

## Il telerilevamento e le orbite satellitari

Tutti noi abbiamo familiarità con le immagini satellitari Meteosat che, trasmesse quotidianamente per televisione o ricevute via Internet, ci informano, praticamente in tempo reale, sulle condizioni atmosferiche che interessano il nostro territorio, rendendo visivamente immediata la presenza di campi di alta e bassa pressione, perturbazioni o situazioni meteorologiche estreme. In realtà il Meteosat è solo uno dei molti satelliti meteorologici (più corretto sarebbe dire "solo una delle molte serie di satelliti meteorologici") che orbitano intorno al nostro pianeta e neanche la più recente, essendo oramai vicina al termine della propria vita operativa. La serie di satelliti di seconda generazione MSG (*Meteosat Second Generation*) è difatti prossima all'inizio delle attività operative, con un primo esemplare, l'MSG-1, già lanciato nel 2002 ed ora in fase sperimentale, ed un secondo, l'MSG-2, pronto a seguirlo nell'immediato futuro; ciascun satellite MSG avrà una vita media operativa dell'ordine dei sette anni. Per l'anno 2005 è poi previsto l'avvio del progetto EPS (*Eumetsat Polar System*), un programma consistente in una serie di tre satelliti identici (METOP 1, 2 e 3), che costituiranno il contributo europeo al cosiddetto IJPS (*Initial Joint Polar System*), un sistema satellitare polare da realizzarsi insieme al NOAA americano. Nelle attuali previsioni, l'EPS dovrà garantire un periodo di operatività di almeno 14 anni, ad iniziare dal 2005, e le sue prestazioni, sebbene principalmente dedicate alla comunità meteorologica internazionale, potranno trovare applicazione anche in altri campi della ricerca.

La storia dell'osservazione satellitare della nostra atmosfera inizia nel 1957, quando l'allora URSS lanciò lo Sputnik 1, che, oltre ad essere in assoluto il primo satellite artificiale, aveva anche l'obiettivo di esaminare la nostra ionosfera; a questo fece seguito, dopo due anni, l'americano Explorer 7, il primo satellite ad essere equipaggiato con strumenti progettati appositamente ai fini meteorologici. Da allora molti sono stati i satelliti utilizzati per monitorare l'atmosfera terrestre e di questi, oltre al già citato Meteosat, le serie di proprietà dell'agenzia statunitense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) sono senza dubbio le più conosciute tra quelle ancora in attività.

Attualmente due sono i segmenti del sistema satellitare meteorologico (**Figura 1**). Il primo è rappresentato dai di-

versi satelliti, cosiddetti *geostazionari*, di proprietà europea, indiana, giapponese, americana e russa, che operano sulla cintura equatoriale e forniscono una copertura pressoché continua, tra circa 70°N e 70°S. Il lancio del primo satellite GOES nel 1974 da parte degli USA fu seguito nel 1977 dal lancio del giapponese GMS e dell'europeo Meteosat (la responsabilità di questo satellite, inizialmente dell'ESA, appartiene ora all'EUMETSAT). Il network aumentò con i lanci, nel 1983, del primo INSAT e, nel 1994, del russo GOMS.

Il secondo elemento costitutivo del sistema comprende i satelliti in orbita *polare*, di proprietà russa e americana, che orbitano ad un'altezza inferiore rispetto ai precedenti, transitando sopra un medesimo punto del globo due volte al giorno, solitamente al mattino e quindi ancora nella notte.

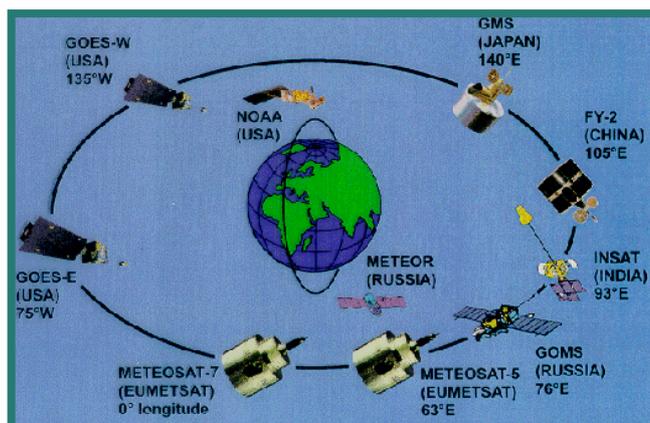


Figura 1  
I componenti dei due segmenti satellitari meteorologici

Tutti questi sistemi satellitari sono stati concepiti per registrare immagini ad alta risoluzione della superficie terrestre e della sua copertura nuvolosa; distribuire i dati (sia immagini che alfanumerici) alle stazioni utenti; acquisire e rilanciare dati ambientali da stazioni fisse o mobili, terrestre o atmosferiche. La **Figura 2** riporta i satelliti geostazionari e polari al momento in attività; su di essi si basa il lavoro dei meteorologi, che utilizzano i loro dati (siano essi immagini o valori numerici) a scopo operativo o come input per i modelli matematici di previsione meteorologica.

Figura 2

Satelliti geostazionari in attività al Luglio 2003; a questi devono essere aggiunti i satelliti polari NOAA 12, 14, 15, 16 e 17 (alcuni solo parzialmente operativi), Meteor 2, Meteor 3, Feng-Yun 1C e 1D.

Ulteriori informazioni sull'operatività della rete satellitare meteorologica NOAA ed EUMETSAT possono essere reperite ai seguenti indirizzi Internet:

- <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/status.html>
- <http://www.oso.noaa.gov/poesstatus/>
- <http://www.oso.noaa.gov/operation/goes-satellite.htm>
- <http://www.eumetsat.de/en/dps/news/spacecraft.html>

SERIE	SATELLITE	LONG.	VISTA
METEOSAT	MSG 1	10° W	Lanciato nel 2002, si trova ora in fase sperimentale; cambierà nome in <i>Meteosat 8</i> con l'inizio delle operazioni di routine.
	Meteosat 7	0°	Atlantico Orientale, Europa, Africa
	Meteosat 6	10° E	In standby
	Meteosat 5	63° E	Asia, Oceano Indiano, Africa Lanciato nel 1991, il quinto satellite della serie <i>Meteosat</i> è stato riposizionato nel 1998, in modo da assicurare la copertura dell'area oceanica indiana.
GOMS/INSAT	INSAT 1D	74° E	Asia, Oceano Indiano, Africa Orientale
INSAT	INSTA 2E	83° E	Asia, Oceano Indiano
Feng-Yun	Feng-Yun 2B	105° E	Asia, Oceano Indiano, Australia
GMS	GMS 5	140° E	Asia Orientale, Pacifico Occidentale, Australia
GOES	GOES 12	75° W	Nord e Sud America, Atlantico Occidentale
	GOES 10	135° W	Pacifico Orientale, Nord America
	GOES 9	155° E	Asia, Oceania

## Il telerilevamento satellitare

Il termine *telerilevamento* indica la tecnica di osservare le proprietà di un oggetto in maniera indiretta, utilizzando i segnali elettromagnetici od acustici che esso produce, in conseguenza della sua forma e del suo stato fisico, chimico o termodinamico. Il telerilevamento satellitare, in particolare, è limitato all'uso delle radiazioni elettromagnetiche<sup>1</sup> quale unico mezzo di trasporto di un'informazione attraverso lo spazio, senza la presenza di un mezzo materiale.

In generale, la radiazione emergente da un corpo è data dalla combinazione di tre effetti:

- l'emissione termica del corpo (presente notte e giorno);
- la radiazione riflessa da un'eventuale sorgente presente nel campo del sensore (tipicamente la radiazione solare nel visibile e vicino infrarosso);
- la radiazione trasmessa attraverso il corpo e proveniente da una sorgente al di sotto del corpo stesso (tipicamente la radiazione termica emessa dalla superficie terrestre).

Per raggiungere il satellite questa radiazione deve attraversare l'atmosfera che, a seconda della lunghezza d'onda della

<sup>1</sup> I concetti di elettromagnetismo richiamati nel prosieguo del testo sono già stati discussi in dettaglio nella seconda parte dell'articolo "L'atmosfera terrestre - Termodinamica dell'atmosfera", pubblicato sul numero 56-novembre 2003 di *Aviazione Sportiva* ed al quale rimandiamo i lettori desiderosi di un ulteriore approfondimento.

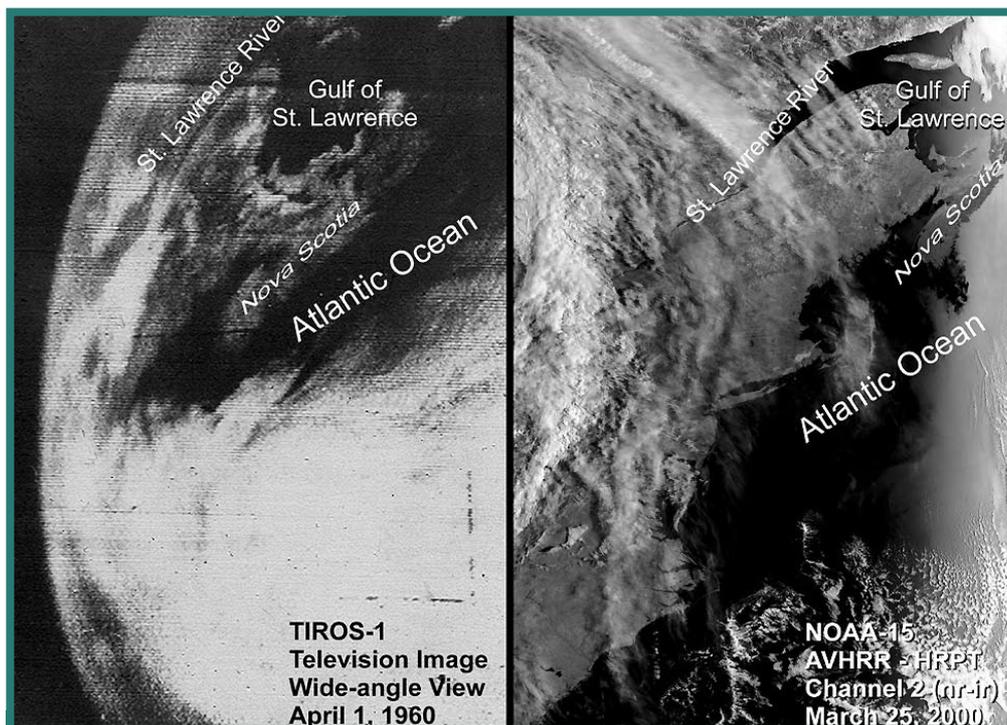
radiazione, può comportarsi in modo più o meno passivo. Infatti:

- l'atmosfera è praticamente opaca alle radiazioni di lunghezza d'onda più corta di 0,4  $\mu\text{m}$ , cioè ai raggi  $\gamma$ , X e ultravioletti<sup>2</sup>;
- si ha trasparenza nella regione del visibile (0,45-0,75  $\mu\text{m}$ );
- nel vicino infrarosso (0,75-3,0  $\mu\text{m}$ ) si alternano bande di trasparenza e linee di assorbimento (per lo più dovute all'acqua  $\text{H}_2\text{O}$ );
- nel medio infrarosso (3,0-30  $\mu\text{m}$ ) si alternano bande di trasparenza e di assorbimento, queste ultime dovute alla presenza di ozono  $\text{O}_3$ , di  $\text{H}_2\text{O}$  e di anidride carbonica  $\text{CO}_2$ ;
- nel lontano infrarosso (30  $\mu\text{m}$ -1mm) si ha quasi completo assorbimento da parte dell' $\text{H}_2\text{O}$ ;

- nelle microonde (1mm-10cm) vi sono picchi di assorbimento di  $\text{H}_2\text{O}$  e della molecola di ossigeno biatomico  $\text{O}_2$ ;
- la trasparenza diventa infine completa nelle UHF (0,1-1m) e VHF (1-10m) fino alle onde radio, che sono assorbite o riflesse dall'atmosfera.

Le bande dove l'atmosfera è trasparente sono dette *finestre atmosferiche*; le principali sono tra 0,4 e 1,0  $\mu\text{m}$ , 3,5-3,9  $\mu\text{m}$ , 10,5-12,5  $\mu\text{m}$  e da 1,4cm in poi. Queste bande sono le più adatte per le osservazioni della superficie, sia terrestre che marina, e delle nubi, tranne che nelle microonde, dove le nubi diventano progressivamente trasparenti. Tuttavia, per la meteorologia, anche le bande di assorbimento sono interessanti: infatti, queste stesse bande sono anche bande di emissione e, quindi, le misure effettuate in queste lunghezze d'onda possono fornire utili informazioni sulla temperatura e composizione dell'atmosfera. Come detto precedentemente, l'unico segnale che arriva al satellite è la radiazione elettromagnetica emessa o riflessa dall'insieme Terra-atmosfera, dalla quale si possono estrarre informazioni differenti a seconda della lunghezza d'onda nella quale si opera. Pertan-

<sup>2</sup> Il *micron*  $\mu\text{m}$  è pari a un millesimo di millimetro e rappresenta l'unità di misura caratteristica per la componente dello spettro elettromagnetico di minor lunghezza d'onda. Per queste radiazioni viene sovente utilizzato anche l'*Angstrom*  $\text{\AA}$ , pari invece alla centesima parte del milionesimo di centimetro o, corrispondentemente, al decimillesimo di micron.



**Figura 3**  
La prima immagine meteorologica satellitare, inviata sulla Terra dal TIROS 1 il 1 Aprile 1960 (a sinistra), e la stessa regione come appare, dopo circa quarant'anni, nella visione infrarossa del NOAA 15 (a destra).

to i sensori installati a bordo di un satellite dovranno essere in grado di raccogliere questa radiazione nelle bande più utili per le osservazioni che si vogliono effettuare. Sebbene i primi satelliti meteorologici utilizzassero tecniche televisive per le riprese di immagini

visibili, come pure avviene oggi in qualche caso, lo strumento base utilizzato attualmente, indipendentemente dalla lunghezza d'onda della radiazione che si vuole raccogliere, viene detto *radiometro*. Un radiometro è uno strumento che consente di rilevare la radiazione elettromagnetica proveniente da qualsiasi corpo presente nella scena ripresa dal sistema ottico a esso associato. L'immagine del globo terrestre viene ottenuta con una scansione, durante la quale il radiometro viene puntato sequenzialmente su ognuna delle aree elementari in cui è stata segmentata la scena d'interesse; nel caso del Meteosat, la scena dell'intero globo terrestre è composta da 2500 righe per altrettante colonne nell'infrarosso e da 5000 righe per altrettante colonne per la banda del visibile. La radiazione elettromagnetica raccolta viene poi inviata verso i vari elementi sensibili alle differenti lunghezze d'onda.

## Orbite polari e geostazionarie

Come già accennato, il sistema meteorologico spaziale comprende due diverse categorie di satelliti: quelli *polari*, ruotanti attorno alla Terra secondo traiettorie passanti per i poli, e quelli *geostazionari*, che orbitano invece con la medesima velocità di rotazione della Terra stessa, apparendo così, ad un osservatore terrestre, sempre fissi nel medesimo punto.

I satelliti polari offrono il vantaggio di una copertura gior-

naliera quasi globale da un'al-

tezza praticamente invariata, mantenendo l'illuminazione solare il più costante possibile; ciascun luogo può dunque essere osservato ogni giorno alla stessa ora solare, a patto che l'orbita sia sempre mantenuta in relazione costante rispetto al Sole (*orbita eliosincrona*). Calcolando accuratamente l'altezza e l'inclinazione dell'orbita è infatti possibile ottenere una precessione che compensi esattamente la rivoluzione della Terra intorno al Sole<sup>3</sup>; i satelliti polari NOAA hanno quote di 850 km con inclinazioni orbitali di 99° e sono così in grado di osservare praticamente tutta la superficie terrestre ogni 12 ore, una volta in orbita ascendente (da sud a nord) ed una volta in orbita discendente (da nord a sud).

Un'orbita geostazionaria viene definita come quella il cui periodo coincide esattamente con quello della rotazione terrestre, ovvero sia al tempo impiegato dalla Terra per ruotare una volta attorno al proprio asse polare, rispetto ad un punto distante fisso<sup>4</sup>. Un satellite è in un'orbita geostazionaria quando appare fermo dal punto di vista di un osservatore posizionato sulla superficie terrestre; ciò può avvenire solo quando l'orbita è contemporaneamente *geosincrona*, circolare e giacente nel piano dell'equatore terrestre (l'orbita geostazionaria è un caso particolare di orbita geosincrona, con *eccentricità*<sup>5</sup> ed *angolo di inclinazione*<sup>6</sup> nulli; in effetti, poiché la Terra ruota a velocità angolare costante, il satellite deve mantenere la propria velocità invariata lungo tutto il tragitto, cioè la sua orbita deve essere circolare).

La possibilità di esplorare le varie zone della superficie terrestre è affidata alla combinazione del moto del satellite con la rotazione terrestre. Per un satellite in orbita polare, la scansione dell'immagine viene ottenuta mediante uno specchio rotante a 45° attorno ad un asse parallelo alla direzione di moto del satellite. Durante la rotazione dello specchio, il

<sup>3</sup> La precessione dell'orbita deve essere pari a 360° annui, corrispondenti a circa 1° al giorno (per la precisione, 0,9856473° per giorno solare).

<sup>4</sup> Questo periodo, detto *giorno siderale*, è pari a 23h 56m 4s ed è di circa quattro minuti più breve della lunghezza del *giorno civile*, che è invece calcolato rispetto al Sole.

<sup>5</sup> Per un'orbita ellittica, l'*eccentricità* è definita dal rapporto tra la distanza di un fuoco dal centro dell'ellisse e il semiasse maggiore; nel caso di orbite circolari l'eccentricità è nulla, venendo i due fuochi a coincidere nel centro della circonferenza.

<sup>6</sup> L'*inclinazione dell'orbita* è l'angolo tra i piani orbitale del satellite ed equatoriale terrestre, misurato in senso antiorario dal secondo verso il primo.

campo di vista dello strumento scandisce una fascia di superficie larga quanto l'elemento di risoluzione del radiometro, generalmente da orizzonte ad orizzonte. La velocità di scansione è sincronizzata con la velocità del satellite, in modo tale che, dopo una rotazione completa dello specchio, la nuova fascia risulti contigua alla precedente; l'immagine viene così costruita linea per linea, grazie alla composizione del moto di traslazione del satellite e del moto di rotazione dello specchio. Nei satelliti geostazionari, il meccanismo di scansione è generalmente diverso da quello descritto: la scansione della linea è data dalla rotazione del satellite attorno al suo asse di simmetria, parallelo all'asse polare terrestre, mentre il telescopio punta verso la Terra; il passaggio da linea a linea avviene mediante lento basculaggio del telescopio da polo a polo.

Nel caso dell'orbita geostazionaria, particolarmente utile quando è richiesta un'alta ripetitività di osservazione (processi convettivi, misure di vento, ecc.), l'equilibrio tra le forze centrifuga e di attrazione gravitazionale<sup>7</sup> comporta che il periodo orbitale risulta uguale a quello di rotazione della Terra per satelliti orbitanti ad una quota pari a 35800 km. Se il satellite viene lanciato nel piano equatoriale da ovest verso est, esso ruoterà alla stessa velocità angolare della Terra ed apparirà fermo sulla verticale del punto di stazionarietà, consentendo così l'osservazione continua di tutto il campo di vista. Lo svantaggio dell'orbita geostazionaria rispetto a quella polare è l'impossibilità di ottenere una copertura globale con un solo satellite; ed anche utilizzando più satelliti tutt'intorno all'equatore, rimane l'impossibilità di osservare le latitudini oltre i 60°. In compenso, l'orbita geostazionaria è l'unica che può consentire l'osservazione dei fenomeni dinamici con tempi di evoluzione inferiori alle 6 ore, fino all'ordine di pochi minuti.

### I satelliti polari

Il primo satellite meteorologico polare venne lanciato il 1 Aprile 1960; chiamato TIROS 1 (*Television InfraRed Observa-*

<sup>7</sup> Altezza orbitale  $H$  e periodo  $T$  sono legati dalla relazione che deriva dall'equilibrio della forza centrifuga e della forza di attrazione gravitazionale  $T = a(1 + H/R)^{3/2}$ , dove  $R$  rappresenta il raggio della Terra ed  $a$  una costante di valore pari a 84,47 minuti.

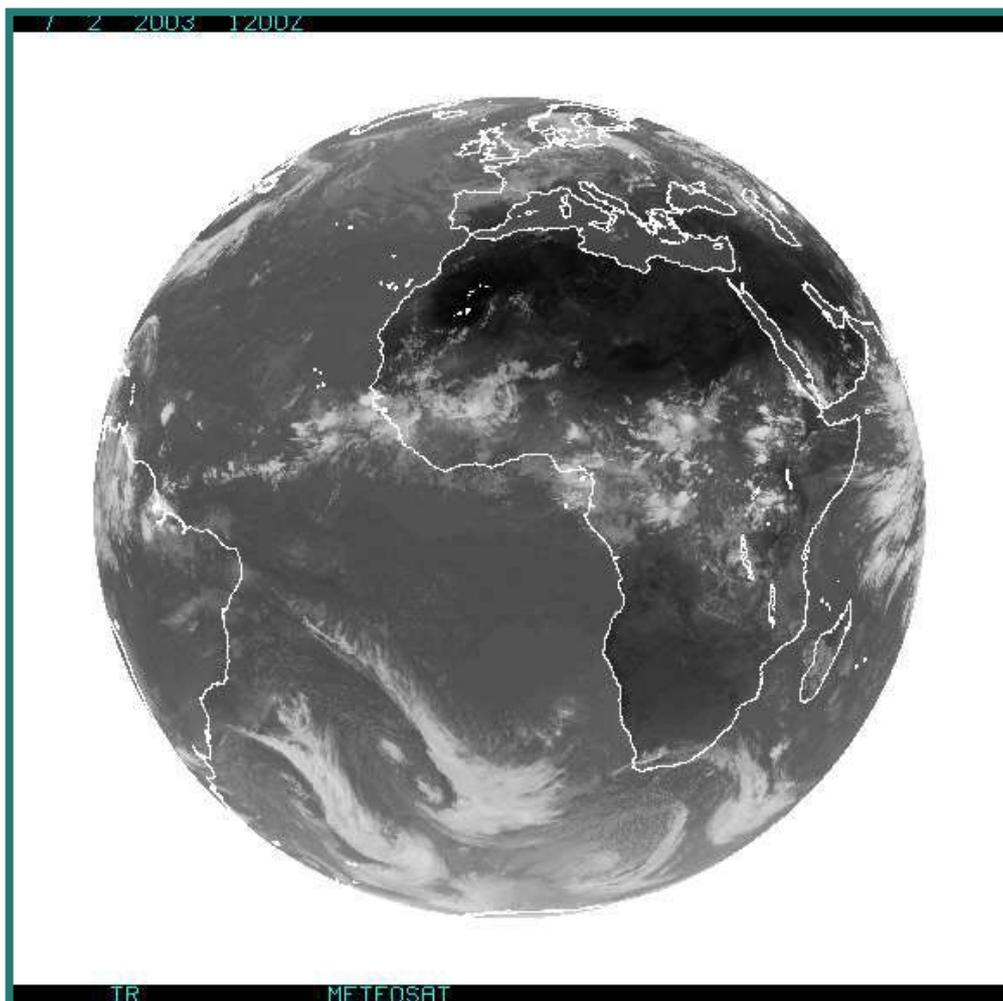


Figura 4  
Il disco terrestre ripreso nell'infrarosso dal satellite Meteosat

*tion Satellite*), dimostrò da subito il vantaggio di poter vedere "dall'alto" la copertura nuvolosa terrestre, evidenziando alcune

caratteristiche morfologiche e alcuni particolari interni alle nubi che oggi ci sono familiari ed ai quali, invece, i meteorologi del tempo non erano preparati, limitati com'erano alla sola osservazione di superficie. Il TIROS 1 trasportava una telecamera puntata verso Terra; le immagini venivano quindi salvate e ritrasmesse a richiesta verso una stazione di Terra. I satelliti della serie TIROS furono dieci; ad essi fecero seguito le serie ESSA (*Environmental Science Services Administration*) e ITOS (*Improve TIROS Operational Satellite*).

Dall'Ottobre 1978 al Luglio 1981 vennero lanciati i satelliti TIROS di nuova generazione (TIROS-N), tra i quali figuravano anche i NOAA 6 e NOAA 7; il 28 Marzo 1983, venne quindi lanciato il primo satellite della serie ATN (*Advanced TIROS-N*), designato come NOAA 8. La NOAA continua ancora oggi ad operare con la serie di satelliti ATN, ultimi dei quali il NOAA 14 e NOAA 16 attualmente in orbita; con il NOAA 15, in particolare, si inaugurò una serie di cinque satelliti caratterizzati dalle elevate prestazioni tecnologiche (**Figura 3**).

Gli strumenti a bordo di ciascun satellite NOAA-ATN permettono la determinazione di molti dei parametri caratteristici sia dell'atmosfera e della superficie terrestri, che della co-

pertura nuvolosa; grazie alle peculiarità dell'orbita polare e all'ampia visuale degli stessi sensori, questi satelliti sono in grado di raccogliere informazioni a scala planetaria su base giornaliera, finalizzandole ad un'ampia varietà di applicazioni, ivi inclusa l'analisi e la previsione meteorologica. Elemento di punta di questa dotazione tecnologica è l'AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), un radiometro che possiede cinque canali di osservazione alla risoluzione spaziale<sup>8</sup> di 1 km: due nella banda del visibile, due in quella dell'infrarosso e uno nella finestra dov'è massimo l'assorbimento della radiazione elettromagnetica da parte del vapore acqueo atmosferico. Come parte della propria missione, i satelliti NOAA-ATN possono anche ricevere, analizzare e rilanciare dati provenienti dai trasmettitori di ricerca e soccorso SAR (*Search And Rescue*) e dalle stazioni meteorologiche automatiche DCP (*Data Collection Platform*), posizionate su boe oceaniche, a bordo di palloni o comunque in località il cui costante accesso risulterebbe problematico per l'uomo (per es., quelle operanti sul continente antartico).

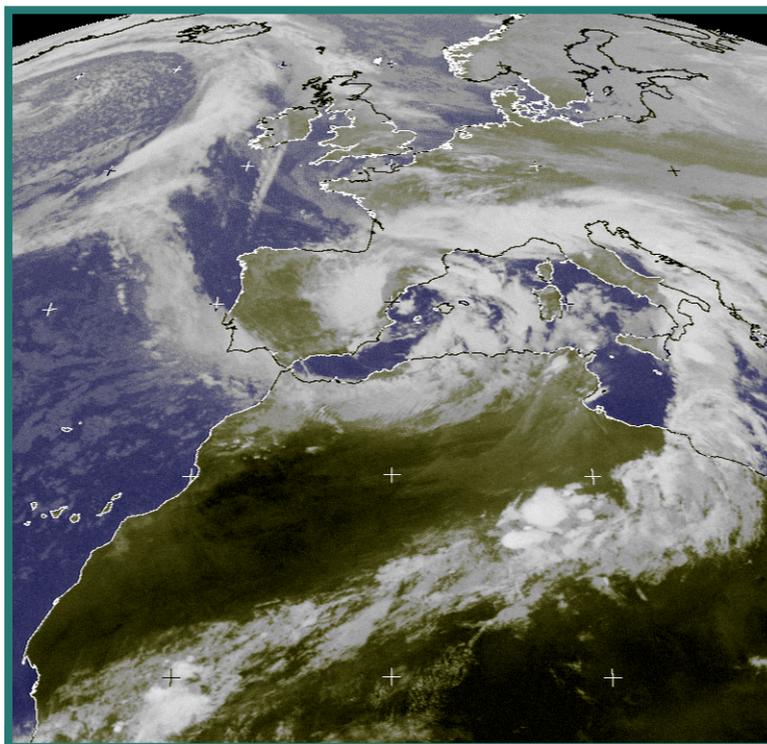


Figura 5  
Un'immagine Meteosat a falsi colori

I satelliti Meteosat inviano i propri dati ogni trenta minuti, utilizzando due tipologie di formato: quello analogico (WEFAX), che consiste in una vera e propria immagine pittorica, sulla quale non è possibile svolgere alcuna elaborazione, e quello digitale criptato (HRI: *High Resolution Image*), consistente nei conteggi rilevati dal radiometro, per ciascuna delle lunghezze d'onda a cui è avvenuta l'osservazione. I dati analogici sono acquisibili mediante una cosiddetta "stazione secondaria" o SDUS (*Secondary Data User Station*), liberamente reperibile in commercio; per

i dati primari è invece necessaria una "stazione primaria" PDUS (*Primary Data User Station*), con un'unità di decrittazione rilasciata da EUMETSAT tramite il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare.

Il radiometro attualmente presente a bordo dei satelliti Meteosat (MVIRI - *Meteosat Visible and InfraRed Imager*) fornisce immagini nelle tre bande spettrali del visibile, vapore acqueo e infrarosso, ad una risoluzione che dipende sia dal canale che dalla posizione dell'area considerata<sup>9</sup>; i satelliti di seconda generazione monteranno invece un nuovo tipo di strumento, detto SEVIRI - *Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager*, in grado di portare a 12 il numero dei canali osservabili.

Due parole, infine, sulla tecnica che permette di creare le immagini satellitari cosiddette *multispettrali* o, più semplicemente, *a falsi colori*. Queste immagini sono ottenute associando ciascuno dei tre colori fondamentali rosso, verde e blu ad un diverso canale spettrale (non necessariamente visibile) e combinando poi i relativi segnali in proporzioni arbitrarie, così da creare un prodotto finale che evidenzia alcune particolari caratteristiche (ad esempio, la percentuale di vegetazione) piuttosto che altre. Quando, come nel caso di **Figura 5**, le bande spettrali vengono combinate in modo tale da ottenere un'immagine che ricordi più da vicino una fotografia a colori (o la mappa di un atlante, cioè con la vegetazione in verde, l'acqua in blu e il suolo in marrone o grigio), l'immagine viene più raramente indicata anche come *a veri colori*, termine che, tuttavia, non deve trarre in inganno, trattandosi pur sempre della rielaborazione artificiale di immagini altrimenti in bianco e nero. ✈️

### Satelliti geostazionari

Immagini dell'intero disco terrestre sono riprese quotidianamente, tra gli altri, dalle serie di satelliti Meteosat di EUMETSAT e GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) della NOAA, posizionati su orbite geostazionarie a circa 35800 km di quota sull'Equatore.

Sfortunatamente, a causa dell'altezza della loro orbita, le riprese dei satelliti geostazionari sono di qualità decisamente inferiore, in termini di risoluzione, rispetto a quelle polari; tuttavia, questi ultimi soffrono dello svantaggio di vedere la propria orbita variare in continuazione, rendendoli così, di fatto, meno idonei, rispetto ai primi, quando si tratta di dover assicurare il continuo monitoraggio di una data località o regione della superficie terrestre, soprattutto per i servizi di veglia nei confronti dei fenomeni meteorologici più violenti. L'altezza dell'orbita è invece sufficientemente elevata da permettere al satellite geostazionario la visione dell'intero disco terrestre (**Figura 4**).

<sup>8</sup> Per *risoluzione* si intende la dimensione lineare del più piccolo elemento d'immagine.

<sup>9</sup> Alle nostre latitudini e longitudini, si ottengono valori di circa 6,7 km nell'infrarosso e di 3,4 km nel visibile ad alta risoluzione.