA, J. M.; CASAL, J. (2004). «Calculating overpressure from BLEVE explosions». *J. Loss Prev. Process Ind.*
- PRUGH, R. W. «Quantify BLEVE hazards». *Chem. Eng. Progr.* (febrer 1991), p. 66-72.
- REID, R. C. (1979). «Possible Mechanism for Pressurized-Liquid Tank Explosions or BLEVEs», *Science*, núm. 203, p. 1263-1265.
- ROBERTS, A. F. (1982). *J. Fire Safety Studies*, núm. 4, p. 197-201.
- SATYANARAYANA, K.; BORAH, M.; RAO, P. G. (1991). «Prediction of thermal hazards from fireballs», *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 4, p. 344-347.
- VÍLCHEZ, J. A.; PLANAS-CUCHI, E.; CASAL, J. (1993). «Safety measures in LPG storage design», *Proceedings of the 6th Mediterranean Congress on Chemical Engineering*, vol. 1, p. 353-354. Barcelona: Fira Barcelona.



IECentanys19072007

ISBN: 978-84-7283-917-5



9 788472 839175