

La teledetecció a l'Institut Nacional de Meteorología

Situació actual

Marcelino Manso Rejón

Cap del Servei de Teledetecció

Instituto Nacional de Meteorología
(INM)

La necessitat d'observacions atmosfèriques

Les activitats dels serveis meteorològics tenen com a objectius fonamentals, que justifiquen la seva raó de ser:

- a) La protecció de la vida i els béns.
- b) La protecció del medi ambient.
- c) L'eficax planificació de les activitats sensibles a l'estat de l'atmosfera.

A fi de realitzar de manera efectiva aquestes funcions cal, en primer lloc i com a condició indispensable, que els serveis meteorològics rebin i/o generin dades d'observació que permetin conèixer amb la més gran exactitud possible l'estat de l'atmosfera en un instant determinat; aquestes observacions són les dades de partida per a:

- La confecció de les anàlisis de les diferents variables meteorològiques i la predicció de la seva evolució mitjançant els models de predicció numèrica del temps.
- La diagnosi de l'estat de l'atmosfera i la predicció de la seva evolució a molt curt termini fent servir models conceptuals i tècniques d'extrapolació.
- La confecció dels estudis estadístics i climatològics que permetin la interacció intel·ligent entre les activitats humanes i el medi ambient, tot afavorint una eficaç explotació i conservació d'aquest.

Naturalitat del problema

Els diferents processos que tenen lloc en el si de l'atmosfera involucren un ampli espectre d'escala espai-temporal; per exemple, milers de quilòmetres i alguns dies en el cas de les ones baroclíniques, o pocs quilòmetres i de l'ordre d'una hora en el cas de les tempestes. Associada a tot això hi ha una estreta relació entre el tipus de fenomen atmosfèric que es vol monitoritzar perquè es pretén pronosticar la seva evolució i les característiques (resolució

espacial i temporal, i cobertura geogràfica) de les dades d'observació convenients per tal d'abordar amb certa garantia d'èxit aquestes tasques.

L'estudi de l'atmosfera és una activitat global, tant en el vessant de la meteorologia com en el del clima, i, per tant, per a la seva comprensió, i per al pronòstic de l'evolució d'aquest complicat sistema que és l'atmosfera, calen dades globals fins i tot en el cas que ens interessi només una zona geogràfica concreta, limitada, per exemple, a un estat. Així, per exemple, a fi de poder efectuar prediccions meteorològiques a mig termini (3 a 10 dies) cal alimentar els models de predicció numèrica del temps amb dades d'observació que donin raó de l'estat de l'atmosfera en tota la seva globalitat; aquesta necessitat d'una observació global és encara més evident si volem abordar l'estudi del sistema climàtic global, la monitorització del qual és un requisit indispensable per a avaluar i pronosticar el seu possible canvi a fi de poder prendre en temps i forma decisions tendents a minimitzar els seus possibles efectes negatius (escalfament global, pujada del nivell del mar, canvis en els règims de precipitació, etc.).

El problema dels fenòmens meteorològics de tipus accelerat, cicle de vida relativament curt i escala espacial reduïda —entre desenes i centenars de quilòmetres (cas en què es troben els sistemes convectius de mesoescala responsables de les pluges torrencials de tardor a les regions costaneres mediterrànies i les galernes típiques del Cantàbric)— no es pot abordar si no es disposa de sistemes d'observació que proporcionin dades molt freqüents tant en l'escala temporal com en l'espacial, que possibilitin la detecció de la seva gènesi i puguin emprar-se per a la predicció, en aquest cas a molt curt termini, de la seva evolució i el seu desplaçament.

La ingent tasca d'observació i presa de dades necessària perquè un servei meteorològic compleixi les funcions que té encomanades no pot:

- ni ser abordada per cap estat en solitari,
- ni estar basada exclusivament en tècniques de mesura *in situ*.

El primer fet ha estat el motiu principal de la importància que des dels inicis de la meteorologia operativa té la cooperació internacional, la qual ateny el més gran exponent en el programa fonamental de l'Organització Meteorològica Mundial: el Programa de la vigilància meteorològica, i en el seu element clau: el Sistema mundial d'observació meteorològica. Aquest programa de cooperació funciona en tres àmbits: mundial, regional i nacional.

El paper de la teledetecció

Les mesures dels paràmetres meteorològics com la temperatura, la humitat, el vent, etc., s'obtenen normalment col·locant l'instrument o equip d'observació al lloc on els volem mesurar. Aquests sensors estan situats dins de garites meteorològiques, en el cas d'observacions en superfície, o són transportats en un avió o en un globus-radiosonda, si el que volem és observar l'estructura vertical de l'atmosfera. Aquesta mena de mesuraments s'anomenen *in situ*.

No és viable, però, tenir desplegada una xarxa de punts d'observació amb instrumentació d'aquest tipus per tal d'assolir els requeriments de resolució espacial i temporal i cobertura geogràfica indispensable si es volen satisfer les necessitats d'observació que planteja la meteorologia. (Cal pensar que les tres quartes parts del planeta corresponen als oceans i les mars, i que la major part de les terres emergides són despoblades, i també en la formidable despesa que suposaria posar en marxa i mantenir de forma operativa un sistema d'observació basat en mesures *in situ*). Per consegüent, ha calgut potenciar l'ús de les tècniques de teledetecció o mesura a distància.

El concepte de teledetecció es basa en la idea d'un dispositiu que un cop situat en un lloc determinat és capaç de proporcionar una descripció de les propietats físiques que caracteritzen un segon lloc. La teledetecció es basa en instrumentació que pot mesurar els resultats de la interacció de les ones, fonamentalment les electromagnètiques, amb un volum o regió de l'atmosfera, i en les tècniques que permeten inferir d'aquestes mesures les variables físiques que caracteritzen l'estat de la regió en qüestió. Si les ones són generades pel mateix sistema de teledetecció, aquest s'anomena actiu; si les ones són generades per l'atmosfera o qualsevol altra font natu-

ral, per exemple, el Sol, el sistema s'anomena passiu.

La instrumentació típica són els radiòmetres, els espectròmetres i els sistemes radar, uns equips ben coneguts a la primera meitat d'aquest segle. No obstant, ha estat durant el darrer quart d'aquest segle quan l'extraordinari poder de la teledetecció s'ha desenvolupat d'una manera impressionant, com a conseqüència de dos fets fonamentals:

- el desenvolupament de la tecnologia aeroespacial i de la capacitat de posar en òrbita satèl·lits artificials, i
- l'extraordinari progrés que han experimentat les tecnologies de la informàtica i les comunicacions.

Els satèl·lits han proporcionat als equips de teledetecció una plataforma privilegiada per a l'observació de l'atmosfera i del medi ambient a escala planetària; les modernes tecnologies de la informació han proporcionat la capacitat per a processar i transmetre l'impressionant volum de dades recollides.

La resposta de l'Institut Nacional de Meteorologia

Conscient de la importància de la teledetecció per al compliment de les seves tasques, l'Institut Nacional de Meteorologia va incloure com elements clau del seu Pla d'innovació tecnològica, iniciat el 1983, el desplegament i la posada en operació de:

- Un avançat sistema de recepció i processament de la informació procedent de satèl·lits meteorològics.
- Una xarxa de radars meteorològics amb capacitat doppler i cobertura nacional completa.
- Una xarxa de detecció de llamps.

A més, es van fer les gestions necessàries perquè Espanya s'integrés com a membre en l'Organització Europea per a l'Explotació de Satèl·lits Meteorològics (EUMETSAT) des del començament de les seves activitats, l'any 1986.

Els satèl·lits meteorològics

Els satèl·lits meteorològics són el subsistema espacial del sistema mundial d'observació, i el seu objectiu fonamental és completar la informació facilitada pel subsistema de superfície d'una forma econòmica viable.

Els satèl·lits meteorològics actuals es classifiquen en dos grups, segons les característiques de la seva òrbita: els polars i els geoestacionaris.

Els satèl·lits polars orbiten a una altitud del voltant dels 850 km passant prop dels pols (pla de l'òrbita aproximadament perpendicular al pla equatorial). Triguen

de l'ordre de cent minuts a descriure una òrbita completa i, a causa de la rotació de la Terra, cada òrbita travessa l'equador uns vint-i-cinc graus de longitud més cap a l'oest que l'anterior. Els satèl·lits d'aquest tipus poden observar la totalitat de la Terra cada dotze hores; proporcionen, doncs, una cobertura global i, a més, relativament detallada.

Els satèl·lits geoestacionaris estan localitzats a una altitud de 36 000 km i la seva òrbita està continguda en el pla equatorial. El seu període orbital coincideix amb el de rotació de la Terra, de forma que romanen pràcticament immòbils respecte d'aquesta: des del satèl·lit es veu sempre la mateixa zona terrestre. Un satèl·lit geoestacionari pot veure una zona circular que representa més d'una quarta part de la superfície terrestre, de manera que amb els cinc satèl·lits geoestacionaris nominals es té una cobertura gairebé global; l'excepció són les regions polars. Aquests satèl·lits proporcionen informació molt freqüent de la zona de cobertura i són, per tant, essencials per a les prediccions a molt curt termini.

Els dos tipus de satèl·lits meteorològics són en gran mesura complementaris. Els satèl·lits meteorològics geoestacionaris proporcionen mesures i una vigilància pràcticament contínua a les zones tropicals i temperades; i, d'altra banda, els satèl·lits meteorològics polars proporcionen cobertura global amb més gran detall i precisió, si bé amb una menor resolució temporal.

El sistema teòric de satèl·lits meteorològics és format per:

- Tres satèl·lits d'òrbita polar:
 - Dos de la sèrie TIROS-NOAA proporcionats pels Estats Units d'Amèrica.
 - Un de la sèrie Meteor proporcionat per l'antiga URSS.
- Cinc satèl·lits d'òrbita geoestacionària:
 - Un Meteosat proporcionat per EUMETSAT i posicionat a 0° de longitud.
 - Dos GOES proporcionats pels Estats Units d'Amèrica i posicionats a 75°W i a 135°W.
 - Un GMS proporcionat per Japó i posicionat a 140°E.
 - Un GOMS proporcionat per la Comunitat d'Estats Independents i posicionat a 75°E.

Aquest sistema nominal es veu modificat per diversos motius. Així, per exemple, durant el període de transició entre la sèrie de satèl·lits GOES i els recentíssims GOES-Next només fou operatiu un satèl·lit GOES, el darrer de la sèrie antiga. La consegüent manca d'observacions des de satèl·lit a la costa atlàntica d'Amèrica que això ocasionà es va poder evitar mitjançant un acord entre EUMETSAT i els Estats Units d'Amèrica per a desplaçar un satèl·lit Meteosat de reserva, primer fins a la posició 50°W i posteriorment a 75°W. El primer GOMS, anomenat Elektro-1, es va llançar al final de l'octubre del 1994. Fins ara les observacions en la seva zona teòrica de cobertura les ha fet un satèl·lit mixt de comunicacions i de meteorologia, l'INSAT de l'Índia. A la figura 1 es mostra la configuració nominal actual del Sistema de satèl·lits meteorològics.

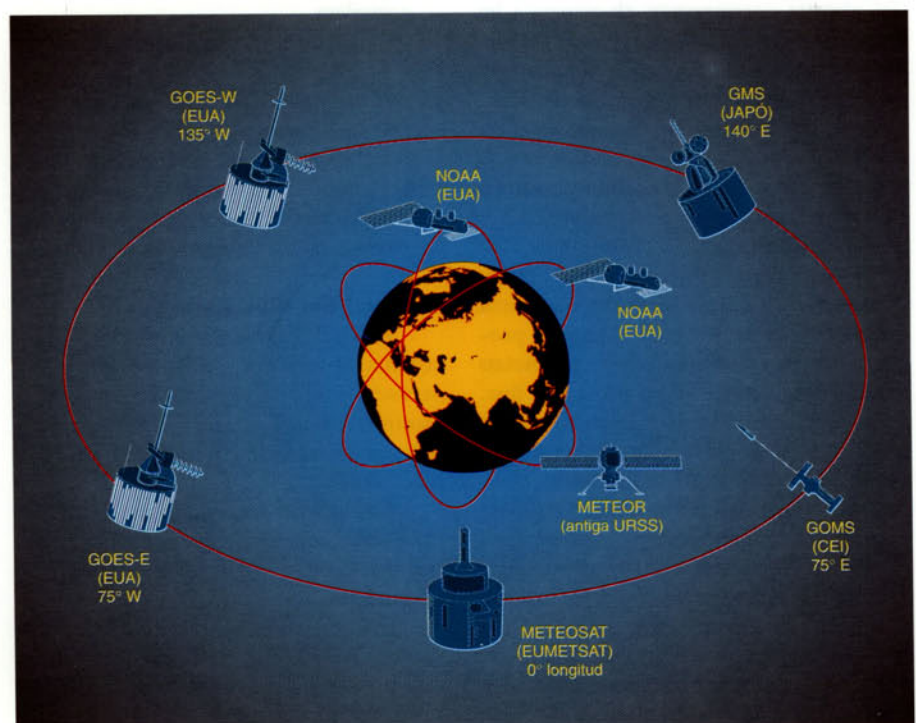


Figura 1: Configuració nominal actual del Sistema de satèl·lits meteorològics

Dos programes de satèl·lits meteorològics d'importància rellevant per a l'Institut Nacional de Meteorologia

A causa de la importància que tenen per a la meteorologia a Espanya, es descriuen a continuació els programes Meteosat i TIROS-N.

Programa Meteosat

El Programa Meteosat començà com un projecte de participació facultativa de l'Agència Espacial Europea; el primer satèl·lit es va llançar al final del 1977 i fou un element essencial que contribuï a l'èxit del primer experiment meteorològic mundial, un dels experiments científics internacionals de més envergadura de la història, dut a terme durant els anys 1978 i 1979. Un cop demostrada la utilitat del programa i creada una comunitat de socis interessats en la seva continuïtat, el satèl·lit passà a ser responsabilitat de l'organisme EUMETSAT a partir del 1986.

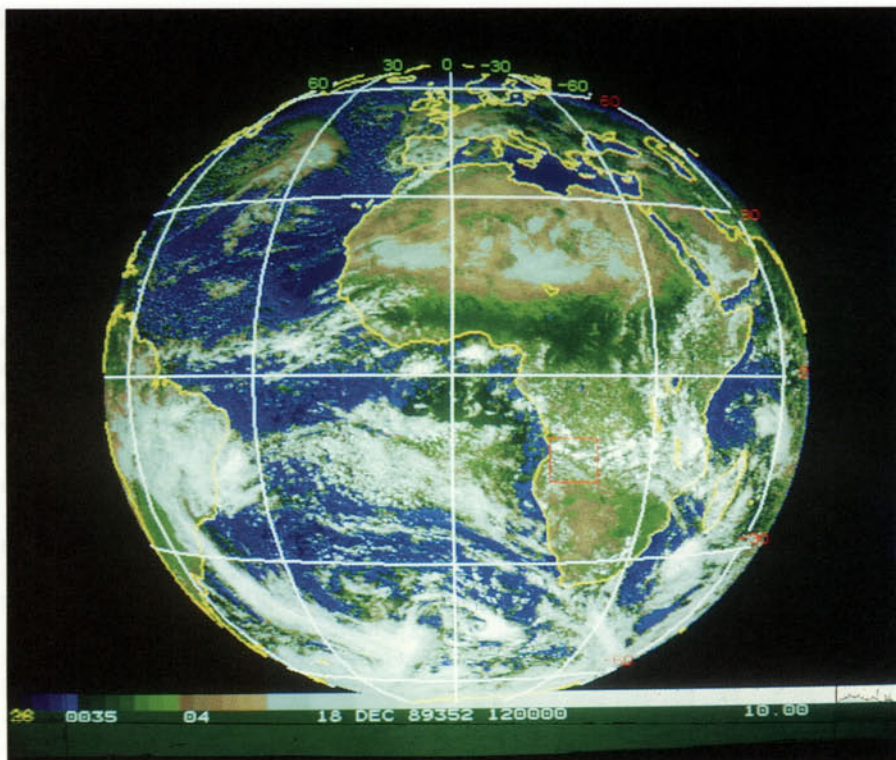
La principal missió de Meteosat és la presa d'imatges a tres bandes o canals de l'espectre electromagnètic. L'instrument encarregat d'aquesta missió és un radiòmetre d'explotació per escombratge gírtori típic dels satèl·lits meteorològics geoestacionaris estabilitzats per rotació, com és el cas de Meteosat.

Cada trenta minuts el radiòmetre proporciona informació renovada sobre la porció del globus terrestre accessible des de la posició del satèl·lit, un disc de 65° centrat en el punt on l'equador talla el meridià 0°, en dues bandes infraroges i una de visible de l'espectre electromagnètic. La imatge 1, que mostra una imatge Meteosat en el canal visible, dóna una idea de la cobertura proporcionada per aquest satèl·lit.

Aquesta informació es transmesa a terra, on és processada al Centre d'Operacions de Meteosat a Darmstadt (Alemanya) i difosa als usuaris, d'acord amb uns horaris i formats preestablerts, a través del mateix satèl·lit per mitjà de dues emissions: l'emissió digital (adequada per a una utilització quantitativa de la informació), per a la qual en l'actualitat hi ha un centenar d'estacions d'usuari, i l'emissió analògica (adequada únicament per a una utilització qualitativa), per a més de mil estacions d'usuari.

L'Institut Nacional de Meteorologia disposa i opera en l'actualitat:

- Una estació de recepció principal a la seu central a la qual hi ha associat un potent sistema informàtic de procés de les imatges que té connexions amb els deu centres regionals amb responsabilitats de predicció.
- Més de vuitanta estacions de recepció secundàries, la major part instal·lades a les principals oficines meteorològiques (fonamentalment aeroports i bases aèries),



mentre que les restants operen com a reserva autònoma geogràficament distribuïda del sistema principal de recepció i procés.

Les imatges són usades directament pels serveis meteorològics per a la confecció de les anàlisis meteorològiques clàssiques i per a la vigilància meteorològica i predicció a molt curt termini; aprofitant el gran avançatge de disposar d'informació actualitzada cada trenta minuts és possible realment vigilar l'evolució de l'atmosfera i de les formacions nuvoloses.

Però, a més, aquestes imatges són objecte de posterior procés a fi d'obtenir productes que proporcionin informació quantitativa. Entre aquests productes derivats tenen gran importància, per a la seva utilitat per a la confecció de l'anàlisi de partida en els models de predicció numèrica del temps, els vectors vent calculats a partir del desplaçament dels elements nuvolosos en imatges successives.

També cal esmentar la contribució de Meteosat a dos projectes internacionals la importància dels quals s'ha revalorat com a conseqüència de l'interès que provoca el possible canvi climàtic global: el projecte internacional de climatologia de la nuvolositat i el projecte de climatologia global de la precipitació, per als quals Meteosat proporciona les dades en la seva àrea de cobertura.

Programa TIROS-N

Aquest programa dels Estats Units d'Amèrica d'observació de l'atmosfera i el medi ambient des d'òrbita polar és l'actual successor del programa TIROS iniciat el

Imatge 1: Imatge Meteosat en el canal visible del 18 de desembre del 1989 a les 12.00 UTC (imatge rebuda i processada a l'INM)

1960. Consta de dos satèl·lits que orbiten al voltant de la Terra a una altitud d'uns 850 km amb plans orbitals aproximadament perpendiculars a l'equador i perpendiculars entre ells, de manera que cada sis hores un d'aquests satèl·lits repeteix l'observació en una regió determinada.

El desavantatge de l'escassa resolució temporal de la informació que ofereixen aquests satèl·lits, dotze hores per a cada satèl·lit contra els trenta minuts típics d'un satèl·lit geoestacionari, és compensat per una sèrie d'avantatges, com:

- a) Proporcionar una cobertura geogràfica global. En efecte, qualsevol punt del globus terrestre és observat dos cops al dia per cada satèl·lit d'aquest tipus, incloent-hi les regions polars, que cap satèl·lit geoestacionari no pot cobrir.
- b) Generar informació de més qualitat radiomètrica i resolució geomètrica i espectral. Com a conseqüència d'orbitar relativament a prop de la superfície terrestre, 850 km contra els 36 000 km d'un satèl·lit geoestacionari, l'energia electromagnètica emesa i reflectida per la Terra arriba als radiòmetres embarcats amb més intensitat, i el soroll dels equips té una menor importància relativa.

Els satèl·lits TIROS-N estan estabilitzats mitjançant un sistema que hi controla la direcció dels tres eixos principals, i els radiòmetres que porten embarcats recullen informació de la Terra de manera permanent. Aquesta informació és transmesa en temps real per als usuaris locals dins del camp de visió del satèl·lit en dos tipus d'emissions: l'emissió digital HRPT i l'emissió analògica APT; i, a més, també és emmagatzemada a bord per tal de transmetre-la quan el satèl·lit estigui dintre del camp de visió de les estacions principals.

L'Institut Nacional de Meteorologia disposa en l'actualitat per a operar d'una estació de recepció de l'emissió digital HRPT a la seu central, i de més de quaranta estacions secundàries per a la recepció de l'emissió analògica APT, amb la mateixa estratègia que l'apuntada en comentar les estacions del sistema Meteosat.

Des del punt de vista de l'observació, el satèl·lit té dues missions: la de presa d'imatges en tres bandes infraroges i dues de visibles de l'espectre electromagnètic, duta a terme pel radiòmetre AVHRR, i la d'obtenció de mesures de temperatura i humitat a capes atmosfèriques a distinta altitud, missió de sondatge atmosfèric que realitza el conjunt de tres instruments agrupats sota l'acrònim TOVS.

És realment important la missió de sondatge, per mitjà de la qual és possible obtenir informació de la distribució vertical de temperatura i humitat de l'atmos-

fera amb una resolució espacial en l'horitzontal al voltant de 100 km (segons les condicions de nuvolositat) i una resolució temporal de sis hores (quan operen els dos satèl·lits). La qualitat dels perfils de temperatura i humitat obtinguts mitjançant el processat de les dades TOVS no és tan bona com l'obtinguda per mitjà de sistemes d'observació *in situ*, radiosondatges amb globus. Seria econòmicament inviable, però, mantenir un sistema d'observació basat en radiosondatges amb la cobertura i la resolució proporcionades pel sistema TOVS, sobretot si es té en compte que els oceans cobreixen les tres quartes parts del planeta i que gran part de les superfícies emergides són desertes. Com a conseqüència de les primeres proves de sondatges per satèl·lit, a mitjan la dècada dels 70, els Estats Units d'Amèrica prengueren la decisió, sense cap dubte històrica, de començar a retirar de l'Atlàntic tots els seus vaixells d'observació meteorològica.

Sistema principal de recepció i aprofitament de dades de satèl·lits meteorològics de l'Institut Nacional de Meteorologia

L'Institut Nacional de Meteorologia opera un potent sistema de recepció i processament de la informació digital proporcionada pels satèl·lits meteorològics. El sistema consta de:

- Els sistemes d'antenes i cadenes d'electrònica per a la recepció de les emissions digitals en alta resolució Meteosat PDUS i TIROS-N HRPT; pròximament es modificarà el sistema de recepció que va operar amb l'anterior generació de satèl·lits geoestacionaris GOES dels Estats Units d'Amèrica a fi de possibilitar la recepció de les emissions digitals dels novíssims GOES-Next.
- El sistema informàtic per a l'emmagatzematge, procés i explotació operativa de les dades procedents dels satèl·lits en combinació amb tota mena d'informació meteorològica. Entre la informació continguda en aquesta extensa base de dades meteorològiques contínuament actualitzada hi ha: els resultats dels models de predicció numèrica del temps, informes d'observació d'estacions convencionals i automàtiques, informació radar, informació de la xarxa de detecció de llamps, informació de l'onatge i estat de la mar procedent del satèl·lit ERS-1, etc.
- Les estacions de treball que, en nombre de vint-i-cinc, estan distribuïdes a les diverses dependències de la seu central de l'INM i dels centres meteorològics regionals.

A la foto 1 es mostren diversos components del sistema: antena Meteosat, cadenes de recepció de dades de satèl·lit i una estació de treball.

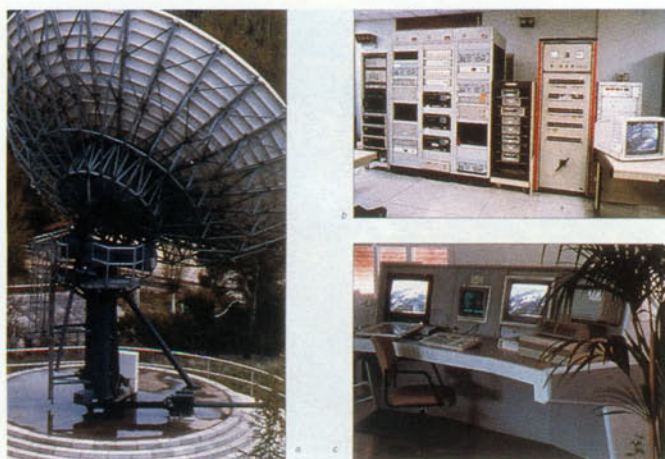


Foto 1: Diversos components del sistema d'adquisició i aprofitament d'informació de satèl·lits de l'INM: antena Meteosat, cadenes de recepció i estació interactiva de treball

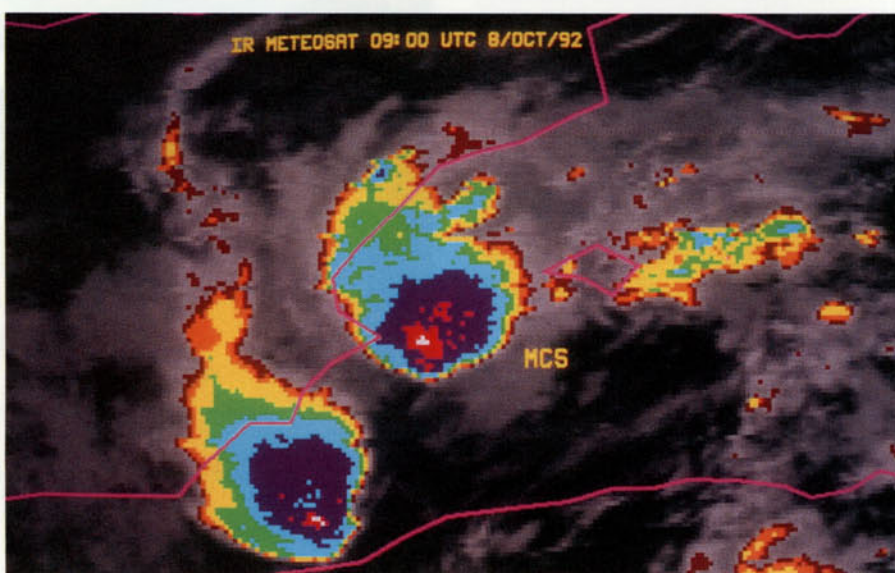
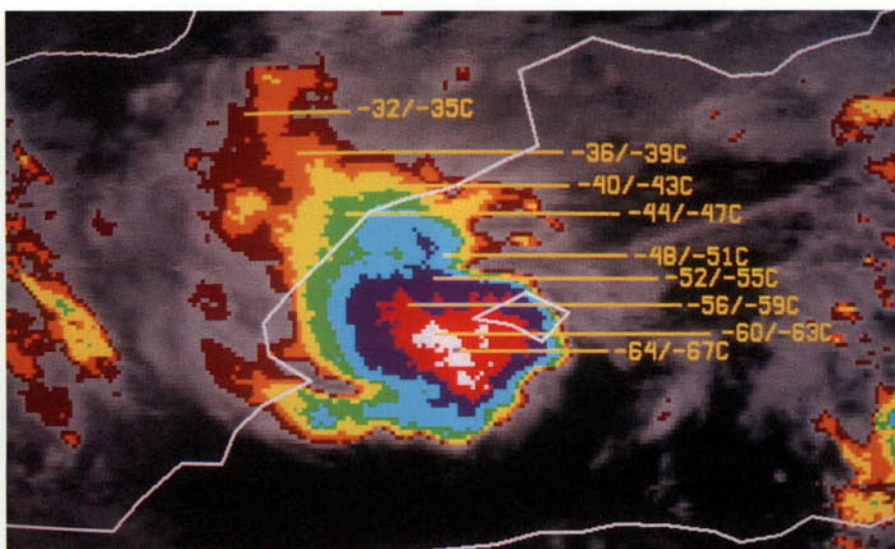
Imatge 2: Sistema convectiu. Imatge Meteosat, canal infraroig tèrmic, centrada al llevant espanyol. El realç en fals color que li ha estat aplicat mostra les diferents temperatures als cims del núvols, fins a -67° en algunes zones del sistema (imatge rebuda i processada a l'INM)

Les imatges rebudes són emprades en temps real pels meteoròlegs de l'INM com a suport bàsic de les tasques de predicció i vigilància del temps. Així, les imatges són presentades a les pantalles de les estacions de treball en forma d'animació i fent servir diferents realços que fan més evidents determinades característiques dels sistemes nuvolosos.

A la imatge 2 es mostra una imatge Meteosat en el canal infraroig tèrmic centrada sobre les Balears a la qual ha estat aplicat un realç en fals color que indica les diferents temperatures dels cims del sistema nuvolós. A la imatge 3 es mostra, realçada, l'estructura externa de dos sistemes convectius de mesoescala a la Mediterrània.

El procés de la informació de satèl·lit que es realitza habitualment de forma operativa a l'INM inclou la generació d'una extensa relació de productes derivats útils tant per a les tasques de predicció i vigilància del temps com per a l'estudi del sistema climàtic. A continuació se'n relacionen alguns:

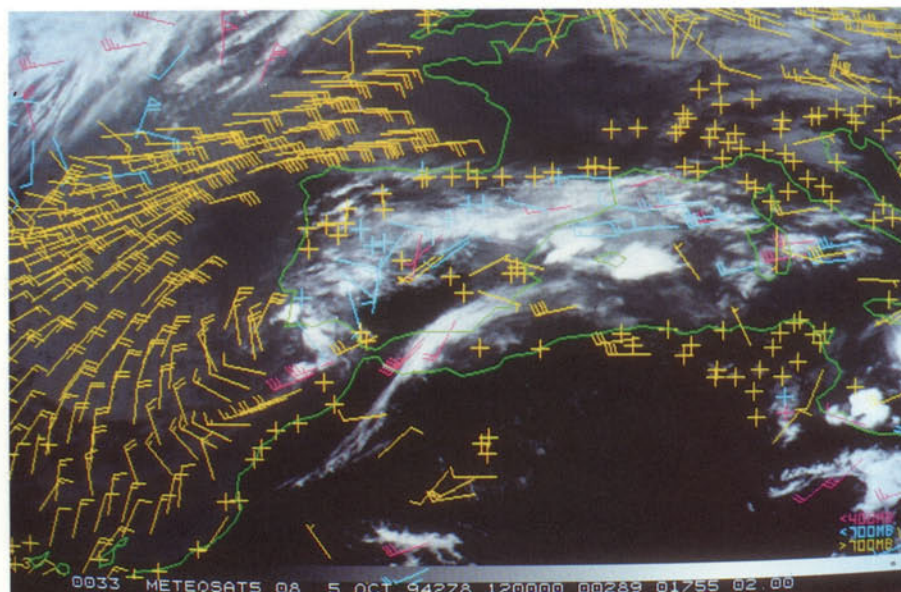
- Obtenció de vectors vent a partir del desplaçament observat en les estructures nuvoloses d'imatges Meteosat consecutives. A la imatge 4 es mostren els vectors vent calculats d'aquesta manera per al dia 5 d'octubre del 1994 a les 12.00 UTC (temps universal coordinat); en groc es presenten els vents corresponents a nivells baixos, en blau a nivells mitjans, i en magenta a nivells alts.
- Estimació de la intensitat i probabilitat de precipitació a partir de parelles de canals visible i infraroig de Meteosat. A la imatge 5 es mostra la probabilitat de precipitació segons nivells, calculada d'aquesta manera per al dia 2 de desembre del 1994 a les 11.20 UTC.
- Càlcul d'índexs de vegetació a partir de la parella de canals VIS1 i VIS2 del radiòmetre AVHRR del satèl·lit TIROS-N. A la imatge 6 es mostra aquest producte per al dia 23 de març del 1995; la



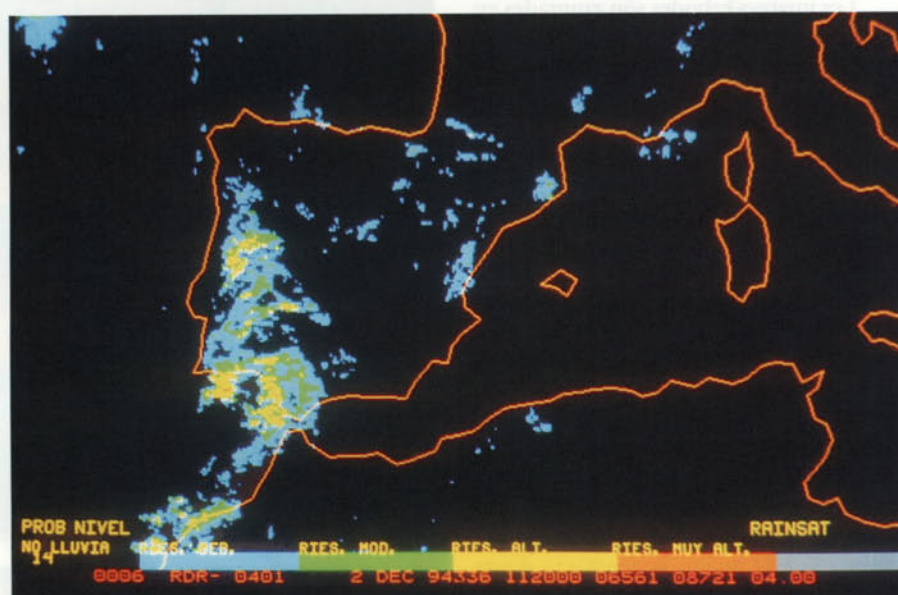
gamma de colors indica el grau més gran o més petit d'absorció de la radiació fotosintèticament activa (nul per als tons vermells i màxim per als verds i blaus; la zona fosca dels Pirineus indica la presència de neu o nuvolositat).

Imatge 3: Sistemes convectius. Imatge Meteosat, canal infraroig tèrmic, centrada al llevant espanyol. El realç en fals color que li ha estat aplicat mostra l'estructura superior externa dels dos sistemes convectius (imatge rebuda i processada a l'INM)

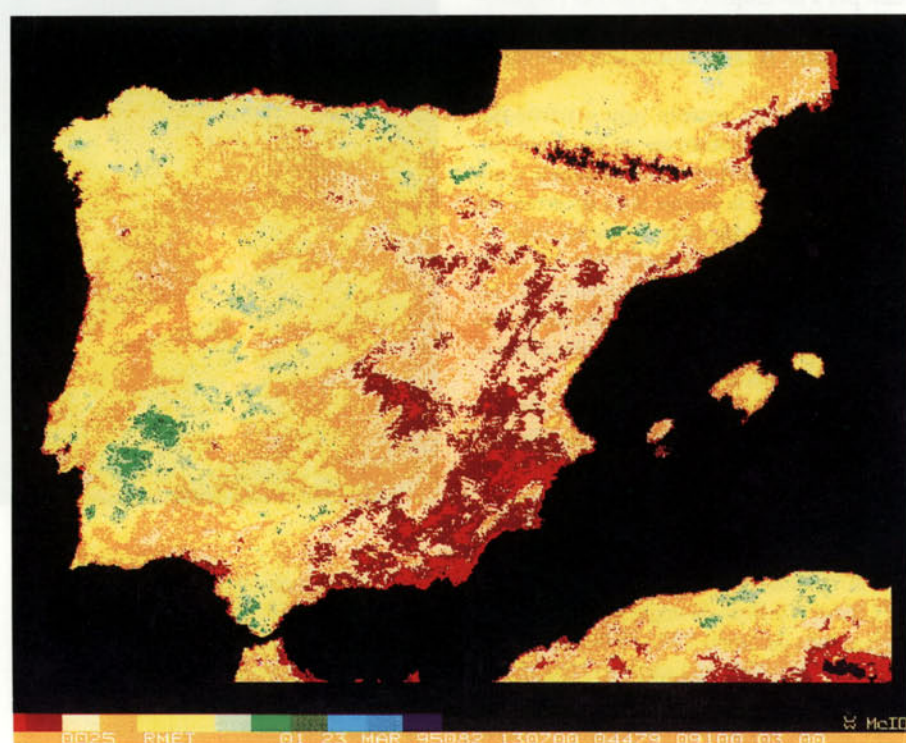
Imatge 4: S'hi mostren, superposats a una imatge Meteosat en el canal infraroig tèrmic, els vectors vent calculats a partir d'imatges successives Meteosat per al dia 5 d'octubre del 1994 a les 12.00 UTC; explicació al text (imatges rebudes i processades a l'INM)



Imatge 5: Probabilitat de precipitació segons nivells, calculada a partir de les imatges en els canals visible i infraroig tèrmic de Meteosat; explicació al text (imatges rebudes i processades a l'INM)



Imatge 6: Índex de vegetació per al dia 23 de març del 1995; explicació al text (imatges rebudes i processades a l'INM)



- Obtenció de perfils de temperatura i humitat i estimació del contingut total d'ozó a partir de les dades del sistema TOVS dels satèl·lits TIROS-N. La figura 2 presenta un mapa amb la distribució del contingut total d'ozó a la columna atmosfèrica obtingut d'aquesta manera per al dia 1 de juliol del 1994; les xifres representen unitats dobson.

Radars meteorològics

Si els satèl·lits meteorològics permeten cobrir de forma pràcticament contínua grans extensions atmosfèriques i proporcionen informació sobre la zona superior i l'estructura externa de les formacions nuvoloses, els radars són el complement adequat i eficaç per la seva capacitat de proporcionar informació sobre l'estructura interna i la distribució de la precipitació a l'interior dels núvols.

Les observacions efectuades pel radar són essencials per a la detecció, seguiment i predicció del moviment i l'evolució de fenòmens meteorològics de caràcter violent, fonamentalment els relacionats amb les tempestes. A més, les actuals tècniques de procés permeten l'obtenció de valors quantitatius d'elements específics de gran interès, com la pluja o el vent.

El radar com a sistema actiu de teledetecció

La forma en què un radar de vigilància meteorològica permet escodrinyar l'interior dels sistemes nuvolosos i localitzar les regions en què comença la formació de la precipitació, així com l'increment o disminució de la seva intensitat i els desplaçaments d'aquesta (tant en la vertical com en l'horitzontal), és la següent:

- L'equip genera freqüències (de l'ordre de dos-cents cada segon), impulsos curts (de l'ordre del microsegon de durada) d'energia en el rang de les radiofreqüències de l'espectre electromagnètic (longituds d'ona centimètriques).
- Aquesta energia es concentra en un feix molt estret per una antena que enfoca successivament diverses radials (mitjançant un sistema de rotació continu) i a diverses elevacions (mitjançant un sistema d'elevació per salts cada cop que es completa un gir en azimut); d'aquesta manera el radar fa una exploració volumètrica completa de tots els seus voltants, i obté informació tant en l'horitzontal com en la vertical.
- L'energia radiada interacciona amb el medi, els núvols i la precipitació (blancs), i és retrodispersada de nou cap a l'antena (eco); l'energia retornada depèn del tipus i les dimensions dels elements que componen el núvol. És menyspreable per a les gotetes típiques de núvol, radi de l'ordre de 10 micres, però ja és impor-

tant per a les gotes o elements de precipitació, radi típic d'una gota de pluja d'1 mil·límetre.

- De la posició en azimut i elevació de l'antena i del temps de retard des que s'emet el pols fins que es rep d'eco, l'equip radar dedueix la localització en l'espai dels blancs, i segons la intensitat de l'eco retornat fa una estimació de la quantitat de precipitació existent.

La xarxa de radars de l'Institut Nacional de Meteorologia

La xarxa de radars meteorològics de l'INM la formen quinze sistemes radar distribuïts per la geografia espanyola de manera que proporcionin una cobertura nacional completa.

A la figura 3 es mostra la cobertura radar final de la xarxa. Encara no han entrat en operació, per trobar-se en diverses fases d'instal·lació, els radars corresponents a Màlaga, Almeria i Balears.

Cada sistema de radar consta de:

- L'equip radar pròpiament dit, instal·lat a camp obert en un emplaçament elevat pel que fa als seus voltants a fi que la seva cobertura espacial no es vegi molt reduïda per apantallaments a causa de la nostra complexa orografia. A la foto 2 es mostra un emplaçament radar típic, el corresponent al radar meteorològic d'Extremadura instal·lat a Sierra de Fuentes (Càceres).
- El sistema de control i procés de la informació radar. Es basa en un ordinador instal·lat a la seu del centre meteorològic regional més proper a l'equip radar.

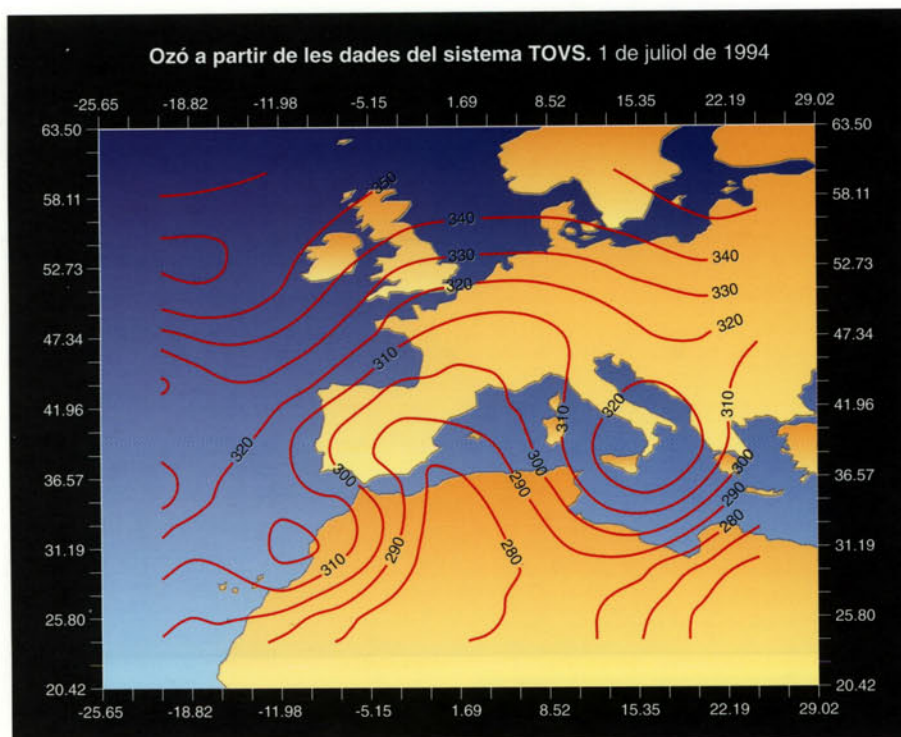


Figura 2: Distribució del contingut total d'ozó a la columna atmosfèrica obtinguda a partir de dades TOVS, dia 1 de juliol del 1994; explicació al text (informació rebuda i processada a l'INM)

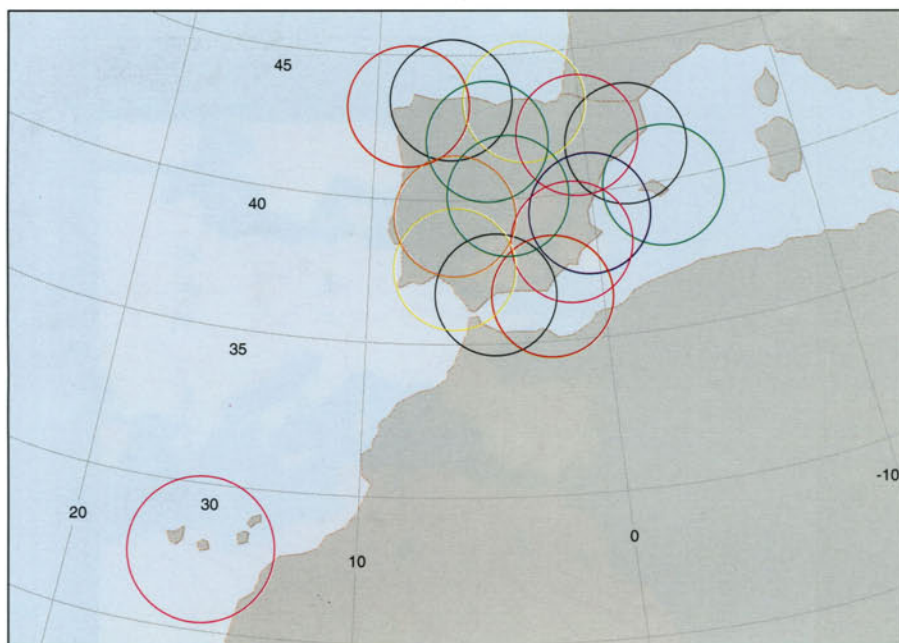


Figura 3: Cobertura teòrica de la xarxa de radars de l'Instituto Nacional de Meteorología

- Un sistema de radioenllaç que comunica l'ordinador de control i procés amb l'equip radar.

La xarxa de radars de l'INM té tres característiques que la fan de les més avançades a nivell mundial; són les següents:

- Els equips dotats de capacitat doppler; això permet mesurar, a més de la intensitat dels ecos, la seva velocitat de desplaçament i turbulència. D'altra banda, aquesta capacitat permet la discriminació automàtica dels ecos fixos, que són generalment no meteorològics.
- L'elevat grau d'automatisme i la capacitat de control sobre l'equip radar que opera en un emplaçament geogràficament remot.
- La generació de mosaics nacionals amb la informació radar i productes derivats generats per cadascun dels diversos sistemes radar.

El treball en xarxa i la generació de mosaics nacionals són fonamentals per a les tasques operatives pròpies de l'INM. Així, es pot tenir informació redundant

dels sistemes precipitants que són observats de forma simultània per diversos radars, i es disposa d'informació d'aquests sistemes abans que penetrin a la zona de cobertura del radar local.

Operació del radar

Cada sistema radar treballa de forma automàtica segons un esquema prefixat que es pot definir i variar de manera relativament flexible. En l'actualitat l'esquema d'operació és definit per cicles de deu minuts, i a cada un d'aquests cicles es fan dues exploracions distintes i, en certa manera, complementàries:

- Una exploració en mode “només amplitud”, en la qual el radar fa servir vint elevacions diferents, des de 0 fins a 25 graus, i dona informació amb un abast a la radial de fins a 240 km.
- Una exploració en mode doppler, en la qual s'obté, a més de la informació de l'amplitud o intensitat dels ecos, informació sobre la seva velocitat de desplaçament i sobre la turbulència. En aquest cas l'abast de la radial es redueix a 120 km.

Productes generats per la xarxa de radars de l'INM

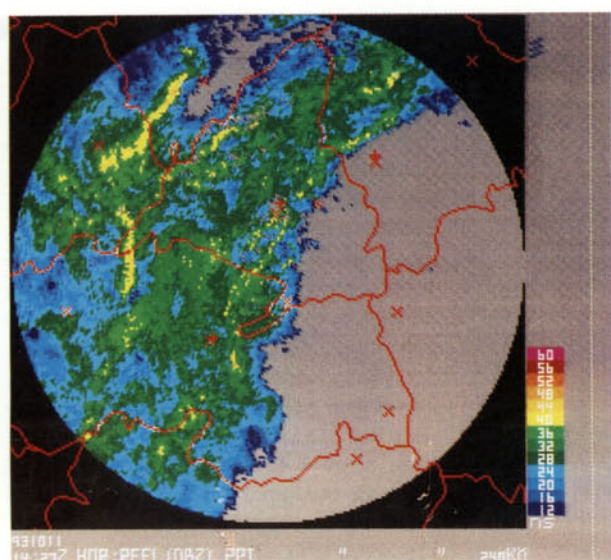
La generació de productes de la xarxa es fa a dos nivells: a nivell regional, utilitzant la informació obtinguda per l'equip radar associat, i a nivell nacional, amb la composició de la informació obtinguda pel conjunt de radars i la seva combinació amb la informació rebuda dels satèl·lits meteorològics.

Nivell regional: L'equip radar detecta i localitza els ecos de precipitació i determina les seves característiques; i, de manera contínua, trameta la informació obtinguda a l'ordinador instal·lat al centre regional, el qual rep les dades i genera les següents imatges o productes radar:

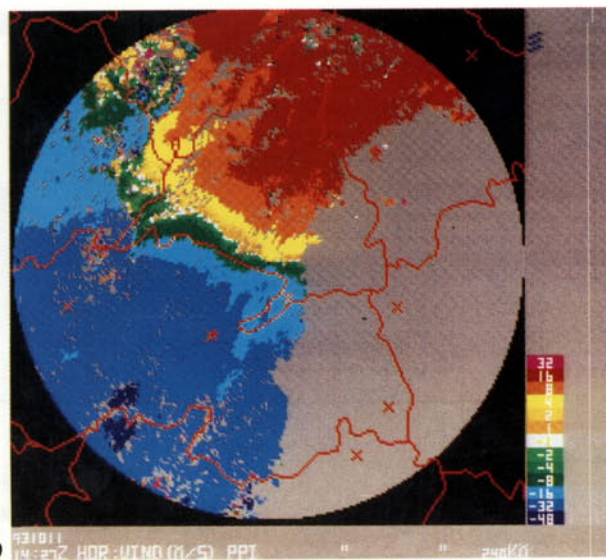
- Talls horitzontals que informen de la distribució i intensitat de la precipitació a diverses altures (fins a dotze talls horitzontals a altures que van des del nivell inferior, o arran de terra, fins a una altura de 12 km).
- Imatges integrades que sintetitzen tota la informació continguda en el conjunt de talls horitzontals, com l'*echotop* o altura màxima dels ecos de precipitació, la imatge amb els màxims de precipitació (amb independència de l'altura a què es trobin), i la imatge amb l'altura a què es troben aquests màxims.
- Imatges amb productes derivats de l'exploració en mode doppler, que té l'avantatge de proporcionar una resolució geomètrica d'1 km contra els 2 km de l'operació en mode “només amplitud”, i que a més de facilitar la intensitat dels

Foto 2: Emplaçament del radar meteorològic d'Extremadura; Sierra de Fuentes (Càceres)

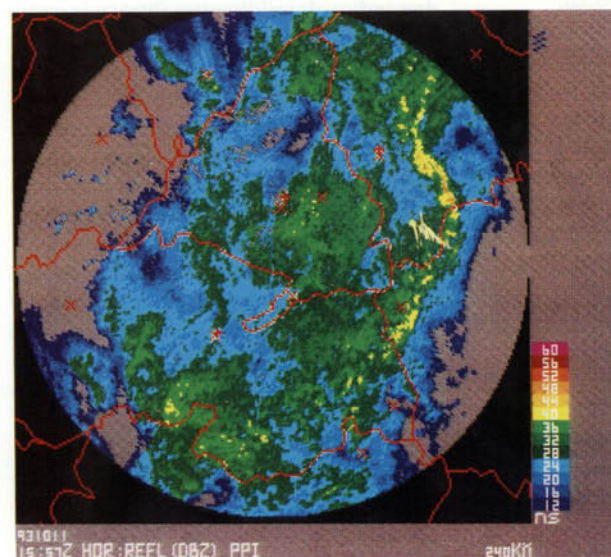




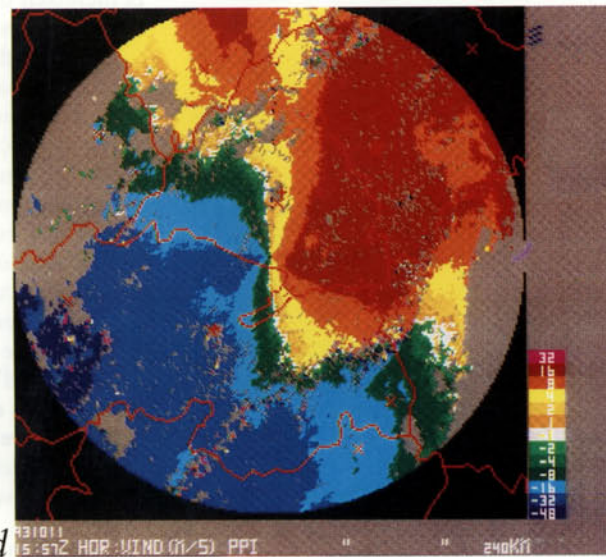
a



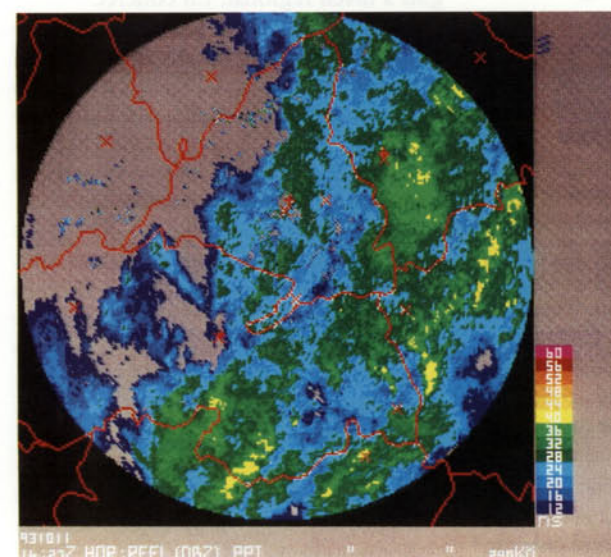
b



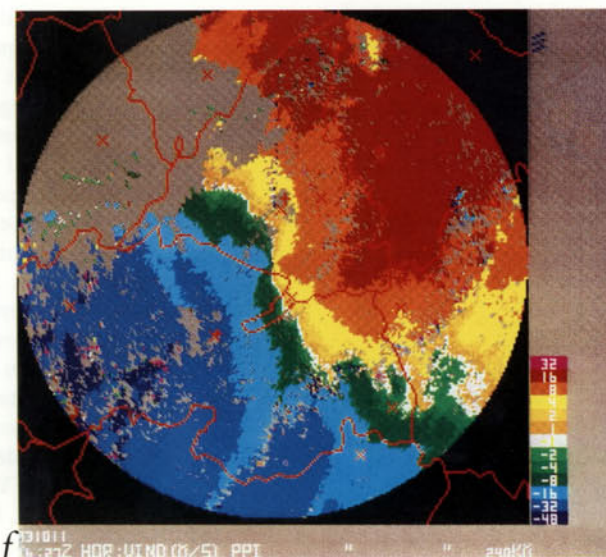
c



d



e

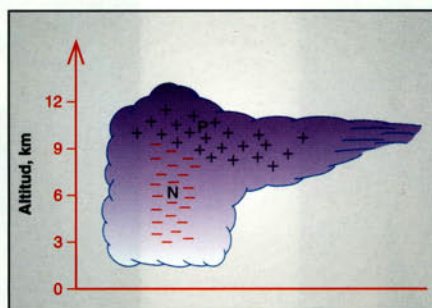


f

Imatge 7 (a, b, c, d, e i f):

Seqüència d'imatges de reflectivitat radar i de vent radial preses pel radar de Madrid corresponents al pas d'un front de pluges pel centre de la península el dia 11 d'octubre del 1993; explicació al text

Figura 4: Esquema teòric de la possible distribució de càrregues elèctriques en un núvol de tempesta



ecos també informa de la seva velocitat de desplaçament i de la turbulència.

Els següents productes, pel seu interès, es mereixen una menció especial:

- Les imatges d'estimació de la precipitació acumulada (una estimació de l'aigua que ha caigut a terra). Aquestes imatges són calculades de forma horària; mitjançant el processat de la informació generada en les sis darreres exploracions efectuades, el sistema calcula una estimació de la quantitat de precipitació acumulada; després, amb aquestes acumulacions horàries, es calculen les precipitacions acumulades a intervals de sis i vint-i-quatre hores.
- La imatge d'extrapolació dels ecos. Amb una parella d'imatges prèvies, el sistema calcula la velocitat de desplaçament dels ecos de precipitació i genera una estimació de la seva posició en un futur proper.

A fi d'il·lustrar alguns d'aquests productes s'inclou una sèrie d'imatges corresponents a diferents radars i situacions meteorològiques.

Radar de Madrid, 11 d'octubre del 1993. La imatge 7 (a, b, c, d, e i f) mostra el pas d'un front de pluja pel centre de la península, tal com fou vist pel radar de Madrid en operació doppler. Les imatges a, c i e mostren el camp de reflectivitats radar, per al nivell d'altura més baix, a les hores 14.27, 14.57 i 15.27 UTC; a la seqüència temporal s'observa el pas del front de pluges sobre Madrid. Les imatges b, d i f mostren el camp de velocitats radials per a les mateixes hores; a la seqüència temporal s'observa el gir de vent que acompanya el pas del front.

Radar de València, 15 de juny del 1992. La imatge 8 (a, b i c) mostra una situació de tempestes a llevant observades pel radar de València. La imatge a mostra, per a les 17.10 UTC, el camp de reflectivitats radar a una altitud de 2,5 km i, a les solapes, els talls verticals segons les línies que hi apareixen; aquests talls fan palesa l'estructura vertical de la forta tempesta que hi ha al sud de la província de Castelló. A la imatge b s'observa amb més detall, mitjançant l'opera-

ció en mode doppler, el camp de reflectivitats a les 17.07 UTC que assoleix fins a 60 dbZ al centre de la tempesta. A la imatge c es mostra el camp de velocitats radials, per a la mateixa hora. L'existència de velocitats radials de signe oposat (tons grocs i verds separats per la línia blanca) a la zona de la tempesta fa palesa la confluència de vents que l'alimenta.

Radar de Barcelona, 9 d'agost del 1992. La imatge 9 (a, b, c i d) mostra una situació de tempestes a Catalunya observada pel radar de Barcelona. La imatge a mostra el camp de precipitació acumulada (estimació de la pluja caiguda) entre les 00.00 UTC i les 06.00 UTC del dia 9 d'agost del 1992; la gamma de colors que apareix al lateral dret indica els mil·límetres (litres per metre quadrat) de precipitació. A la imatge b es mostra el camp de reflectivitats radar per a les 07.40 UTC a una altitud de 2,5 km, en el que les cèl·lules de tempesta apareixen alineades de nord a sud (tons grocs i taronges). A la imatge c es mostren els màxims de reflectivitats i les seves projeccions verticals per a la mateixa hora; a les projeccions verticals es fa palesa l'estructura vertical de les cèl·lules més actives. A la imatge d es mostra el camp d'altura màxima dels cims dels ecos per a la mateixa hora; aquí tornen a palesar-se els nuclis més actius amb altituds que atenyen els 11 km.

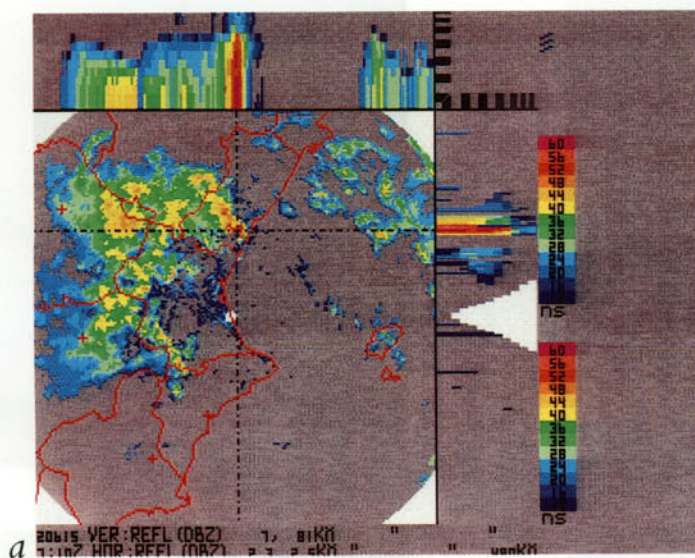
Nivell nacional: A més de l'operació i generació de productes a escala regional, a escala nacional es creen mosaics de composició amb alguns dels productes obtinguts a nivell regional. En concret:

- Cada deu minuts es genera una imatge nacional d'intensitat de precipitacions radar mitjançant la composició dels camps de reflectivitats a una altitud de 2,5 km proporcionats per cada radar, i una imatge nacional de l'altura màxima dels ecos. La imatge 10 mostra una imatge radar de composició nacional corresponent al 27 d'abril del 1995 que informa de la intensitat de precipitació a les 08.20 UTC en mil·límetres per hora (vegeu la correspondència entre colors i intensitat de precipitació a l'escala de la dreta de la imatge).
- Cada hora es genera una imatge nacional d'estimació de la precipitació acumulada, mitjançant la composició de les estimacions d'aquest camp fetes per cada centre regional radar.

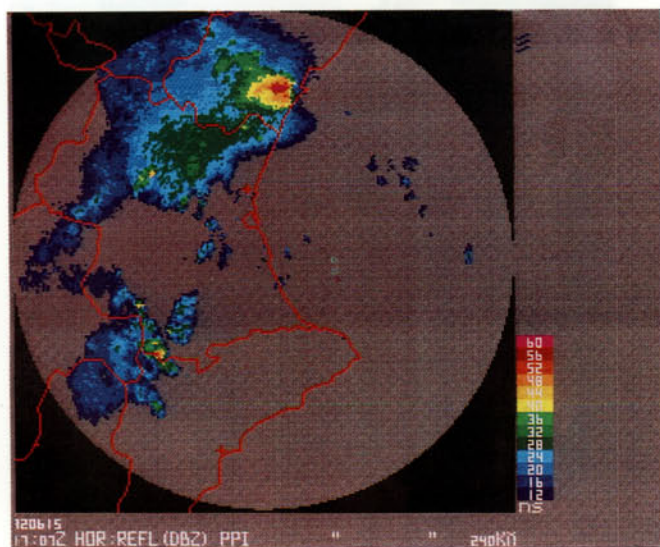
Detecció de llamps

Tempesta i descàrregues elèctriques. El llamp

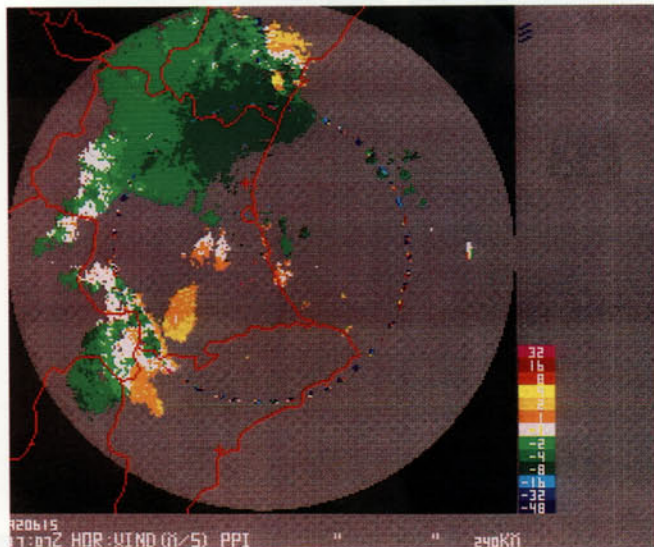
La tempesta és una de les manifestacions meteorològiques més espectaculars. Els fenòmens que s'hi associen, i en par-



Imatge 8 (a, b i c): Imatges preses pel radar de València el dia 15 de juny del 1992; explicació al text



b



c

ticular el llamp, són una seriosa amenaça per a l'home i els seus béns.

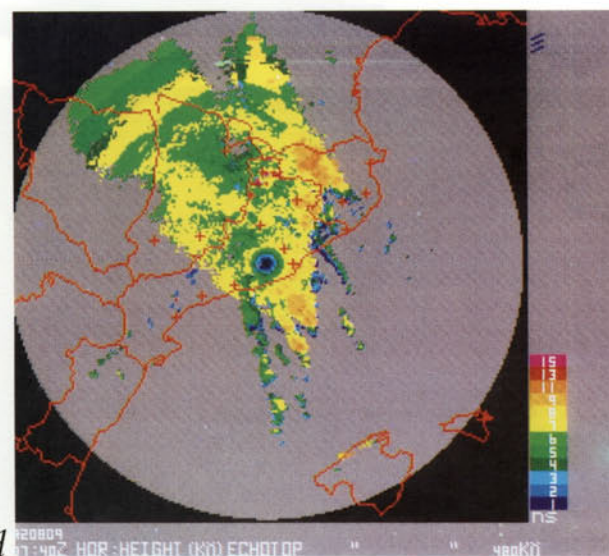
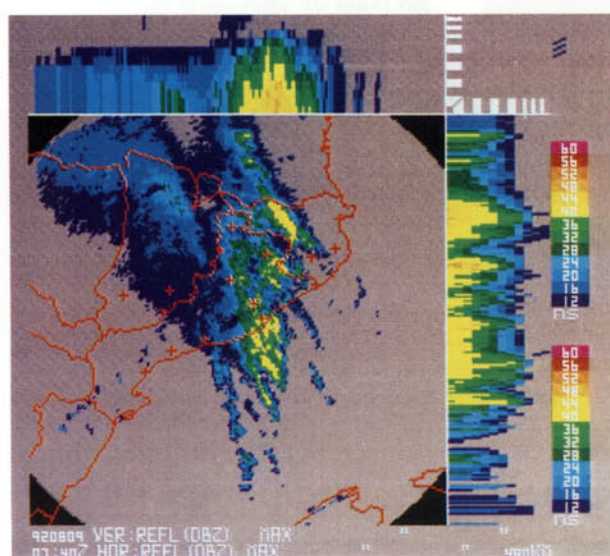
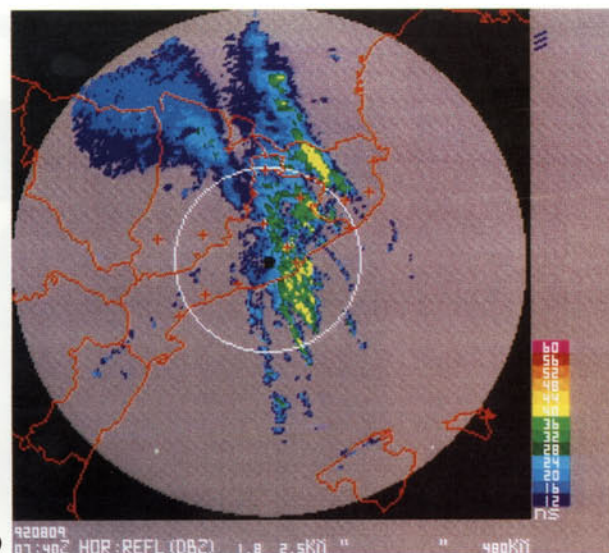
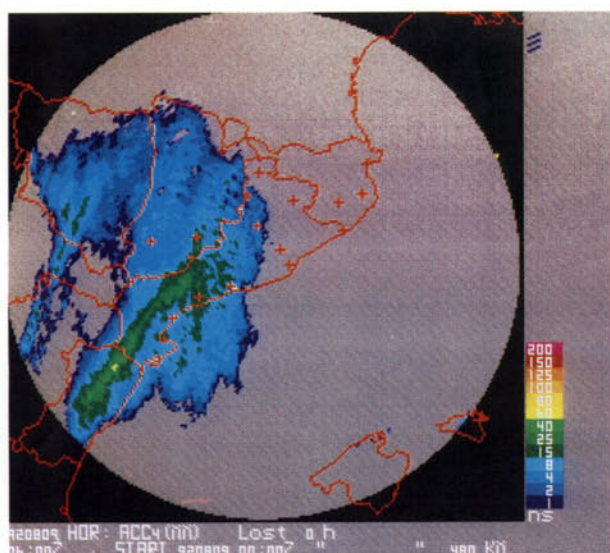
Cada any es perden vides humanes com a conseqüència directa del llamp, que a més és una de les causes dels incendis forestals. D'altra banda, la generalització dels components electrònics sensibles als efectes del llamp a les indústries i els mitjans de transport i comunicació comporta un augment continuat del nombre de sinistres provocats pel llamp. A més, una sèrie d'activitats, com la manipulació de productes químics sensibles, combustibles i explosius, cal que siguin suspeses quan cauen llamps.

A un núvol típic de tempesta (*cumulonimbus*) l'ascens d'aire càlid i humit, en forma de forts corrents, provoca la ràpida formació d'hidrometeors, i les interaccions resultants entre ells causen la separació de les càrregues elèctriques. Les partícules lleugeres de gel queden carregades positivament i són transportades a la part superior del núvol. Les partícules més pesants

solen quedar carregades negativament i cauen a la part inferior del núvol. Aquesta separació de càrregues crea forts camps elèctrics a l'interior del núvol, i entre la base del núvol i el sòl, que acaben per provocar la descàrrega elèctrica, bé entre les dues parts del mateix núvol, bé entre dos núvols veïns, bé entre el núvol i el sòl. A la figura 4 es mostra un esquema de la distribució de càrregues elèctriques en un núvol de tempesta.

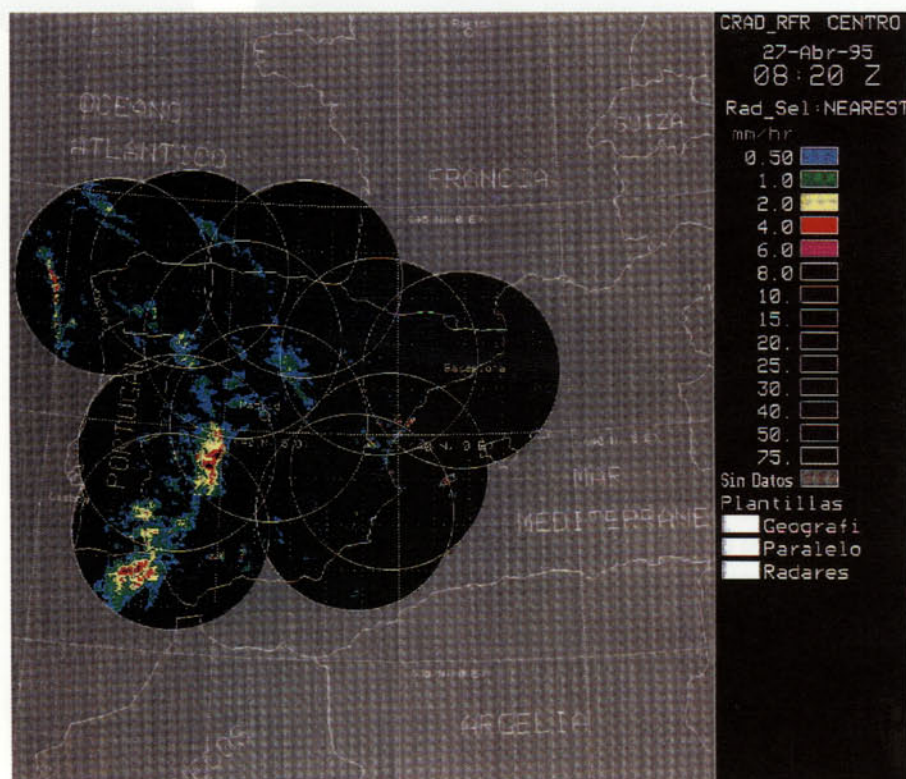
La forma més freqüent de descàrrega és la que es produeix a l'interior del núvol. Lògicament, però, és la descàrrega entre el núvol i la superfície terrestre (on la humitat viu i desenvolupa les seves activitats), o descàrrega en llamp, el que més ha preocupat l'home i ha estat objecte de més profunds estudis, sobretot a fi de desenvolupar sistemes de protecció.

El procés típic de descàrrega en llamp transfereix càrrega negativa des del núvol a la superfície terrestre (llamp de polaritat negativa: la descàrrega es produeix entre



Imatge 9 (a, b, c i d): Tempestes observades pel radar de Barcelona el dia 9 d'agost del 1992; explicació al text

Imatge 10: Imatge de composició nacional corresponent al dia 27 d'abril del 1995 que mostra la intensitat de precipitació radar a les 08.20 UTC; explicació al text



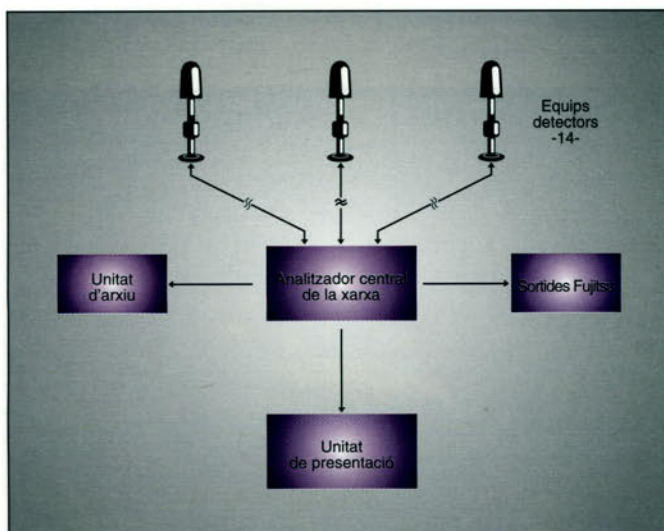


Figura 5: Esquema simplificat de la xarxa de detecció de llamps de l'INM

la base del núvol carregada negativament i el sòl que té immediatament a sota, que es carrega positivament per influència). El componen d'un a tres pols d'alta corrent o subdescàrregues, amb una intensitat de corrent que es troba normalment entre 10 i 20 quiloampers.

A més es produeixen llamps que transfereixen càrrega negativa des de la superfície del sòl al núvol (llamp de polaritat positiva: aquesta descàrrega se sol produir entre la part superior del núvol carregada positivament i el sòl que té immediatament a sota, que es carrega negativament). Aquests llamps positius són molt menys freqüents, al voltant del 10% o menys; no obstant, solen ser més intensos i, per tant, més perjudicials en tots els sentits.

El corrent impulsu associat a cada subdescàrrega genera energia electromagnètica en un ampli espectre en el domini de les radiofreqüències; és aquesta energia radia-

da la que permet detectar i localitzar els llamps i determinar-ne les característiques.

La xarxa de detecció de llamps de l'Institut Nacional de Meteorologia

La xarxa de detecció de llamps de l'INM la componen els següents elements: els equips detectors, la unitat concentradora o analitzador central i les unitats per a la presentació i l'explotació de la informació.

A la figura 5 es mostra un esquema simplificat de la xarxa.

Equips detectors de llamps

Els equips detectors són radiogoniòmetres dotats d'una electrònica que els capacita per a discriminar, entre els senyals electromagnètics incidents, els que tenen unes característiques distintives pròpies de les ones generades per les descàrregues elèctriques de núvol a terra que constitueixen el llamp.

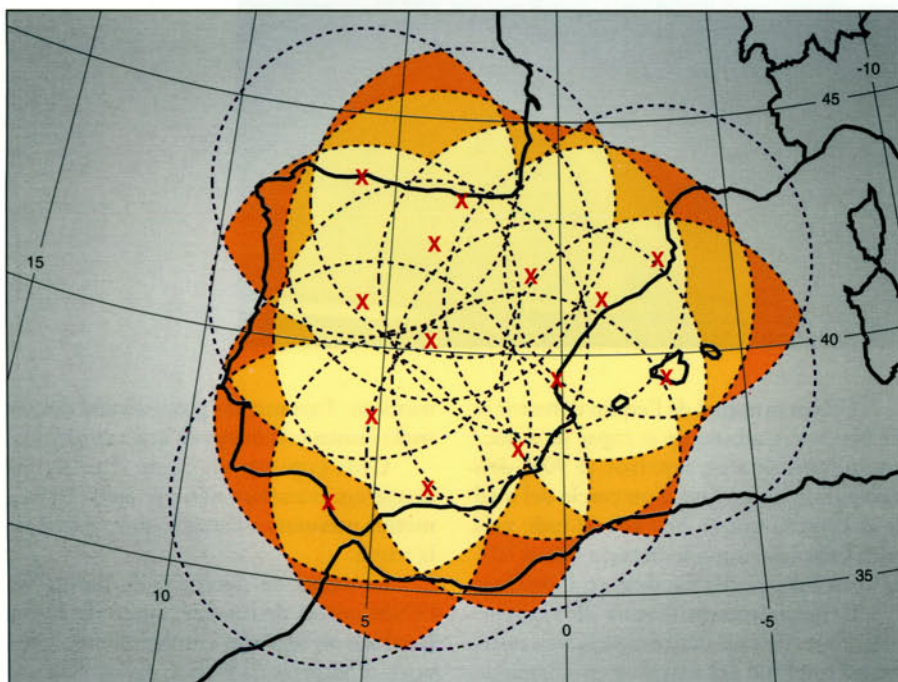
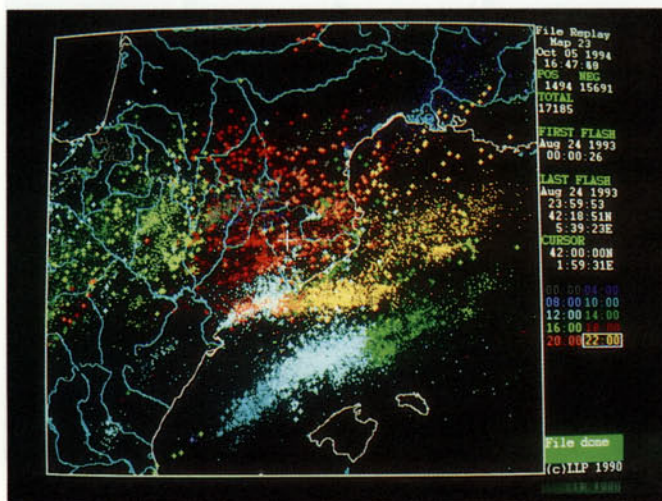


Figura 6: Topologia de la xarxa amb la cobertura al 90% d'eficàcia en la detecció i la localització. Les aspes indiquen la posició dels 14 equips

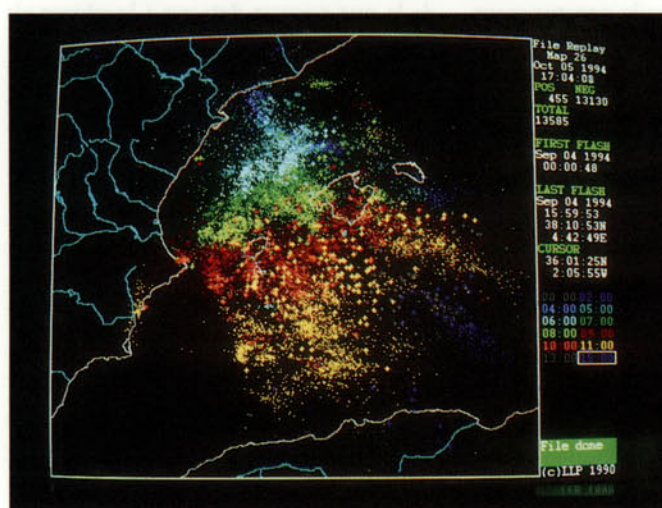
Imatge 11: Llamps que va haver al quadrant nord-est espanyol el dia 24 d'agost del 1993; explicació al text

Imatge 12: La imatge representa els llamps que va haver entre les 00.00 i les 14.00 UTC el dia 4 de setembre del 1994 a l'àrea geogràfica centrada a l'arxipèlag balear seleccionada; explicació al text

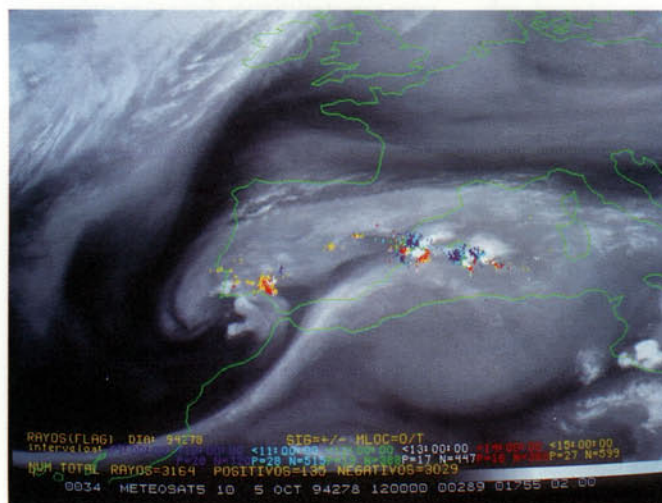
Imatge 13: Imatge Meteosat, canal infraroig d'absorció per vapor d'aigua, corresponent a les 12.00 UTC del dia 5 d'octubre del 1994; li ha estat superposat un gràfic que indica les posicions dels llamps que va haver entre les 9.00 i les 15.00 UTC; explicació al text (imatge rebuda i processada a l'INM)



Imatge 13: Imatge Meteosat, canal infraroig d'absorció per vapor d'aigua, corresponent a les 12.00 UTC del dia 5 d'octubre del 1994; li ha estat superposat un gràfic que indica les posicions dels llamps que va haver entre les 9.00 i les 15.00 UTC; explicació al text (imatge rebuda i processada a l'INM)



Imatge 13: Imatge Meteosat, canal infraroig d'absorció per vapor d'aigua, corresponent a les 12.00 UTC del dia 5 d'octubre del 1994; li ha estat superposat un gràfic que indica les posicions dels llamps que va haver entre les 9.00 i les 15.00 UTC; explicació al text (imatge rebuda i processada a l'INM)



L'equip detector mesura els següents paràmetres de cada descàrrega: la seva polaritat, l'amplitud del senyal electromagnètic

La xarxa de detecció de llamps de l'INM consta de catorze equips detectors instal·lats als següents emplaçaments: aeroports d'Astúries, Bilbao, Girona, València

i Palma de Mallorca; bases aèries de Mataró, Villafraja, Saragossa, Reus, Getafe, San Javier, Jerez de la Frontera i Armilla, i estació VOR d'Hinojosa del Duque.

A la figura 6 es mostra la topologia de la xarxa amb la cobertura al 90% d'eficàcia de detecció i localització.

Analitzador central de la xarxa

És l'encarregat del control de la xarxa i de la concentració i procés de la informació procedent dels equips detectors, així com el transvasament de la informació a d'altres sistemes de l'INM. Està instal·lat al Centre de Procés de Dades de l'INM a Madrid, i la comunicació entre els equips detectors i ell es fa mitjançant la xarxa Iberpac de Telefónica.

L'analitzador central agrupa les dades procedents dels diferents equips detectors a fi de calcular la localització geogràfica exacta on ha caigut el llamp i les seves característiques. Concretament, la informació que l'analitzador central calcula per a cada llamp és la següent: la polaritat, la situació geogràfica (latitud i longitud), l'hora, amb una precisió de mil·lisegons, la intensitat de corrent de la primera descàrrega i el nombre de descàrregues que el componien.

Sistemes de presentació i d'explotació de la informació de la xarxa

La seva funció és presentar de forma gràfica i en temps real, en un monitor de vídeo en color i sobre diverses bases geogràfiques seleccionables, els llamps que hi ha en cada instant, amb distinció de la seva polaritat i antiguitat mitjançant la utilització de diversos símbols (típicament, aspes o quadrats per a distingir la polaritat positiva o negativa) i colors seleccionats per tal de distingir l'ocurrència temporal (típicament, colors més freds per a designar els llamps més allunyats en el temps i més càlids per a designar el més recents). Les imatges 11 i 12 mostren unes sortides típiques del sistema de presentació d'informació de la xarxa.

La imatge 11 representa els llamps que va haver al quadrant nord-est espanyol el dia 24 d'agost del 1993. Cada punt, o aspa, indica la posició on va caure el llamp (positiu si és una aspa, negatiu si és un punt); el color indica l'interval temporal en què

es produí (vegeu l'escala de colors i l'interval horari associat al lateral dret). En total, a l'àrea geogràfica de la imatge es van detectar 17 185 llamps (15 691 de negatius i 1 494 de positius).

La imatge 12 mostra els llamps que va haver entre les 00.00 i les 14.00 UTC el dia 4 de setembre del 1994 a l'àrea geogràfica centrada a l'arxipèlag balear seleccionada. Tot observant els colors associats a cada símbol representatiu de la caiguda d'un llamp, es pot veure que la tempesta s'originà davant la costa de Tarragona i es desplaçà seguint el rumb SSE escombrant en el seu recorregut les illes d'Eivissa i Mallorca. En total, a l'àrea geogràfica i l'interval indicats es van detectar 13 585 llamps (13 130 de negatius i 455 de positius).

A més, la informació dels llamps detectats i localitzats és transferida en temps real al sistema unificat d'explotació de la informació meteorològica de l'INM basat en l'ordinador Fujitsu M-382, de manera que la informació proporcionada per la xarxa sigui:

- Utilitzada en temps real conjuntament amb les imatges de satèl·lit i dels radars, i les observacions sinòptiques del temps, pels responsables de les tasques de predicció i vigilància meteorològiques, tant a la seu central com als centres meteorològics regionals.

A la imatge 13 es mostra una imatge Meteosat, canal infraroig d'absorció per vapor d'aigua, corresponent a les 12.00 UTC del dia 5 d'octubre del 1994. Li ha estat superposat un gràfic que indica les posicions dels llamps que va haver entre les 9.00 i les 15.00 UTC.

- Arxivada per a la posterior realització d'estudis estadístics i climatològics de distribució i freqüència dels llamps.

A la figura 7 es representa el nombre total de llamps detectats per la xarxa de l'INM, dins la regió geogràfica compresa entre els paral·lels 35°N i 45°N i els meridians 7°E i 10°W, segons estacions, entre la primavera del 1992 i l'estiu del 1994. L'estació amb més llamps fou l'estiu del 1992, amb més de 400 000 llamps detectats; destaca també la poca activitat que va haver a la primavera del 1994.

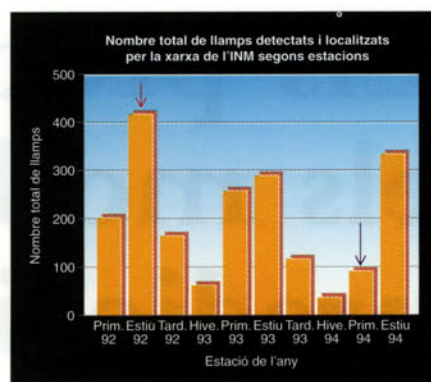


Figura 7: Nombre total de llamps detectats per la xarxa de l'INM, dins de la regió geogràfica compresa entre els paral·lels 35°N i 45°N i els meridians 7°E i 10°W; explicació al text

Data de recepció de l'original: 05.95