

# Mirar des de l'espai. Introducció a la teledetecció

per Josep M. Camarasa

El present article ens introdueix al coneixement de les tècniques anomenades de teledetecció o de percepció remota que permeten de superar els límits físics de la visió humana. L'autor ens ofereix un breu resum dels fonaments teòrics de la teledetecció i una descripció de les diferents teories utilitzades, de gran aplicació en el camp de les ciències de la Terra.

*Josep M. Camarasa (Barcelona, 1946), llicenciat en biològiques per la Univ. de Barcelona. És cap de la Secció d'Estudis dels Recursos de la Direcció Gral. de Política Territorial del dept. de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya.*

## La teledetecció

Una gran part del coneixement que tenim del món que ens envolta és fruit de la percepció que en tenim mitjançant els nostres sentits, molt especialment el de la vista. Gràcies a la visió podem adquirir coneixements sobre la forma, el color i la posició relativa de tots els objectes abastables per als nostres òrgans visuals. La visió, però, té unes limitacions que han fet desitjable poder disposar d'instruments i tècniques susceptibles de superar els límits físics de la visió humana. Una d'aquestes tècniques és el que anomenem teledetecció o percepció remota (*remote sensing* en anglès).

De fet, anomenem globalment teledetecció tot un conjunt de tècniques que permeten obtenir informacions sobre la naturalesa i les propietats dels objectes sense contacte físic amb ells, és a dir, a distància, mitjançant la percepció i la mesura de l'energia electromagnètica que emeten o reflecteixen, tant dins del camp visible de l'espectre com en longituds d'ona més curtes (raigs ultraviolats) o més llargues (infraroig pròxim, infraroig tèrmic, microones). Tots els cossos absorbeixen, reflecteixen o emeten energia electromagnètica i les característiques (freqüència, longitud d'ona, intensitat, etc.) d'aquesta energia absorbida, reflectida o emesa varien d'uns materials i d'uns objectes als altres en funció de les seves propietats. Per això mateix l'observació mitjançant instruments adequats de les característiques

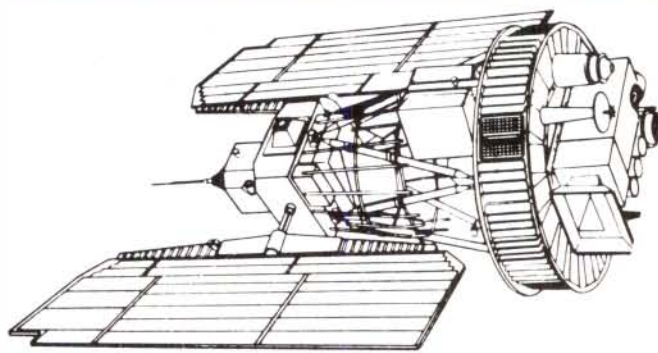


fig. 1 Satèl·lit LANDSAT

de la radiació emesa o reflectida per un objecte pot proporcionar informacions rellevants sobre la naturalesa d'aquest.

Les eines fonamentals de la percepció remota, els instruments que fan el paper dels ulls en aquest mirar de lluny en què consisteix en definitiva la teledetecció, són els sensors. Els sensors són instruments o dispositius que poden copsar les característiques de les radiacions emeses o reflectides pels diferents objectes en el seu camp de "visió" i enregistrar-los o transmetre'ls a d'altres dispositius o sistemes. La varietat dels sensors, tant pel que fa a la mena de radiacions a què són sensibles com a la seva forma de funcionament, és considerable. Va des dels purament fotoquímics sensibles únicament a la llum visible, com les càmeres fotogràfiques dotades de films amb emulsions normals, fins als radars laterals o verticals, basats en la utilització de radiacions de longitud d'ona més llarga (de l'ordre dels 8-10 mm).

De molt, els sensors remots més coneguts i més usats fins ara han estat les càmeres fotogràfiques. La fotogra-

fia aèria, i, més recentment, la fotografia des de globus estratosfèrics o des de satèl·lits artificials permet obtenir imatges de la superfície de la Terra que l'ull només podria copsar excepcionalment o, en el cas de les emulsions sensibles a l'infraroig, que no podria copsar de cap manera.

## La fotografia aèria

els principis bàsics en què es basa la fotografia són prou coneguts i no en parlarem aquí. Val la pena, però, donar una breu visió del que és la fotografia aèria.

Tot i que sembla que la primera fotografia aèria de la història fou presa el 1858 pel fotògraf francès Nadar des d'un globus, no fou fins molts anys més tard que un oficial japonès, durant la guerra sino-japonesa de 1894-95, inicià el desenrotllament de la fotografia aèria vertical, base de la fotogrametria, la qual començà a desenrotllar-se a partir de la Primera Guerra Mundial. Al llarg d'aquesta els

fig. 2

Principi esquemàtic de funcionament del sistema de mesura i de registre (ARV).

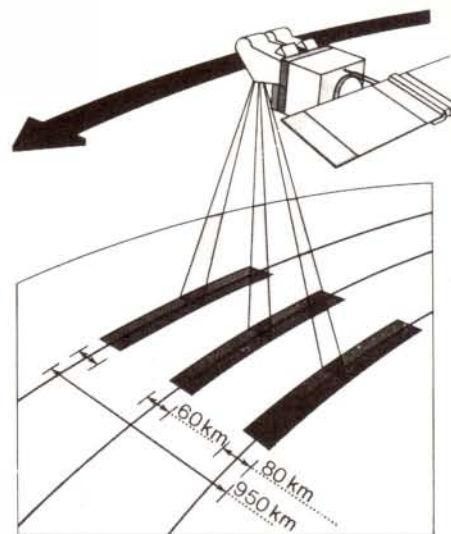
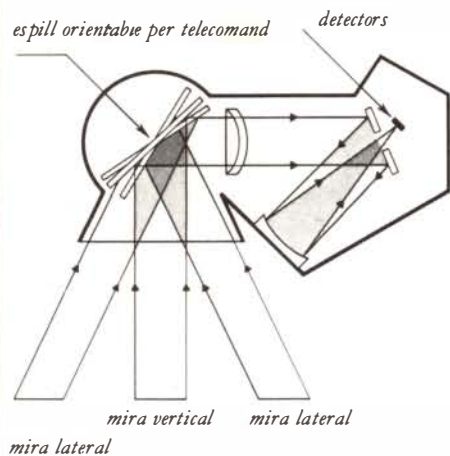


fig. 3

Funcionament de la mira lateral del satèl·lit SPOT que permet, per telecomand, enregistrar i observar regions que no escauen necessàriament a la vertical del satèl·lit.

progrés de l'aviació foren considerables i permeteren iniciar operacions sistemàtiques de reconeixement fotogràfic adreçat a la restitució de plànols topogràfics o a la localització d'objectius militars. Com que hom ja coneixia els principis del mesurament estereoscòpic, s'esmerçà a obtenir sèries de fotografies que, per parells, permetessin la visió i la restitució estereoscòpiques. Això exigia que les fotografies contigües es recobrissin entre elles uns dos terços i, per tant, calia fer un nombre relativament gran de fotografies en un temps relativament curt i a intervals proporcionals a la velocitat de l'avió i a l'alçada de vol d'aquest; calia també que l'eix de totes les fotografies fos tan rigorosament vertical com fos possible. Totes aquestes exigències tècniques obligaren a passar de l'operador manual amb una càmera convencional a les càmeres que, mitjançant dispositius de rellotgeria o d'altres, anessin obtenint fotografies verticals a intervals prefixats proporcionals a la velocitat de l'avió i a la seva alçada de vol.

Actualment, a causa de la utilització simultània de diversos tipus d'emulsions sensibles o a la pràctica de l'anomenada fotografia aèria multispectral mitjançant filtres que només deixen passar les radiacions de determinades longituds d'ona, hom utilitza sovint els anomenats sistemes multicàmera i/o multilient.

### El sistema multicàmera

**E**l sistema multicàmera consisteix en un conjunt de càmeres muntades sobre un mateix suport dotada

cada una d'una pel·lícula de característiques diferents o equipada amb un filtre diferent. El sistema multilient consisteix en la utilització d'una única càmera i un únic film però es tracta d'una càmera dotada de quatre, sis o nou objectius (aquests són els nombres més habituals però no cal dir que, si més no teòricament, el nombre pot ser qualsevol), cada un d'ells equipat amb un filtre (o un sistema de filtres) diferent, els quals recullen sobre el mateix film les diferents imatges dels objectes fotografiats corresponents a les bandes de l'espectre lluminós per a les quals és transparent cada un dels filtres.

De fet es pot dir que no hi ha cap tipus de film que no sigui o hagi sigut usat en fotografia aèria: emulsions en blanc i negre pancromàtiques, infracromàtiques (és a dir, sensibles a les radiacions infraroges), ortocromàtiques, etc.; emulsions en color real o en fals color (sensibles a l'infraroig); emulsions espectrozonals amb doble capa; tot ha sigut utilitzat amb unes finalitats o unes altres i de tot s'ha tret profit.

Diguem, però, que les fotografies més habitualment emprades encara avui són les obtingudes amb films pancromàtics en blanc i negre, tot i que progressivament es va imposant l'ús de les fotografies obtingudes amb films infracromàtics o de fals color, és a dir, les sensibles a l'infraroig, sobretot per a tot el relacionat amb l'estudi de la vegetació, de la hidrologia i dels sòls.

La immensa major part dels plànols i mapes topogràfics a escales mitjanes i grans de superfícies extenses que es fan actualment tenen com a document

de base sèries de passades de fotografies aèries panoràmiques. A partir dels successius parells estereoscòpics, mitjançant uns aparells anomenats restituidors, hom pot dibuixar de manera automàtica les corbes de nivell i els accidents del terreny amb una precisió molt gran. Les fotografies en blanc i negre permeten també identificar un gran nombre d'objectes, d'accidents geogràfics o topogràfics, diferenciar determinats tipus de conreus, de vegetació espontània, d'hàbitats humans, vies de comunicació, etc. En realitat, totes les aplicacions de la fotografia aèria procedeixen en principi de l'exploració de fotografies en blanc i negre.

Les fotografies en color natural no ofereixen gaires avantatges sobre la fotografia en blanc i negre, sobretot perquè la qualitat del color resulta generalment discutible (i més, com més alt és el vol), per tal com tendeix a asuaular els contrastos i sempre resulta un xic més blavís del que caldria si no s'utilitzen filtres correctors adequats. Tanmateix no es pot desconèixer la vistositat més gran de moltes imatges en color i la comoditat indubtable que representa en la identificació de determinats objectes o conjunts. La identificació dels diferents tipus de bosc caducifili en una imatge en color presa en el moment adequat de la tardor resulta molt més fàcil i còmoda que en una fotografia en blanc i negre, però altres tipus d'emulsions presenten aquest avantatge mateix junt amb d'altres sense presentar els inconvenients de les imatges en color. Els més importants d'aquests són els films sensibles a les radiacions infraroges —tant els que donen imatges en blanc i

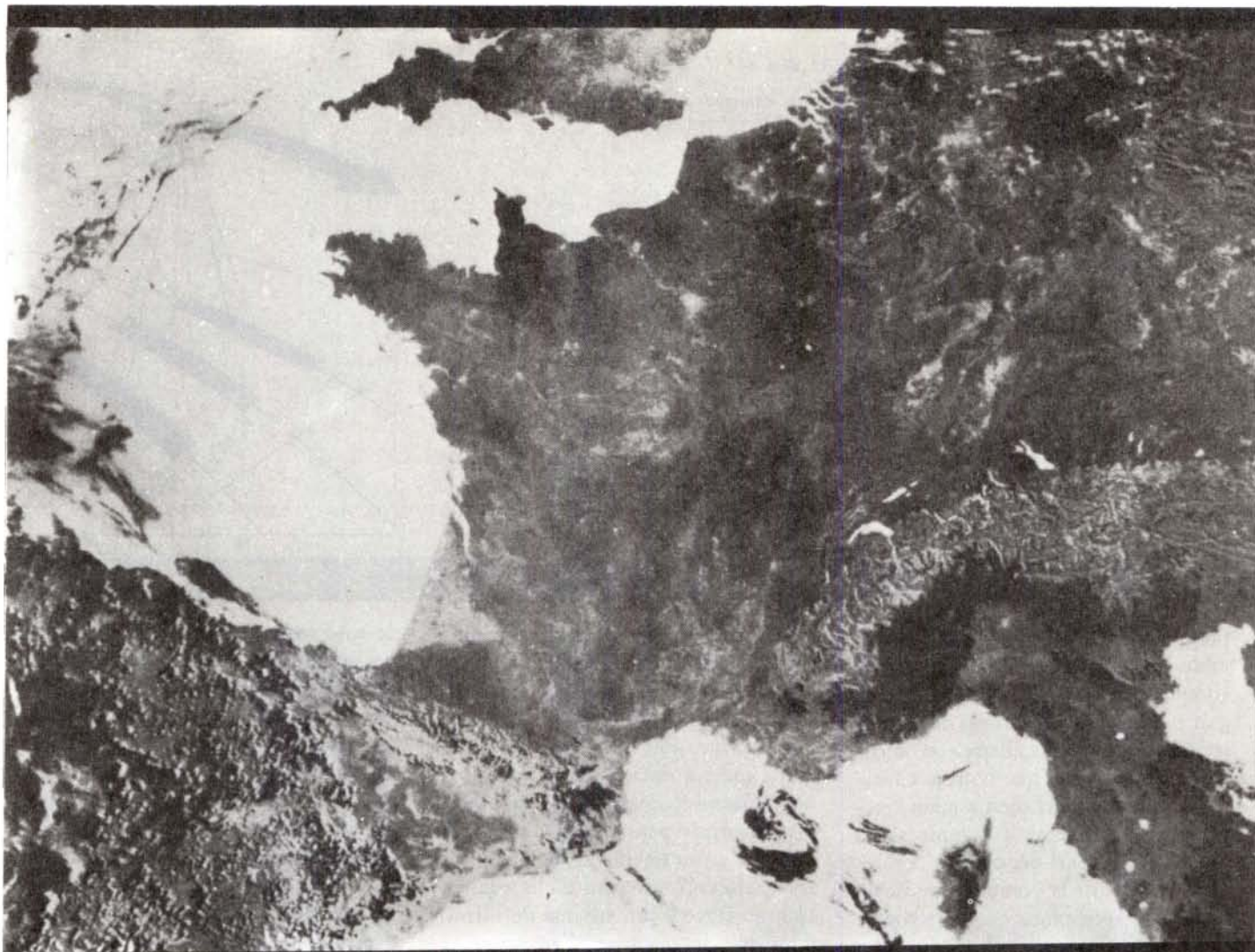


fig. 4

Imatge del satèl·lit TIROS N del 16 de setembre de 1979.

negre com els que les donen en el que s'ha anomenat fals color— per tal com, aquestes sí, forneixen informacions que no són fàcilment accessibles amb d'altres mètodes. La humitat del sòl, l'activitat biològica de la vegetació poden posar-se de manifest mitjançant aquesta mena d'imatges que resulten, doncs, indispensables per als estudis de pedologia, cartografia de la vegetació, ecologia terrestre, en molts estudis agrònoms, etc.

### Els sistemes d'escandiment

A partir dels primers anys seixanta hom ha començat a introduir importants innovacions tècniques en el camp de la percepció remota. Aquest desenrotllament ha anat lligat molt estretament a la tecnologia espacial i ha estat en connexió, sobretot, amb els projectes relatius a determinats tipus de satèl·lits. Algunes

d'aquestes tècniques, concebudes inicialment amb finalitats militars o d'espionatge, han conegut posteriorment una difusió relativament àmplia; aquest és el cas dels sistemes d'escandiment, (*scanning*, en anglès), principalment del sistemes d'escandiment multispectrals (MSS, *Multispectral scanning*, en anglès).

El fonament dels sistemes d'escandiment no és gaire complicat. Consisteix a anar mesurant la intensitat de radiació reflectida per petites porcions de la superfície que es vol estudiar l'una darrera l'altra al llarg d'un rengle i anar repetint l'operació al llarg de rengles adjacents fins a completar l'"exploració" o "escandiment" de tota la superfície de què es tracta. S'assembla al sistema de presa de vistes de la televisió en els quals un feix d'electrons explora el camp de la imatge que es tracta de captar tot descomponent-la en elements disposats en rengles successius de manera que cada un dels elements correspon a un senyal electromagnètic susceptible de ser tramès i després reproduït en la pantalla del televisor. En el cas dels sistemes d'escandiment usats en percepció remota (val a dir que, de fet, la televisió

tambe ha de ser considerada sensor remot), el funcionament és purament passiu i es limita a registrar, prèvia mesura, la intensitat de radiació de cada petita porció de superfície terrestre que escombra.

D'una manera esquemàtica podem dir que l'element bàsic del MSS és un mirall oscil·lant que, en cada una de les seves oscil·lacions (perpendiculars al sentit del moviment de l'aparell portador, sigui un satèl·lit o un avió), escombra una banda de terreny d'unes desenes de metres d'ample per unes desenes de quilòmetres de llarg. Mitjançant un sistema òptic relativament complex que resultaria massa prolix de descriure (al mateix temps que escassament útil com a referència per tal com és la part que varia més d'uns sistemes d'escandiment a uns altres),<sup>1</sup> les radiacions captades pel mirall a cada un dels elements en què divideix cada banda escombrada arriben a un instrument adequat que en mesura la intensitat i trameta el resultat d'aquesta mesura a un sistema de registre.

1. Tanmateix, tothom que estigui interessat pel tema pot consultar el "Data Users Handbook, NASA/GSFC" editat per la NASA a Greenbelt (Maryland - EUA).

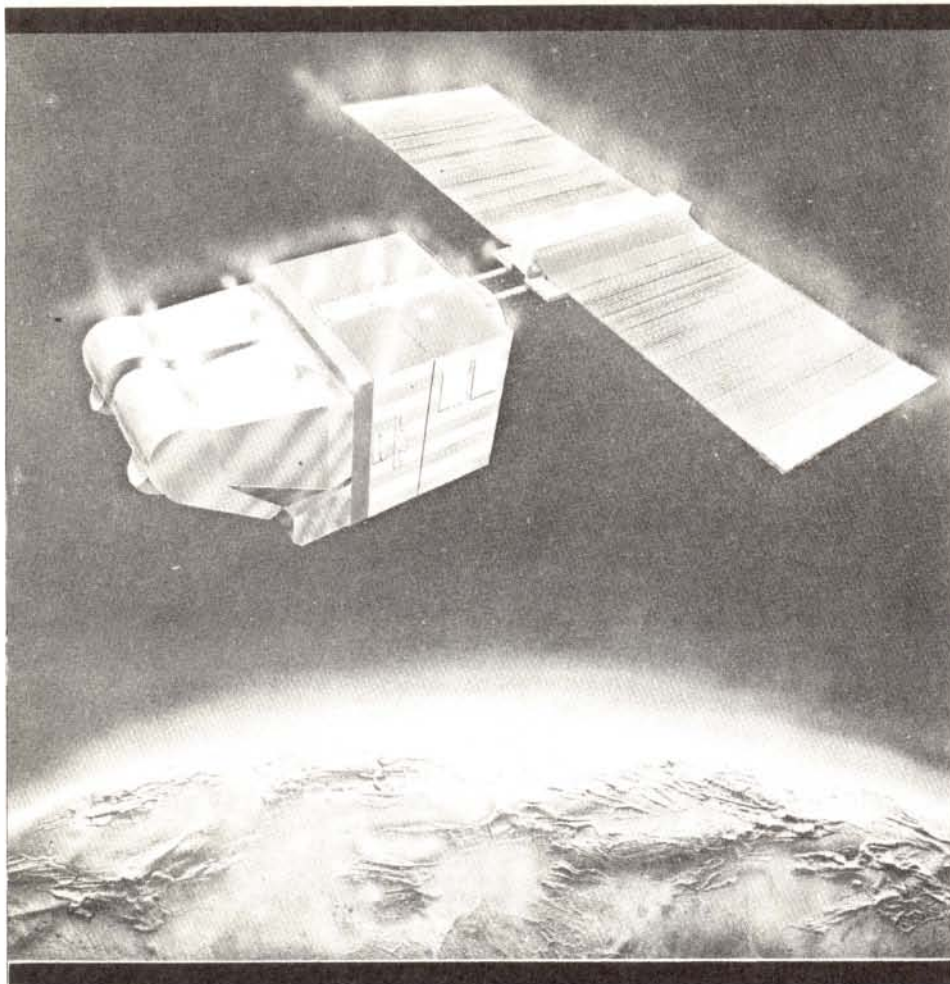


fig. 5

Satèl·lit SPOT.

## Altres sensors

Les càmeres fotogràfiques i els sistemes multispectrals són, de molt, els sensors més àmpliament utilitzats en el reconeixement i l'estudi dels recursos naturals. No són, però, els únics, encara que acompanyant aquest text només mostrem imatges procedents d'aquestes dues fonts.

Les càmeres de televisió són també força utilitzades. La NASA n'ha situat en òrbita més d'un centenar en els últims quinze anys, algunes d'elles associades a sistemes d'escandiment. La seva funció no és gaire diferent de la d'una càmera fotogràfica, per bé que el seu registre resulta menys exacte. En el cas de la càmera de televisió la imatge captada per l'objectiu no és projectada sobre l'emulsió sensible del film, sinó que es forma dins d'un tub detector que és escombrat per un feix d'electrons i és transformada en impulsos elèctrics que són amplificats i tramesos (o enregistrats).

Hom utilitza també sensors tèrmics semblants als que s'apliquen als sistemes multispectrals però sensibles a les radiacions de l'infraroig tèrmic que l'atmosfera deixa passar sense absorbir-les.

Finalment, cal esmentar que comença a prendre volada la utilització de les microones, és a dir, del radar. En aquest cas el sensor no és passiu sinó actiu, és a dir, que emet radiació i que el que mesura és la reflexió de l'energia que ha emès per part de la superfície objecte d'estudi.

L'operació, naturalment, es repeteix per a successives bandes.

El MSS, a més, tal com indica el seu nom, fa aquesta operació separatament per a diferents bandes de l'espectre electro-magnètic. En el cas del MSS emprat pels satèl·lits LAND-SAT podem dir que les bandes per les quals han pres dades eren les compreses entre 500 i 600 nm (canal 4), entre 600 i 700 nm (canal 5), entre 700 i 800 nm (canal 6) i entre 800 i 1.100 nm (canal 7). Val la pena recordar que les longituds d'ona enregistrades pel canal 4 corresponen al verd i al groc, les del canal 5 al taronja i una bona part del vermell, les del canal 6 a la resta del vermell i a l'infraroig més pròxim i les del canal 7 corresponen de ple a l'infraroig pròxim.

L'enregistrament de les dades d'intensitat de radiació per a cada una de les bandes de l'espectre tingudes en compte (que en la fotografia consistia simplement en la impressió d'una imatge en el negatiu) es fa, electrònicament, sobre una cinta en forma de senyals digitals. Les dades enregistrades d'aquesta manera poden ser visualitzades en forma semblant a la de fotografies infraroges en blanc i negre

o en fals color o bé poden ser tractades numèricament per tal d'obtenir-ne diferents menes de documents.

El MSS no és l'únic sistema d'escandiment utilitzat. Hom usa també força els sistemes d'escombratge sensibles a l'infraroig tèrmic, l'esquema dels quals és ben semblant al d'un MSS d'un sol canal amb l'única diferència que aquest és sensible a les bandes de l'espectre situades entre 3.000 i 5.000 nm i entre 8.000 i 14.000 nm, que són les que poden travessar l'atmosfera sense ser absorbides pel vapor d'aigua que conté aquesta. Els sistemes d'escandiment sensibles a l'infraroig tèrmic permeten obtenir el que s'anomena termograma, és a dir, imatges en què queda reflectida la diferent temperatura de cada un dels punts escombrats pel mirall de l'aparell. Aquests termogrames són documents d'extraordinària utilitat per a la determinació i localització de descàrregues i moviments de masses d'aigua en rius, estuaris, ports i costes, per dreçar mapes geotèrmics o localitzar anomalies tèrmiques de la superfície de la Terra relacionades amb falles i d'altres fenòmens geològics; per al control del trànsit a les ciutats en hores en què no hi ha llum de dia; etc.

## Els vehicles d'on "miren" els sensors

Per "mirar de lluny" la superfície de la Terra cal enlairar-se més o menys segons el nivell de percepció a què hom aspiiri, l'escala a què hom la vulgui veure. Per això la imatge dels sensors remots és indistinguible de la de les plataformes que el transporten, sobretot de les plataformes aèries i espacials que són les que han permès obtenir les imatges que acompanyen aquest text.

Els vehicles que més habitualment transporten sensors són els avions. No qualsevol avió, és clar. Cal que siguin avions especialment equipats, amb una certa autonomia (de vegades molt gran) i uns determinats sostres de vol. Els més perfeccionats d'aquests són els anomenats avions espies.

Generalment els avions usats en treballs de percepció remota disposen d'una o més tapes a la part inferior on van degudament encaixats els sensors. Són també capaços de mantenir una gran estabilitat tant pel que fa a la velocitat com pel que fa a l'altura i la posició respecte a la vertical; si no fos així la qualitat de les imatges no seria prou homogènia ni, en el cas de les imatges fotogràfiques, la part comuna a dues imatges successives seria sempre prou extensa per assegurar la visió estereoscòpica de la totalitat del territori cobert pel vol.

Els primers vehicles des dels quals hom pogué practicar la percepció remota foren els balons. Contràriament al que podria semblar, els progressos de la tècnica aeronàutica i ae-

rospacial no han arraconat aquests vehicles més tradicionals, sinó que els han donat un paper propi com a plataformes de sensors a alçades més grans que les màximes que poden assolir normalment els avions (15.000 metres) i més petites que les mínimes que requereix un satèl·lit en òrbita (300 quilòmetres). Els balons es mouen generalment entre els 30.000 i 40.000 metres d'altura.

De fet els balons presenten alguns avantatges sobre els avions pel fet de la seva manca de vibracions i la baixa acceleració del seu enlairament que els permet transportar determinats instruments que no resulta factible fer portar per un avió. L'inconvenient, en contrapartida, és que no és possible controlar-me els moviments per tal com van a mercè dels vents que bufen i no és possible assegurar un recobriments homogeni d'una zona donada. Tanmateix hom comença a plantejar-se la possibilitat d'introduir una nova mena de balons, els anomenats geostacionaris, que no serien altra cosa que uns balons captius que, periòdicament, podrien enlairar-se sobre un punt determinat tot permetent un reconeixement regular i periòdic dels recursos naturals i de l'ocupació del sòl de l'àrea que envoltés aquest punt.

Els darrers progressos en el camp de la percepció remota han sigut possibles, però, a partir de la utilització dels satèl·lits artificials. Ja el 1959, només dos anys després de la col·locació en òrbita del primer satèl·lit artificial de la Terra, un satèl·lit artificial nord-americà —l'Explorer 6— envià a la Terra una imatge de televisió des de l'espai extraatmosfèric i l'any següent, el primer satèl·lit me-

teorològic —el també nord-americà Tiros I— forní 22.952 fotografies de núvols.

Els satèl·lits artificials són ginys de complicació considerable. Bàsicament, i sense entrar en detalls tècnics sense relleu pel que fa a la tetedetecció, es pot dir que un satèl·lit destinat a la percepció remota consta de quatre parts fonamentals: la carcassa, el control de posició, els plafons solars i el sistema de sensors.

La carcassa, ultra assegurar el suport i la unió de les altres tres parts, conté generalment els sistemes de comandament i de transmissió. El sistema (o subsistema) de control de posició compleix la funció que indica el seu nom, generalment mitjançant sensors solars, escombra-horitzons i toberes de gas; sovint suporta també al capdamunt l'antena de comandament des de terra. Els plafons solars serveixen fonamentalment per captar energia i transformar-la de manera que sigui utilitzable per als mecanismes del satèl·lit. Finalment, el sistema de sensors consisteix en una anella o una plataforma que conté un o diversos dels sensors esmentats abans.

Els satèl·lits artificials destinats a la percepció remota giren entorn de la Terra a altituds compreses generalment entre els 300 i els 40.000 quilòmetres i en òrbites que sempre són o bé geosíncrones o bé síncrones amb el Sol.

Les òrbites geosíncrones o geostacionàries són aquelles que discorren pel pla de l'Equador amb un període orbital igual al període de rotació de la Terra, de manera que el satèl·lit es manté sempre sobre la vertical d'un mateix punt tot girant d'oest a est

fig. 6

Assaig amb un globus estratosfèric al Centre Espacial de Toulouse durant l'estiu de 1978.





fig. 7

Assaig d'un globus estratosfèric en el moment d'èsser inflat.

amb la mateixa velocitat angular de la Terra. Això permet l'observació permanent d'una determinada zona terrestre (mentre el satèl·lit es manté en funcionament correcte, és clar). Les òrbites síncrones amb el Sol sempre passen pels pols o prop d'aquests a altituds relativament baixes (300-1.000 quilòmetres), de manera que el satèl·lit va passant periòdicament pels mateixos punts a la mateixa hora local; aquest és el cas, per exemple, dels satèl·lits LANDSAT o del projectat satèl·lit francès SPOT.

## Aplicacions de la percepció remota

Parlar de les aplicacions de la percepció remota és passar revista a la totalitat de les ciències de la terra en el sentit més ampli i comprensiu del mot. La geologia en tots els seus aspectes, des de la geomorfologia fins a la detecció de jaciments de minerals; la pedologia; la hidrologia; l'oceanografia; l'ecologia; la geografia en totes les seves dimensions; etc. També tenen aplicació en un terreny molt menys científic els sensors situats en satèl·lits: l'espionatge amb finalitats militars entre les grans potències dotades d'aquests satèl·lits (espionatge que també és exercit per aquestes potències respecte a països tercers, siguin aliats o potencials enemics).

L'ús de la fotografia aèria convencional per a aixecaments topogràfics ha esdevingut ja una tècnica de rutina arreu del món i l'ús d'aquesta amb

d'altres finalitats també està prou estès. A la conferència de Tolosa de Llenguadoc sobre Exploració Aèria i Estudis Integrats promoguda per la UNESCO el 1964 —la més important celebrada fins ara sobre el tema—, hom presentà comunicacions sobre geologia, geomorfologia, pedologia, cartografia de la vegetació, agronomia, arqueologia agrària, ordenació del territori, ocupació i ús del sòl, inventari de recursos naturals —en particular recursos forestals, agrícoles, hidrològics i miners—, avaluació de danys provocats per incendis de boscs i sabanes, estimació dels efectes del pasturatge abusiu en regions semiàrides, etnologia, oceanografia litoral, etc., totes elles amb resultats que no podien considerar-se com a assaigs sinó com el fruit d'una tècnica ja ben experimentada i sòlidament establerta, fins al punt que existeixen fins i tot empreses privades dedicades a treballs de prospeccions aèries amb finalitats comercials.

La introducció dels films sensibles a l'infraroig amplià encara el camp d'utilització de la fotografia aèria en matèries com l'ecologia terrestre, l'agronomia —per exemple, amb la detecció de malures o carències nutritives no observables a simple vista— i fins i tot alguns aspectes de la geologia i, encara més, de l'arqueologia. Per exemple, forneix informació sobre el grau d'humitat del sòl, l'activitat biològica dels vegetals i, com que la clorofil·la és un dels millors agents reflectants de la banda de l'infraroig pròxim compresa entre 700 i 900 nm, resulta de gran utilitat per diferenciar espècies vegetals o estats fenològics d'aquestes; sobretot els films de fals

color en els quals les variacions d'intensitat de radiació d'aquesta banda queden registrats en la gamma dels vermells. L'ús d'aquest tipus d'imatges a casa nostra és encara molt limitat però en d'altres països és molt corrent, sovint ja rutinari en determinats tipus d'estudis o de prospeccions.

Pel que fa als mètodes d'escandiment, bé que pels seus resultats visualitzats són comparables amb les fotografies aèries, la facilitat de manipulació automàtica de la informació que contenen els fa un instrument únic d'aplicacions en bona part encara inèdites. Les imatges procedents de satèl·lit ja han començat a donar fruit en permetre la localització d'estructures o fenòmens no apreciables sobre el terreny. Molts arrencaments de relleus o de falles, distribució de determinats paràmetres a la superfície del mar, distribució de grans masses de vegetació, sobretot en àrees poc accessibles des de terra, etc. Les imatges obtingudes des del satèl·lit són, doncs, alguna cosa més que una imatge "bonica" que dona una visió de conjunt d'un país com el nostre pràcticament d'una sola vegada; les seves aplicacions són, per començar, les mateixes de les fotografies equivalents però només el futur ens en dirà els límits. Per altra banda, el tipus de satèl·lit de recursos naturals com els LANDSAT, amb la periodicitat de les seves observacions, permet ja des d'ara pensar en una prospecció de processos dinàmics, és a dir, variables en el temps, que hauria resultat utòpica fa molt pocs anys.

Josep M. Camarasa