

CANVI CLIMÀTIC: EVOLUCIÓ DELS RECURSOS TECNOLÒGICS APLICATS EN LA SEVA RECERCA

Mariano Barriendos

Departament d'Astronomia i Meteorologia. Universitat de Barcelona

Introducció

Els comportaments canviants del clima han estat una preocupació constant per a l'home. El desenvolupament de les civilitzacions ha permès controlar una bona quantitat de processos naturals per a profit propi, però en el cas del clima els comportaments irregulars de variables com ara la temperatura i la precipitació fan que s'estableixi un diàleg no sempre fàcil.

La disponibilitat creixent de mitjans tecnològics ha fet que la societat humana arribi a explotar els recursos naturals amb una gran eficiència. Però les seves activitats estan trobant en el clima dos problemes. D'una banda, les activitats en continu creixement fan que se superin els límits allà on els recursos naturals són aprofitables i poden esdevenir un risc per a la mateixa societat. És a dir, es generen situacions de vulnerabilitat davant les manifestacions extremes d'algunes variables atmosfèriques, que esdevenen riscos climàtics amb efectes catastròfics. D'altra banda, determinades activitats humanes han repercutit en l'atmosfera, arribant a alterar-ne la composició química d'una manera artificial. Les necessitats energètiques han provocat unes emissions de gasos d'efecte d'hivernacle que han convertit l'home en un factor més dins el sistema climàtic.

Davant aquest context, l'interès social per aspectes climàtics com el canvi global o els riscos climàtics és evident. Des de la ciència i la tecnologia cal emprendre la recerca sobre les incerteses, però també és important fer arribar a la societat les respostes a les preguntes suscitades. L'objectiu del present treball va en aquesta línia, descrivint alguns dels conceptes i tècniques propis de l'estudi de la variabilitat climàtica, posant un especial èmfasi en el plantejament d'una perspectiva temporal prou àmplia com per a relativitzar o posar cada comportament climàtic en la seva justa ubicació pel que fa les respectives magnituds i durades. Les tècniques de mesura i de reconstrucció climàtiques també tindran una àmplia acollida. El seu desenvolupament és una prova de la preocupació humana pel clima, havent esmerçat recursos de tota mena dirigits a la millora del co-

neixement dels processos atmosfèrics a diferents escales espaciotemporals.

Cicles, variacions naturals i canvis del clima

El comportament del clima en la seva evolució temporal és la manifestació d'una complexa interacció de processos, fenòmens i agents causals. La principal característica del seu resultat, la variabilitat climàtica natural, és que es manifesta amb diferents patrons temporals a diferents escales, de tal manera que un patró de variabilitat pot tenir en el seu interior comportaments de més curta durada amb característiques fins i tot oposades a les del patró de més llarga durada. Això complica molt l'anàlisi del comportament climàtic i obliga a fer recerques pluridisciplinàries en uns ventalls de temps tan amplis que sovint fan feixuga i lenta la mateixa recerca.

Un comportament regular, cíclic, i per tant previsible, només es troba pel que fa a les variables climàtiques en l'alternança de les eres glacial i interglacial. El nivell actual de la recerca no permet afirmar l'existència d'altres cicles. De tota manera, disposar de certa predictibilitat dels comportaments climàtics d'escala geològica és un fet d'escassa utilitat per a les problemàtiques actuals de l'home. Sabem que som a la darreria d'un interglacial i que geològicament ben aviat, d'aquí a uns dos mil anys, començarà una nova era glacial. Evidentment, el que interessa ara per ara es poder gestionar els recursos naturals, especialment els hídrics, precisament per a permetre que la societat i el màxim possible d'habitants amb un bon nivell de vida arribin d'ací a dos mil anys a gaudir o patir d'aquesta nova era climàtica.

Però el sistema climàtic és suficientment complex per a oferir-nos tot un ventall de comportaments irregulars, imprevisibles, que es defineixen en conjunt com a variabilitat climàtica natural. Aquesta variabilitat, pròpia del sistema climàtic, consisteix en una alternança aleatòria del comportament de les variables atmosfèriques sense una tendència definida o prolongada en el temps. Quan es produeix una tendència en algunes variables i s'arriba a una nova situació climàtica diferent a

l'anterior i perdurable en el temps, llavors sí que es pot considerar, ja que es produeix un canvi climàtic. En aquest sentit, la successió d'eres glacials i interglacials són canvis climàtics naturals, d'una magnitud molt important i amb efectes irreversibles en diferents ecosistemes.

Comportament natural del clima

Les recerques iniciades fins ara mostren un comportament climàtic regular, cíclic i previsible només a escala de la successió d'eres glacials i interglacials, d'uns cent mil i vint mil anys de durada respectivament. En canvi, a escales de temps més properes a l'home, la variabilitat presenta diferents tipus de fluctuacions de diferent abast temporal. Bàsicament, hi ha un comportament basat en períodes climàtics, de dos mil a quatre mil anys de durada, dintre dels quals es produeixen episodis d'uns cinc-cents anys de durada. Tots tenen dos patrons de comportament semblants: fases de temperatures elevades amb precipitacions relativament abundoses però almenys sempre regulars, i fases de temperatures baixes i un règim de precipitacions irregulars. En canvi, la seva successió encara no té unes explicacions conegudes.

Descriure'ls detalladament és la matèria pròpia dels manuals de paleoclimatologia (Grove, 1988; Bradley & Jones, 1992; Bradley, 1999), en els quals es poden trobar contextos climàtics on l'home ha pogut trobar condicions ambientals més o menys favorables per a desenvolupar-se com a col·lectiu social. Per exemple, un període climàtic càlid i de pluges regulars, l'Atlàntic, afavorí molt probablement el desenvolupament de l'agricultura. A una escala temporal inferior, l'episodi climàtic medieval, de característiques semblants, permeté la colonització de Groenlàndia i un gran desenvolupament econòmic i demogràfic a Europa, malgrat les limitacions tecnològiques i sanitàries de l'Europa medieval.

Però també hi ha exemples de comportaments climàtics menys favorables. Entre els segles XIV i XIX, l'anomenada *miniglaciació* va fer baixar les temperatures mitjanes al planeta entre 1 °C i 2 °C i donà un comportament de les precipitacions on la regularitat donava pas a unes freqüents i problemàtiques sequeres i maltempades, a més de fortes onades de fred. Com a conseqüència, l'obtenció de collites suficients per a les necessitats primordials esdevenia una preocupació per a la població i les autoritats. Determinades comunitats establertes en zones de muntanya o en altes latituds, com les groenlandeses, experimentaren crisis de subsistència irreversibles.

El clima actual, que considerem com a clima «normal», però que no és més que el clima que ens ha tocat viure, temporalment està sortint de la darrera miniglaciació i hom entén que assolirà unes temperatures d'1 °C o 2 °C més altes que durant els darrers quatre-cents anys amb una tendència també a assolir precipitacions més regulars. Però les suposicions resten limitades per la manca d'un coneixement ferm sobre l'episodi climàtic que només fa de cent vint a

cent quaranta anys que ha començat i, el més important, no sabem quines característiques assolirà, tenint en compte que és el primer episodi climàtic en el qual l'home està intervenint substancialment com a nou factor climàtic.

La intervenció de l'home en el clima

La intervenció de l'home com a ésser social ha introduït un nou tipus de canvi climàtic, produït per l'alteració de la composició de l'atmosfera a partir de l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle. Els avenços tecnològics i la seva extensió a bona part de les societats i indrets geogràfics del planeta fan que aquesta circumstància nova dins el sistema climàtic requereixi la màxima atenció per part del mateix causant: l'home. La magnitud de la intervenció humana encara és quantitativament modesta, d'aproximadament unes dècimes de grau (°C) en les temperatures mitjanes del planeta. Però el fet de tractar-se d'un factor nou que s'ha introduït recentment en el sistema climàtic és probablement l'aspecte sobre el qual cal tenir més precaucions per diferents motius: es desconeixen els resultats que poden derivar d'aquesta intervenció, atesa l'evident manca de referents previs. En conseqüència, no es coneixen els processos climàtics que poden resultar afectats ni els mecanismes de resposta que el sistema pot emprendre.

Davant tanta incertesa, calen actituds actives. En la vessant social, cal fer tot el possible per a no agreujar la ja evident alteració de la composició atmosfèrica. En la vessant tecnològica, cal desenvolupar tots els mitjans per a una millor monitorització de les variables climàtiques i meteorològiques. Des de la vessant investigadora, finalment, cal continuar amb la recerca tot considerant totes les noves incerteses afegides a la variabilitat climàtica natural.

Tècniques d'observació i de mesura instrumental

Antecedents. La preocupació pel medi atmosfèric

L'home sempre ha tingut una preocupació pel temps atmosfèric. Quan era caçador i recol·lector, potser no percebia amb tanta cruïra les variacions climàtiques, atesa la seva capacitat per a emigrar, tot seguint la fauna o els medis ecològics on trobava cobertes les seves necessitats bàsiques. La sedentarització fou un procés vinculat a l'activitat agrària, especialment l'obtenció d'unes collites regulars, cosa que suposava per a l'home que els comportaments atmosfèrics fossin una de les seves preocupacions bàsiques. La tecnologia, la ciència i fins i tot la teologia es van posar al servei de la població per a diagnosticar i preveure les variacions climàtiques. Qualsevol recurs era vàlid, com les adoracions, les ofrenes, les pregàries o els exorcismes.

Als països europeus, la religió va prendre un protagonisme o almenys un control eficaç sobre la ciència i la tecnologia en aquests aspectes durant l'edat mitjana. L'afany

per observar els fenòmens naturals, mesurar-ne les variables i experimentar-los va haver de lluitar contra l'obscurantisme i les autocensures imposades pels poders religiosos. Només després d'importants sacrificis personals, els coneixements científics es posaren per davant de les creences religioses. Entre el Renaixement i la Il·lustració es constituí la base de la societat moderna i del seu desenvolupament tecnològic i científic.

Desenvolupament de la capacitat de mesura

La ciència moderna s'inicià a Europa en un context on la religiositat, l'astrologia i les creences arrelades en el paganisme impregnaven els coneixements sobre el comportament de l'atmosfera. Malgrat això, Europa experimentà un desenvolupament dels recursos tecnològics i científics. El Renaixement contemplà la invenció dels primers aparells d'observació de diferents variables meteorològiques, pas indispensable perquè els investigadors poguessin iniciar les primeres experimentacions. Els mètodes científics s'anirien desenvolupant i consolidant durant el segle XVII. Simultàniament, s'anà creant la necessitat de disposar d'aparells amb capacitat de mesurar les variables observades. En acabar aquest segle, els dispositius bàsics per a fer observació meteorològica instrumental ja estaven disponibles:

- Termòmetre, impulsat per Ferran II, l'any 1641.
- Baròmetre (E. Torricelli), impulsat per Ferran II, l'any 1643.
- Pluviòmetre (C. Wren), l'any 1662.
- Anemòmetre (R. Guillet), l'any 1673.

A la darrerria del segle XVII s'emprengueren les primeres iniciatives per a fer observacions simultànies i coordinades en grans àmbits geogràfics. Els exemples són escassos, però el mèrit que tenen els converteix en fites per a la ciència moderna: la xarxa coordinada per l'Accademia del Cimento pel cardenal Leopoldo de Medici, les mesures de temperatura a Anglaterra o les activitats de mesura de l'Observatori Astronòmic de París.



FIGURA 1. Estació meteorològica convencional i el seu observador (estació de Sort).

Aquestes experiències tingueren una aplicació pràctica en l'inici de la identificació de processos climàtics arreu del món i la caracterització climàtica dels nous territoris explorats i colonitzats per les potències europees. Durant el segle XVIII, les dades acumulades permeteren fer una climatologia estadística i descriptiva per a una gran part del planeta. Alhora, es descobriren i caracteritzaren els elements i processos constitutius del sistema climàtic: tipus de climes, comportament dels centres d'acció, comportaments extrems, règim de vents.

El darrer pas: la telecomunicació

L'observació meteorològica instrumental tenia una limitació tecnològica que li impedia un dels objectius més cobejats per l'home, la predicció meteorològica. El problema era la impossibilitat de tractar simultàniament en temps real les dades generades per tots els observadors, transmetre-les i centralitzar-les. La coordinació per si mateixa duria a ben poca cosa més enllà de la recerca climatològica que treballa en baixes resolucions temporals. El treball coordinat i estandarditzat només va dur a profits meteorològics tangibles quan el desenvolupament tecnològic permeté les telecomunicacions en temps real i de quantitats massives d'informació.



La disponibilitat del telègraf elèctric fou el primer pas important en aquest sentit i permeté el desenvolupament de serveis meteorològics estatals amb un cert component predictiu. En aquest sentit, l'anècdota ocorreguda durant la Guerra de Crimea fa prou evidents les necessitats i els mitjans aplicables al llarg de la segona meitat del segle XIX (Fierro, 1991): la mar Negra era l'escenari de combats navals entre les esquadres anglofranceses i les russes. Els francesos van perdre el cuirassat *Henri IV* durant un fort temporal. El Govern francès encarregà una investigació sobre el cas i les reconstruccions sinòptiques mostraven sens dubte el pas d'una pertorbació per damunt d'Europa fins a arribar a Rússia i provocar els estralls esmentats. Un simple advertiment d'alerta de tempesta per telègraf hauria evitat el naufragi. Aquesta és una de les justificacions per a la creació del servei meteorològic francès i per a la utilització de les telecomunicacions per a disposar d'informació gairebé en temps real per a gestionar situacions de risc.

Un cop donada aquesta utilització immediata, les dades passaven als fons de registres que s'utilitzen en la recerca climatològica.

La primera meitat del segle XX ha experimentat una diversificació en els mitjans de comunicació, que a més s'han fet més potents i amb menys exigències de localització: la telegrafia sense fils, la radiofonia i la telefonia han permès instal·lar observatoris meteorològics gairebé sense limitacions geogràfiques, i els ha fet, en canvi, perfectament utilitzables en temps real. A la segona meitat del segle XX, aquests mitjans han experimentat una potenciació molt important, i s'ha afegit la capacitat dels ordinadors interconnectats com a nou mitjà de comunicació. Altrament, cal fer esment de les plataformes en satèl·lits artificials per a donar suport a les xarxes de telecomunicacions.

Els recursos tecnològics dedicats actualment a l'intercanvi de dades meteorològiques en temps real tenen la seva màxima expressió en el Programa de Vigilància Meteorològica Mundial (Organització Meteorològica Mundial). En total, hi participen deu mil estacions terrestres, set mil estacions embarcades, tres-centes boies i set-centes estacions de sondatge aerològic amb centres de processament a Melbourne, Moscou i Washington. A aquests centres hi arriben i hi són processades quinze milions de dades i dos mil mapes del temps. Aquest material diàriament es transmet a trenta-cinc centres regionals i cent vuitanta-tres centres meteorològics estatals. A més, per a situacions especials, els vaixells i avions científics, militars i comercials poden col·laborar enviant les seves mesures.

Els mitjans tècnics implementats durant el segle XX

Millores en l'observació convencional. L'automatització

El transport de la informació obtinguda en observatoris meteorològics és un gran avantatge però obliga que personal qualificat estigui permanentment *in situ*. Els avenços en

automatització durant la segona meitat del segle XX han permès la instal·lació d'estacions meteorològiques automàtiques. És a dir, estacions que no requereixen cap atenció de personal, tret de les operacions esporàdiques de manteniment. Aquest recurs ha permès disposar de xarxes denses d'observatoris en localitzacions difícils per a la presència humana (alta muntanya, zones àrides, alta mar). L'automatització també facilita la generació d'observacions en una freqüència molt alta, de tal manera que a un observador humà gairebé li resultaria impossible.

Un exemple d'automatització integrada entre diferents xarxes d'estacions de mesura és el dels Sistemes Automàtics d'Informació Hidrològica. Aquests sistemes, implementats a totes les conques hidrològiques espanyoles, integren observacions meteorològiques i d'estacions d'aforament, transmetent les dades en molt alta resolució temporal a una seu central, on s'integren. El resultat convenientment analitzat permet establir els nivells d'alarma per a donar avís de la imminència de grans crescudes fluvials o inundacions.

Millores en l'observació convencional.

La informatització

Les millores en l'observació i la comunicació de les dades generades no tindrien un aprofitament òptim si alhora no s'hagués potenciat la capacitat de càlcul i anàlisi de les dades. En aquest aspecte entra en consideració l'avenç de la informàtica i la seva creixent capacitat de càlcul i d'emmagatzematge de dades.

La predicció meteorològica requereix una capacitat de càlcul elevada i d'alta disponibilitat perquè, precisament, com més aviat arriben els resultats als centres estatals més eficaç és la predicció meteorològica que es fa arribar al públic. Per això calen complexos sistemes informàtics interconnectats que fan de manera automatitzada diferents operacions des del mateix càlcul fins a la representació gràfica, l'emmagatzematge o el reenviament a altres xarxes informàtiques. Hom sempre ha comentat que els superordinadors més potents en diferents països estaven destinats a les forces armades i als serveis meteorològics.

Però la tasca de càlcul massiu i ràpid per a la predicció meteorològica no és l'única etapa en el tractament de les observacions. Una tria de les dades que són recollides diàriament passen a constituir el fons de dades climàtiques. Alguns centres de recerca s'han especialitzat en la modelització climàtica, per a la qual cosa necessiten un model climàtic que no és més que un sistema d'equacions que reproduïx les interrelacions dels diferents elements climàtics al planeta. Sobre aquest model s'introdueixen les dades climàtiques disponibles i es forcen o se simulen les situacions que hom espera per a un futur proper. Ara per ara, aquesta és la metodologia aplicada en la caracterització dels canvis climàtics que la intervenció de l'home per l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle pot arribar a produir.



FIGURA 2. Aparell de recepció de les dades de radiosondatge (a sobre) i llançament d'un dels globus amb la capsa dels sensors (a sota). Observatori meteorològic de Sort.

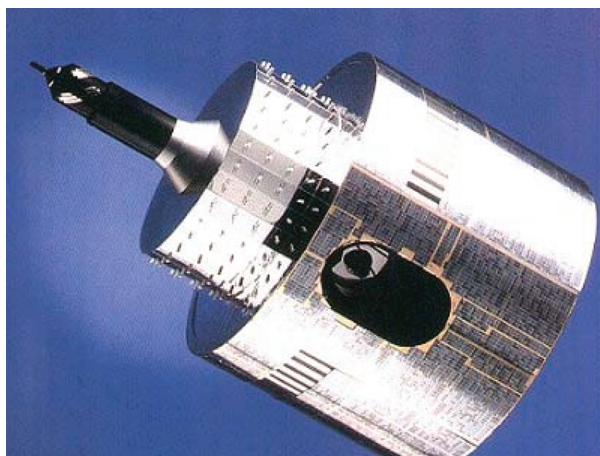


FIGURA 3. Satèl·lit geostacionari de la família METEOSAT.

La teledetecció

El pas definitiu en la diversificació de recursos per al registre de variables meteorològiques ha estat la possibilitat d'observar a distància aquestes variables sense perdre la capacitat de treballar en altes resolucions espacials i temporals. Els protagonistes són plataformes de sensors que durant el segle xx han anat integrant-se en l'observació meteorològica i que en un futur proper proveiran fins i tot d'informació les anàlisis climàtiques.

Seguint un ordre cronològic d'aparició, el primer aparell que es pot considerar una plataforma de teledetecció meteorològica són els sondatges aerològics. Si bé en un primer moment els globus que fan de vehicle eren recuperats per a prendre les mesures dels aparells transportats, actualment la petita estació meteorològica que el globus transporta fa un recorregut lliure cap a l'atmosfera. Tant el vehicle com els sensors es perden un cop han fet les observacions, per la qual cosa les dades cal transmetre-les per ràdio des de la sonda fins a una estació a terra, on són rebudes i analitzades.

Aquest aparell ha resultat un avenç espectacular pel fet de donar-nos a conèixer el veritable comportament de l'atmosfera, atesa la tremenda limitació de conèixer només el comportament a la capa més propera a la superfície, mentre que precisament molts dels processos tenen els principals factors explicatius a les capes més altes de la troposfera i, fins i tot, a la baixa estratosfera. El treball coordinat dels sondatges és de gran ajut, per exemple, en l'avaluació dels moments de major risc de grans precipitacions torrencials a escala sinòptica i, fins i tot, a mesoscala. Altrament, a partir dels vols comercials de reacció ha calgut també tenir un coneixement detallat de l'estat de l'atmosfera en alçada per raons òbvies de seguretat dels aparells.

Els sondatges, en canvi, no són fàcils d'automatitzar i des del seu inici fins a principis del segle xx estan operats pels meteoròlegs. Actualment, per convenció, les estacions que tenen radiosondatge l'efectuen dos cops al dia, generalment un al migdia i un a mitjanit.

L'altra plataforma desenvolupada durant la Segona Guerra Mundial és el radar. El seu primer ús militar tenia com a objectiu la detecció de naus i aeronaus de manera llunyana i independent de les condicions meteorològiques. Amb el temps, la diversificació de freqüències de ràdio emprades pels aparells permeté la percepció d'altres elements no tan precisos, com les formacions de núvols. Les primeres utilitzacions en aquest sentit foren radars molt senzills aerotransportats que permetien als avions la detecció precoç de grans tempestes i poder així evitar-les.

La veritable utilitat meteorològica, més enllà del simple advertiment, ha arribat amb l'aplicació dels radars de tipus Doppler. Amb aquests radars, una estació fixa terrestre pot fer un seguiment instantani de les formacions núvoloses i la pluja associada, i donar mesura de la densitat

de la precipitació. Els models de radar més moderns tenen capacitat per a registrar el desplaçament de la precipitació oferint dades sobre la direcció i velocitat del fenomen. En el cas de detectar-se pluges torrencials, el radar pot, a més, proporcionar informació precisa dels sectors geogràfics que poden patir-ne els efectes i una previsió del temps transcorregut fins a l'inici dels aiguats. El radar, doncs, esdevé una eina amb una important i valuosa capacitat predictiva per a tots aquells episodis de pluja generadors d'inundacions, riudes i estralls a les poblacions.

La darrera plataforma que cronològicament ha entrat en l'observació meteorològica són els satèl·lits. La seva missió bàsica iniciada durant la Guerra Freda era observar el planeta sense cap impediment. D'aquesta primera utilitat militar, com en el cas del radar, es va passar a una aplicació meteorològica sense gaire adaptacions. Les capacitats d'observació s'han centrat especialment en l'espectre electromagnètic, treballant en les amplituds del visible i l'infraroig de manera majoritària. Actualment té ja poca utilització la fotografia tramesa a distància, tot i que els satèl·lits en un principi no eren més que «càmeres indiscretes» a gran alçada. D'aquelles «fotos» hom ha passat a les actuals imatges amb una major capacitat de seleccionar les amplades de banda que més poden interessar a l'observació o la recerca, més enllà d'una simple imatge de l'espectre visible. Un dels arguments bàsics, malgrat la qualitat dels aparells fotogràfics, és l'absoluta impossibilitat de rebre informació durant les hores nocturnes per manca de llum, cosa que generaria dificultats en el seguiment de determinats fenòmens atmosfèrics.

Actualment, les imatges rebudes des de satèl·lits suposen la vigilància meteorològica més avançada i un dels mitjans que millor han entrat en els «domicilis» i a la vida quotidiana del públic general, ja sigui com a reforç dels butlletins meteorològics televisius o de la premsa, ja sigui mitjançant l'accés a webs d'Internet de centres de recerca o serveis meteorològics que en permeten un ús directe.

Els satèl·lits són de dos tipus bàsics. Els *geoestacionaris* tenen una òrbita allunyada uns trenta-cinc mil quilòmetres de la Terra, que els permet tenir una posició fixa i donar una imatge sempre referida al mateix sector geogràfic. D'aquesta manera, les sèries d'imatges enviades a la Terra permeten percebre la successió o els moviments de les masses d'aire i les pertorbacions associades amb força precisió malgrat la distància. Evidentment, la cobertura del planeta llavors cal fer-la amb un conjunt de plataformes que es distribueixen en situació propera a l'equador terrestre i en diferents longituds geogràfiques. Els satèl·lits operatius el 2002 eren els següents:

Pacífic est	GOES-10	Estats Units (NOAA)
Atlàntic oest	GOES-12	Estats Units (NOAA)
Atlàntic est	METEOSAT-7	Europa (EUMETSAT)
Oceà Índic	GOMS-N1	Federació Russa
Oceà Índic	FY-2B	Xina
Oceà Índic	INSAT II-E	Índia
Pacífic oest	GMS-5	Japó

Un segon grup de satèl·lits són els *d'òrbita polar*. Aquests circulen a molt poca distància de superfície, uns vuit-cents

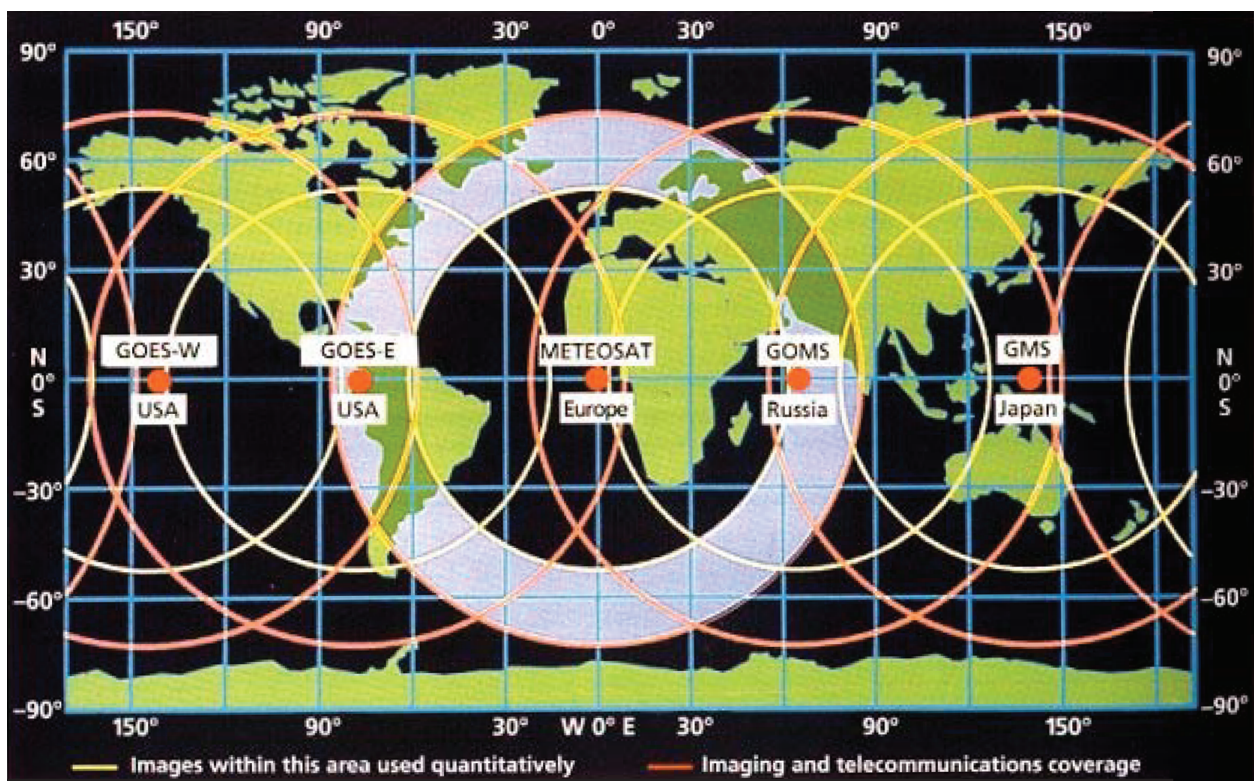


FIGURA 4. Cobertura planetària dels satèl·lits geoestacionaris.

quilòmetres, cosa que els permet obtenir imatges de molta qualitat i resolució, però, en canvi, poden oferir poques imatges d'un mateix indret atesa la seva contínua circulació al voltant del planeta. Aquests satèl·lits, gràcies a la qualitat d'imatge i els detalls que poden proporcionar, tenen un ús mixt civil i militar, i sens dubte participen molt estretament en les operacions militars modernes. Els satèl·lits d'aquest tipus més coneguts són:

NOAA-14	Estats Units
NOAA-15	Estats Units
NOAA-16	Estats Units
DMSP-F13	Estats Units, ús militar
DMSP-F15	Estats Units, ús militar
METEOR 3M-N1	Federació Russa
FY-1C	Xina
METEOR 2-N21	Federació Russa
METEOR 3-N5	Federació Russa

Tècniques de reconstrucció climàtica

La recerca climàtica tindria seriosos problemes per a aprofundir els coneixements científics si només disposés de les dades procedents de l'observació instrumental. Bona part dels fenòmens i processos que constitueixen la variabilitat climàtica natural tenen unes freqüències i unes magnituds temporals que superen àmpliament el període per al qual hi ha disponibilitat de dades instrumentals (entre 50 i 100 anys segons el tipus de variables i la seva densitat).

Evidentment, per a conèixer les característiques de la variabilitat climàtica detalladament calen tècniques que permetin accedir a testimonis d'informació que mitjançant procediments complexos i alhora fiables obtinguin dades equiparables a les de l'observació instrumental. Això s'aconsegueix amb un ventall d'indicadors paleoclimàtics que durant segles han emmagatzemat informació ambiental que actualment es pot extraure per a arribar a reconstruir unes variables meteorològiques fiables. No es poden detallar totes les tècniques i indicadors potencialment útils, però se'n pot donar una mínima classificació:

1. *Paleoindicadors físics.* L'exemple dels testimonis de glaç obtinguts en els casquets antàrtic o groenlandès són molt importants. A més d'una bona datació pels estrats que forma el gel després de compactar la neu acumulada, l'oxigen confinat dins el gel dona una sèrie d'informacions sobre la composició atmosfèrica i les seves condicions climàtiques bàsiques per al període en el qual aquestes grans illes han acumulat gel. Al voltant de 3.500 m de gruix de glaç en els respectius casquets d'ambdues localitzacions ofereixen un registre que comprèn el darrer cicle glacial complet (uns cent cinquanta mil anys). La seva recerca no ha estat possible fins que els recursos tecnològics no han permès l'extracció de mostres a tals profunditats, en un medi hostil, i

assegurant que les mostres no es contaminarien en el procés. Finalment, els avenços en les anàlisis químiques han permès, mitjançant l'estudi de la descomposició isotòpica de l'oxigen i d'altres elements, no tan sols la datació, sinó també la caracterització climàtica quasi directa: és el que hom anomena els *paleotermòmetres*.

2. *Paleoindicadors biològics.* Els arbres, a més de tenir una longevitat envejable, tenen la capacitat de reflectir any rere any en el seu organisme les condicions climàtiques del seu entorn immediat. El creixement anual en forma d'anells en permet l'estudi quantitatiu, tant pel gruix d'aquests anells com per la densitat de la matèria continguda. Altres indicadors de caràcter ambiental treballen sobre els dipòsits de pol·lens i llavors. Allà on aquests es poden acumular de manera estratificada, com llacs i llacunes, els sondatges poden extreure testimonis i veure així les comunitats vegetals predominants en el transcurs dels darrers mil·lennis.

3. *Paleoindicadors culturals.* L'home no només ha arribat recentment a disposar d'un nivell tecnològic suficient per a fer mesures meteorològiques instrumentals. Des de temps enrere, les tècniques escripturals han permès que deixés un testimoni escrit d'allò que en el tarannà històric li ha comportat un cert grau d'impacte o afectació. Des de la vessant climàtica, l'home ha anat deixant testimonis d'aquests impactes, ja sigui en descripcions directes de fonts documentals públiques i privades, com de manera indirecta en documents de caràcter administratiu, fiscal o notarial. Una font força vàlida malgrat la seva aparença formal són els registres de cerimònies de rogatives per motivacions ambientals (sequeres, pluges continuades, fred, plagues i epidèmies); una prova que l'aparença dels documents no ha pas de reflectir directament l'interès dels seus continguts. La qüestió d'extreure la informació històrica no resulta fàcil, i calen tècniques auxiliars, com la paleografia, per a una correcta interpretació dels textos; la metrologia, per a transformar correctament les unitats de mesura referides en els documents, i la cronologia, per a una adequada datació dels fets segons els tipus i estils de calendaris utilitzats.

Tot aquest conjunt de tècniques és tan necessari per a caracteritzar el clima del passat com per a conèixer-ne la variabilitat en un futur immediat. La modelització climàtica, que centra els seus esforços a preveure el comportament climàtic i la seva resposta incloent el factor humà (bàsicament l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle), requereix dades per a furnir els models i per a validar els assaigs que es fan sobre el passat.

Conclusions

La recerca meteorològica i climàtica ha avançat de manera molt important en els darrers segles. S'han deixat enrere molts dels prejudicis, temors i supersticions que vinculen tot el que passa a l'atmosfera i l'espai a causes absoluta-

ment errònies. Hem arribat a conèixer bona part dels processos que participen en l'explicació de la variabilitat climàtica i, en bona mesura, també en els de la variabilitat induïda per l'home. La tecnologia ha estat al darrere d'aquest impuls científic i ha permès que l'observació, la mesura, l'emmagatzematge i l'anàlisi de les variables naturals deixessin de donar problemes logístics i limitacions físiques, fins a arribar a l'actualitat al desplegament de mitjans i sensors que permeten tenir una imatge del comportament meteorològic diari molt precisa i, alhora, conservar-la per a la posterior recerca climatològica.

Això ens fa uns privilegiats, però amb aquests mitjans hem d'afrontar un repte mai no plantejat: l'home incideix ja d'una manera evident en el clima i no tenim cap referent previ dels efectes que això pot suposar. Després de milers d'anys de civilització, les incerteses per al futur i la necessitat de saber-ne quelcom, paradoxalment, continuen presents a la societat com una preocupació plenament vigent. La incertesa meteorològica està força atenuada pel desplegament de mitjans en l'àmbit mundial, però ara ha aparegut amb força la incertesa sobre el futur de la dinàmica o la variabilitat climàtica. Dintre el ventall d'incerteses, l'àmbit de la Mediterrània té una problemàtica molt específica amb el tema de la gestió de l'aigua. Aquest recurs bàsic fàcilment esdevé un risc natural per causa de les seves manifestacions extremes, ja siguin sequeres o pluges torrencials. En aquest context, quan de manera natural la precipitació ha estat força irregular segons els testimonis dels darrers segles, no es pot esperar que la situació millori, atenent a les previsions dels models climàtics que comencen a treballar sobre precipitació. Llavors, només resta optar per la continuïtat en els esforços del conjunt de la societat a fer que aquest recurs permeti un desenvolupament sostenible, uns esforços que podrien sintetitzar-se en els requeriments següents per a diferents àmbits:

1. En l'àmbit científic, millorar la predicibilitat dels riscos i de la variabilitat climàtica.

2. En l'àmbit dels tecnòlegs, desenvolupar i implementar recursos tecnològics per millorar la sostenibilitat del recurs, tant pel que fa a tecnologia per a mitigar els impactes, com a la tecnologia per a millorar l'eficiència en la seva explotació com a recurs.

3. En l'àmbit polític, encaixar i portar a bon terme aquelles estratègies socioeconòmiques que minimitzin el component de risc i maximitzin la sostenibilitat del recurs.

Però tot això seria esforç estèril si la població no té una clara voluntat de seguir les indicacions de les administracions pel que fa l'exposició o vulnerabilitat davant el risc i els consells o pautes de conducta definides per a l'aprofitament òptim del recurs. ■

Bibliografia

BRADLEY, Raymond S. *Paleoclimatology*. San Diego: Academic Press, 1999.

BRADLEY, Raymond S.; JONES, Philip D. *Climate since AD 1500*. Londres: Routledge, 1992.

FIERRO, Alfred. *Histoire de la météorologie*. París: Denöel, cop. 1991.

GROVE, Jean M. *The little ice Age*. Londres: Routledge, cop. 1988.

Adreces d'Internet

Pàgina personal de Joan Arús

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Hangar/3283/>

Ramon Baylina, Observatori Meteorològic de Sort, Lleida

<http://www.meteosort.com>

Organització Meteorològica Mundial

<http://www.wmo.ch>