

I satelliti meteorologici

Nella meteorologia moderna i satelliti svolgono ormai un ruolo fondamentale: grazie a questi "occhi" in orbita attorno al nostro pianeta possiamo monitorare in tempo reale l'evoluzione meteorologica. Dalle osservazioni dei satelliti è possibile inoltre ricavare una mole di dati (temperature, intensità e direzione dei venti, umidità, ...) su vaste aree (oceani e terre scarsamente abitate) altrimenti carenti di misure convenzionali. Questi dati, insieme a quelli registrati dalle stazioni meteorologiche a terra e agli altri sistemi di rilevamento, costituiscono il quadro della situazione meteo "attuale" su cui si basano i modelli di previsione meteorologica per ricavare l'evoluzione futura.

I satelliti meteorologici si dividono in due categorie: *geostazionari* e *polari*.

I **satelliti geostazionari** si trovano alla quota di 35800 km, detta orbita geostazionaria perché il tempo di rivoluzione attorno alla Terra è identico al tempo di rotazione terrestre. Questi satelliti rimangono quindi fissi rispetto alla superficie terrestre e sono molto utili per seguire l'evoluzione dei fenomeni atmosferici. Per ricoprire l'intera superficie terrestre è necessaria una rete di 5 satelliti. Attualmente in orbita geostazionaria sono presenti satelliti europei (**Meteosat**), statunitensi (*GOES*), giapponesi (*MTSAT*), cinesi (*Fengyun-2*), russi (*GOMS*) e indiani (*KALPANA*).

I **satelliti polari** orbitano invece attorno alla Terra alla quota di circa 800km. Un singolo satellite passa solo due volte al giorno sopra la stessa porzione di superficie terrestre: per avere informazioni utili sull'evoluzione dei fenomeni meteorologici sono quindi necessari più satelliti polari e un sistema in grado di coordinare le loro osservazioni. I satelliti meteorologici in orbita polare sono gestiti da Eumetsat (*Metop*) per gli stati europei, dagli Stati Uniti (*NOAA, QuikSCAT*), dalla Russia (*Meteor*) e dalla Cina (*Fengyun-1*).

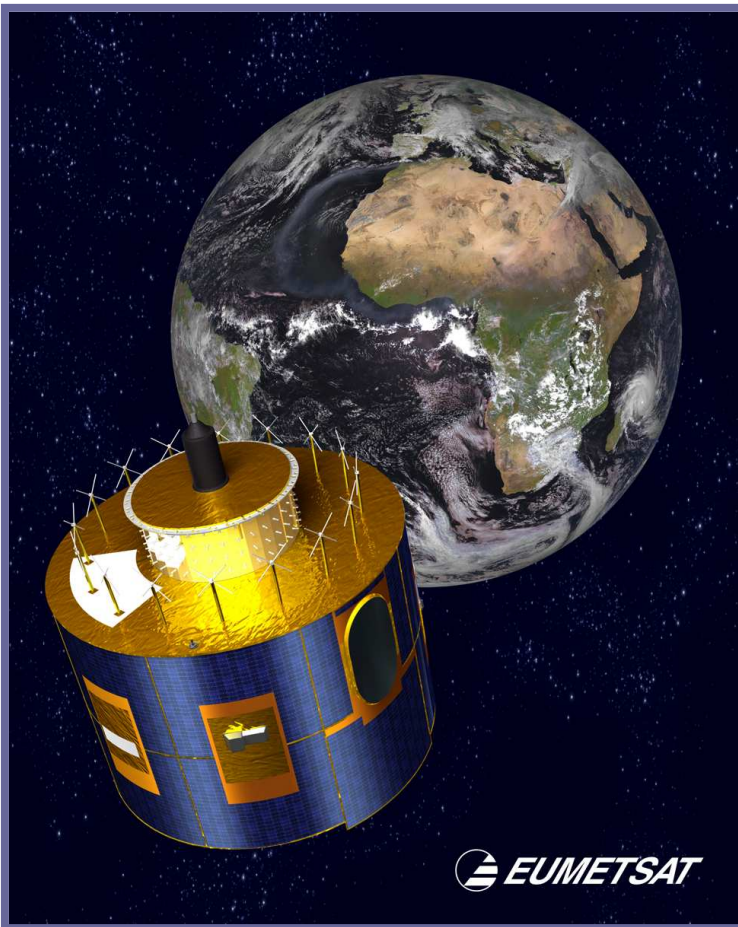


Figura 1. Satellite Meteosat di seconda generazione (fonte:Eumetsat)

Breve storia dell'utilizzo del satellite in meteorologia

Il primo satellite al mondo a portare a bordo strumentazione meteorologica è stato il *Vanguard-2* nel 1959. Il satellite, costruito dalla NASA, andò però distrutto nelle prime fasi della missione per cui non fu possibile recuperare alcun dato. Le prime immagini trasmesse da un satellite meteorologico risalgono all'anno successivo quando la NASA invia in orbita *TIROS-1* (*Television and Infra Red Observation Satellite*). Il *TIROS-1* era attrezzato con due telecamere vidicon, le telecamere standard al tempo usate per le riprese televisive, e rimase operativo per 78 giorni.

Le potenzialità dell'utilizzo del satellite in meteorologia divennero chiare anche al grande pubblico quando nel 1961, grazie alle immagini del satellite dell'uragano "Carla" si riuscì a dare l'allarme prima che questo raggiungesse le coste del golfo del Messico.

Nel 1964 viene lanciato il primo satellite della serie *Nimbus*, sempre dalla NASA. Il *Nimbus-1* è stato il primo satellite polare stabilizzato su tre assi e quindi in grado di puntare sempre i propri strumenti verso la superficie terrestre. E' stato inoltre il primo satellite eliosincrono, ovvero in grado di passare sopra la stessa porzione di superficie terrestre alla stessa ora tutti i giorni, semplificando quindi l'utilizzo delle immagini satellitari a fini previsionali.

Nel 1969 anche la Russia, che nel 1957 era stata la prima nazione a mandare un satellite (lo *Sputnik*) in orbita, avvia il suo programma satellitare meteorologico. Nello stesso anno, con il lancio del *Nimbus-9*, i satelliti iniziano ad essere utilizzati non solo per fornire immagini ma anche come strumenti di misura, per ricavare quindi dati da usare nei modelli numerici di previsione.

Nel 1974 viene messo in orbita il primo satellite meteorologico geostazionario, *SMS-1* (*Synchronous Meteorological Satellite*) sempre americano.

Nel 1977 e 1978 anche Europa e Giappone mandano in orbita i loro primi satelliti meteorologici, chiamati rispettivamente *GMS* (*Geostationary Meteorological Satellite*) e *Meteosat*. Con il *Meteosat-1* per la prima volta, oltre ai canali visibili e infrarossi, viene analizzata anche la radiazione nelle lunghezze d'onda tipiche del vapor d'acqua ($6.7 \mu\text{m}$). Negli anni '80 anche l'India si è dotata di un set di satelliti meteorologici, prima polari e poi geostazionari, completando quindi la copertura della superficie terrestre con dati meteorologici aggiornati 24 su 24.

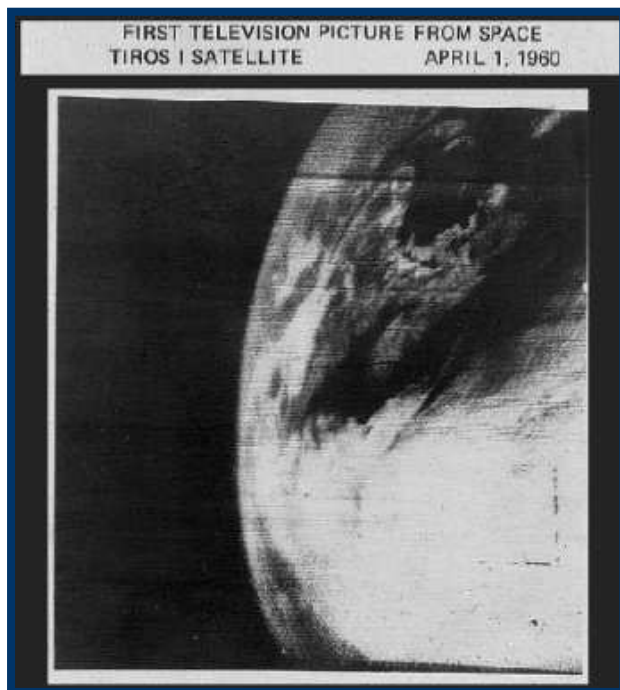


Figura 2. Prima immagine trasmessa da un satellite meteorologico (fonte:NASA)

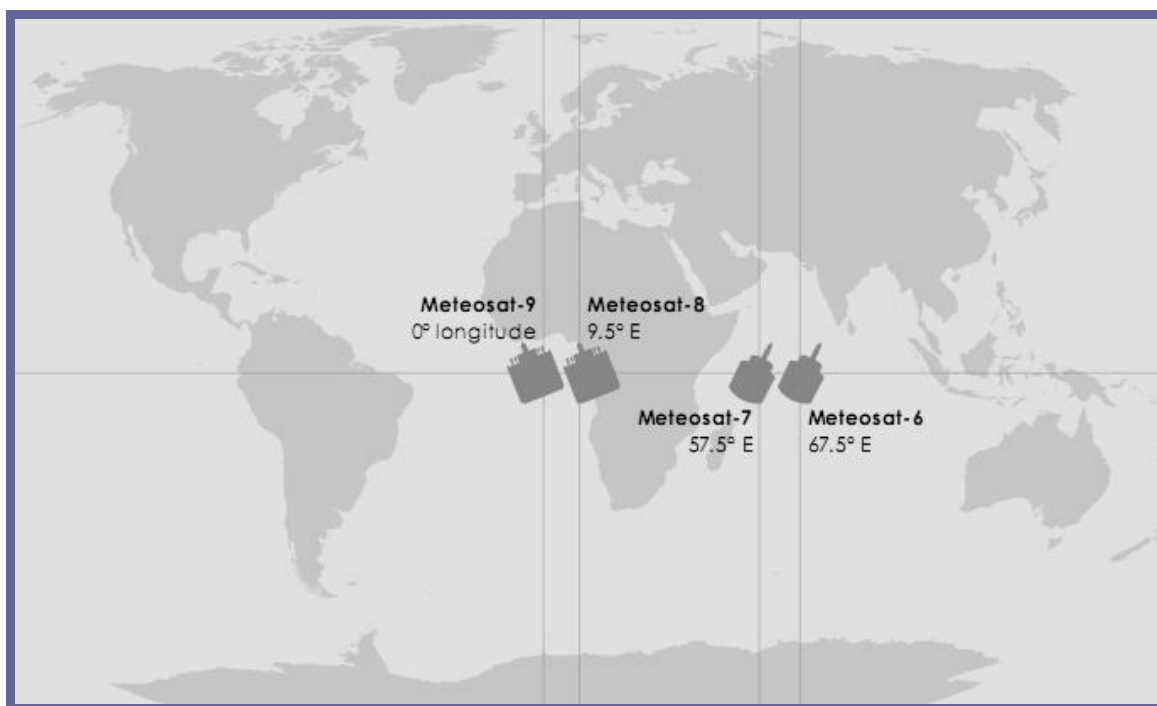


Figura 3. I satelliti Eumetsat attualmente in orbita (fonte:Eumetsat)

I satelliti Eumetsat

Meteotrentino si avvale delle immagini satellitari fornite dai satelliti Eumetsat (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*), un'organizzazione intergovernativa a cui aderiscono 26 stati europei che si occupa del lancio e della gestione dei satelliti meteorologici *Meteosat*.

Il programma *Meteosat* ha avuto inizio nei primi anni settanta con il lancio della prima generazione di satelliti meteorologici geostazionari (da *Meteosat-1* a *Meteosat-7*). In orbita sono sempre presenti almeno due satelliti, uno attivo posizionato a 0°N,0°E e un secondo a 0°N,9.5°E con funzioni di backup. La prima generazione *Meteosat* (MFG, ***Meteosat First Generation***) era dotata di tre radiometri e poteva aggiornare i dati ogni 30 minuti con una risoluzione spaziale massima al nadir di 5 km nell'infrarosso e 2.5 km nel visibile.



Figura 4. Prima immagine realizzata dal satellite *Meteosat-1* (fonte:ESA)

Nel 2002 è stato lanciato il primo satellite appartenente alla seconda generazione (MSG, ovvero ***Meteosat Second Generation***). Attualmente sono attivi *Meteosat-8* e *Meteosat-9* sopra i nostri cieli, mentre *Meteosat-6* e *Meteosat-7* sono stati spostati sopra l'Oceano Indiano. I satelliti MSG inviano ogni 15 minuti un'immagine della Terra in 12 canali spettrali differenti. *Meteosat-8*, oltre a svolgere le funzioni di backup, ha anche la funzione Rapid Scan, ovvero invia ogni 5 minuti immagini dell'area del globo compresa tra i 15° e i 70° gradi di latitudine Nord (Europa e Nord Africa); ciò è particolarmente utile per seguire la formazione e l'evoluzione di fenomeni meteorologici intensi.

I satelliti MSG, come i precedenti MFG, sono *spin-stabilised*, ovvero girano su se stessi in verso antiorario a 100 rotazioni per minuto attorno al loro asse longitudinale, che è allineato con l'asse di rotazione terrestre. Il satellite ha una struttura cilindrica, 3.2 m di diametro per 2.4 m di altezza, ed è composto da tre moduli: il sistema centrale di misura, il comparto che si occupa della comunicazione e la piattaforma di supporto e moto.

Gli strumenti più importanti a bordo della seconda generazione di satelliti *Meteosat* sono SEVIRI e GERB.

SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) è un radiometro che scansiona la superficie della Terra ogni 15 minuti usando 12 canali spettrali differenti, fornendo dati sull'atmosfera, sulla temperatura delle nubi e della superficie terrestre e marina. E' dotato in particolare di un canale ad alta risoluzione nel visibile HRV che con il dettaglio di 1 km fornisce informazioni utili nella previsione anche locali di fenomeni meteorologici intensi.

GERB (*Geostationary Earth Radiation Budget*) è invece un radiometro dedicato allo studio del clima e alla sua evoluzione. I suoi strumenti misurano accuratamente il bilancio di radiazione in una banda larga che spazia dalle lunghezze tipiche dell'infrarosso, e quindi della radiazione terrestre, alla radiazione solare. Con GERB è la prima volta che un simile esperimento viene eseguito in orbita geostazionaria e ci si aspetta che fornisca informazioni utili soprattutto nell'analizzare i processi climatici collegati alle nubi e al vapore acqueo.

Nel 2018 è previsto il lancio del primo satellite appartenente alla terza generazione (MTG, **Meteosat Third Generation**). I nuovi satelliti saranno posti in orbita in coppia, paralleli e stabilizzati su tutti e tre gli assi, con il vantaggio di avere gli strumenti sempre puntati sulla Terra.

La scansione dell'intero disco avverrà in 10 minuti e i canali a disposizione saranno 16, di cui 8 nelle frequenze dello spettro solare con la risoluzione massima di 1 km e 8 nello spettro infrarosso con una risoluzione di 2 km. La funzione RapidScan analizzerà la regione europea ogni 2.5 minuti e avrà a disposizione un canale aggiuntivo nel visibile con la risoluzione di 0.5 km.

A bordo dei satelliti di terza generazione troveranno spazio anche un detector per fulmini (*Lightning Imager*), un interferometro con risoluzione iperspettrale nell'infrarosso (*InfraRed Sounder*) e uno spettrometro ad alta risoluzione nell'ultravioletto, visibile e vicino infrarosso (*Sentinel-4*). Quest'ultimo in particolare consentirà di analizzare l'atmosfera strato per strato e di ottenere informazioni molto dettagliate sulla sua composizione chimica.



Figura 5. Immagine del progetto dei satelliti *Meteosat* di terza generazione (fonte: Eumetsat)

Il radiometro SEVIRI

I satelliti raccolgono informazioni sull'atmosfera e sulla superficie terrestre grazie a strumenti chiamati radiometri. I radiometri misurano una grandezza fisica chiamata **radianza**, la densità di flusso di radiazione elettromagnetica per angolo solido: si tratta di una misura dell'intensità della radiazione elettromagnetica misurata in una banda di frequenze.

Dal lancio dei primi satelliti anche gli strumenti a bordo hanno seguito un'evoluzione parallela. Attualmente ogni programma satellitare meteorologico sviluppa i propri radiometri cercando di raccogliere sempre più dati. Oltre a raccogliere informazioni nelle lunghezze d'onda del visibile, si analizzano al giorno d'oggi anche numerose bande nell'infrarosso e nell'ultravioletto.

Per ottenere un'immagine completa del disco terrestre SEVIRI, il radiometro a bordo dei satelliti Meteosat attualmente in orbita, utilizza una tecnica di scansione bidimensionale che abbina la rotazione del satellite allo spostamento degli specchi dello strumento. La radiazione viene raccolta dal telescopio e focalizzata sui rilevatori. La separazione dei canali avviene al livello del piano focale del telescopio, con l'utilizzo di specchi inclinati. L'immagine dell'intero disco terrestre viene ottenuta in circa dodici minuti. Nei tre minuti restanti lo specchio di scansione viene riportato alla sua posizione iniziale e nel percorso ottico viene inserito un corpo nero per ricalibrare lo strumento.

Tabella 1. I canali di SEVIRI

| Canale | Nome | Caratteristiche della banda spettrale (μm) | | |
|--------|--------|---|------------------------|------------------------|
| | | λ_{cen} | λ_{min} | λ_{max} |
| 1 | VIS0.6 | 0.635 | 0.56 | 0.71 |
| 2 | VIS0.8 | 0.81 | 0.74 | 0.88 |
| 3 | NIR1.6 | 1.64 | 1.50 | 1.78 |
| 4 | IR3.9 | 3.90 | 3.48 | 4.36 |
| 5 | WV6.2 | 6.25 | 5.35 | 7.15 |
| 6 | WV7.3 | 7.35 | 6.85 | 7.85 |
| 7 | IR8.7 | 8.70 | 8.30 | 9.1 |
| 8 | IR9.7 | 9.66 | 9.38 | 9.94 |
| 9 | IR10.8 | 10.80 | 9.80 | 11.80 |
| 10 | IR12.0 | 12.00 | 11.00 | 13.00 |
| 11 | IR13.4 | 13.40 | 12.40 | 14.40 |
| 12 | HRV | Banda larga (da 0.4 a 1.1 μm) | | |

Nella tabella 1 sono riportati i 12 canali di SEVIRI, ognuno di essi è stato posizionato in una zona dello spettro elettromagnetico in cui è in grado di rilevare informazione su fenomeni specifici. Non tratteremo qui in dettaglio le informazioni che è possibile ricavare canale per canale, ma analizziamo le caratteristiche dei tre gruppi principali in cui ci è possibile dividerli: i canali solari (nel visibile), i canali termici (nell'infrarosso) e i canali dedicati al vapore acqueo.

I canali nelle lunghezze d'onda del **visibile** sono quattro, di cui uno ad alta definizione (HRV). Questi canali registrano informazioni sulla quantità di luce solare riflessa dal nostro pianeta e dalla sua atmosfera. L'interpretazione di questi dati è particolarmente semplice visto che i nostri occhi sono sensibili alla stessa banda di lunghezze d'onda (tra 0.4 e 0.7 μm). Questi canali hanno però il grosso svantaggio di poter raccogliere dati soltanto quando la superficie terrestre è illuminata dal Sole. Grazie a questi canali possiamo individuare le formazioni nuvolose e distinguere la loro composizione (acqua o ghiaccio) e rilevare le caratteristiche della superficie (tipi di suolo, presenza di vegetazione o copertura nevosa, per esempio).

I canali nell'**infrarosso** vengono utilizzati per ottenere informazioni sulla radiazione emessa dalla Terra stessa e sono disponibili ventiquattro ore su ventiquattro. Grazie a questi canali possiamo rilevare la temperatura della superficie e dei sistemi nuvolosi e ricavarne quindi, per esempio, la quota. Alcuni di questi canali sono posizionati in zone dello spettro in cui sono presenti bande d'assorbimento di importanti gas atmosferici, come l'ozono e l'anidride carbonica, e sono quindi utilizzati anche per ricavare informazioni sulla loro concentrazione.

Il canale IR3.9 è ibrido perché rileva sia radiazione di origine solare riflessa (nelle ore diurne) che radiazione emessa dalla Terra. Le sue speciali caratteristiche lo rendono indispensabili per ottenere

informazioni sulle nubi, in particolare sulla dimensione delle "particelle" che le compongono e sul loro stato (goccioline di acqua o cristalli di ghiaccio).

I canali che nella tabella 1 sono indicati in verde si trovano nella banda principale d'assorbimento del **vapore acqueo**. A queste lunghezze d'onda otteniamo poche informazioni sulla superficie terrestre, ma molte sulla distribuzione del vapore acqueo nell'atmosfera. In particolare questi canali forniscono informazioni anche sulle zone dove non sono presenti formazioni nuvolose, consentendoci di determinare la distribuzione dell'umidità, il campo vettoriale dei venti e di seguirne l'evoluzione atmosferica.

Leggere le immagini satellitari

Nelle immagini registrate dai canali nel visibile ai colori scuri sono associati i corpi che riflettono poco la radiazione solare in quella banda di lunghezze d'onda, mentre i colori chiari identificano i corpi con elevata riflettività. Possiamo quindi facilmente riconoscere le formazioni nuvolose e le caratteristiche delle diverse superfici, come le zone desertiche oppure quelle coperte da neve o da vegetazione. Le nubi sono più bianche maggiore è il loro spessore.

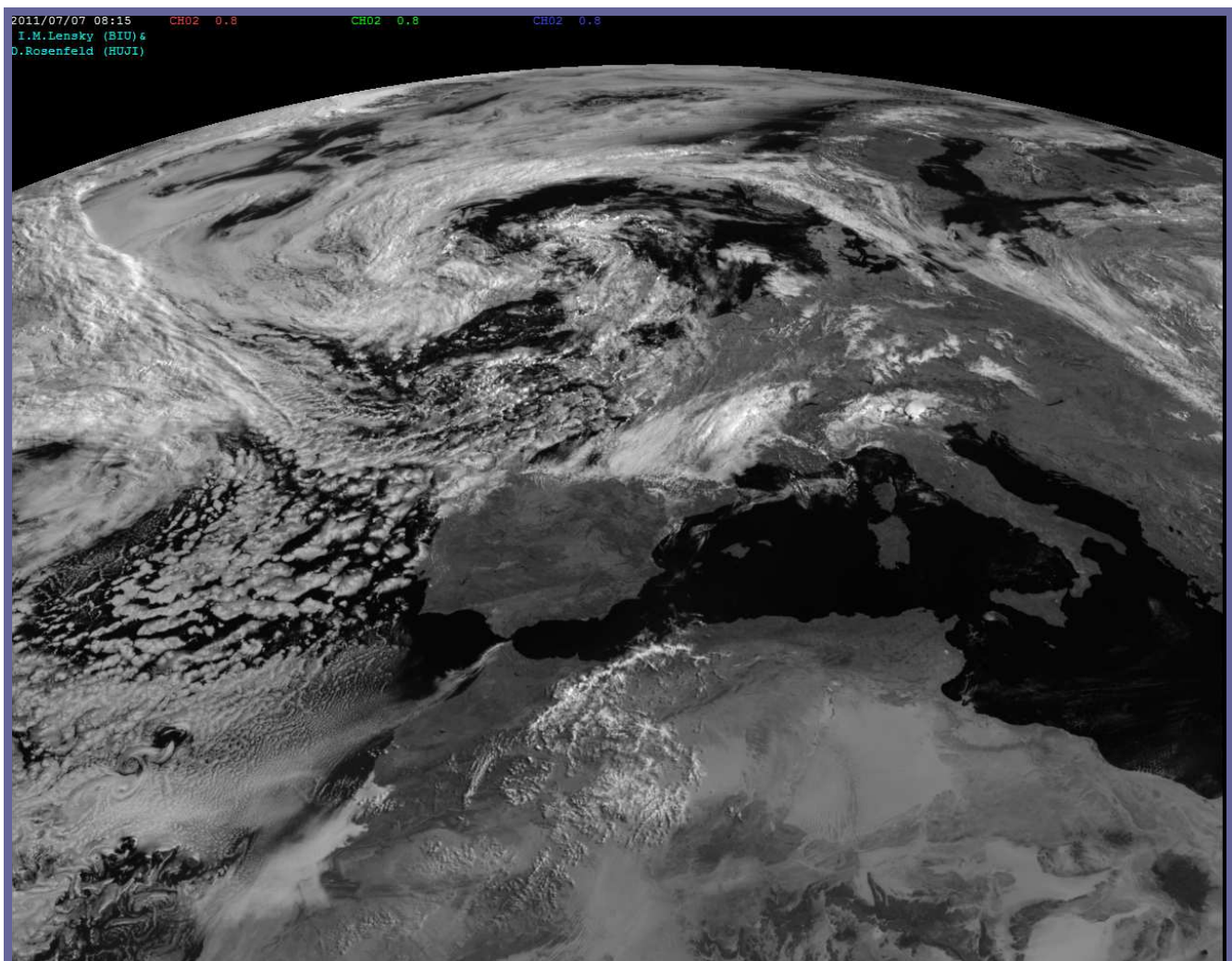


Figura 6. Immagine nel canale VIS0.8 di Meteosat-9 realizzata grazie al programma MSG_RGB, dati forniti da Eumetsat.

Le immagini registrate nei canali infrarossi, invece, riportano informazioni sulla temperatura. I colori scuri sono associati ai corpi più freddi, mentre quelli chiari alle superfici più calde: le nuvole risulterebbero perciò nere e la superficie terrestre chiara. Per rendere più facile la lettura e più

semplice il confronto con le immagini nel visibile le immagini nell'infrarosso vengono quindi spesso visualizzate con i colori invertiti, come nell'immagine successiva. In bianco troviamo perciò le nubi più alte e freddo, in grigio quelle negli strati più bassi e in nero la superficie terrestre e marina.

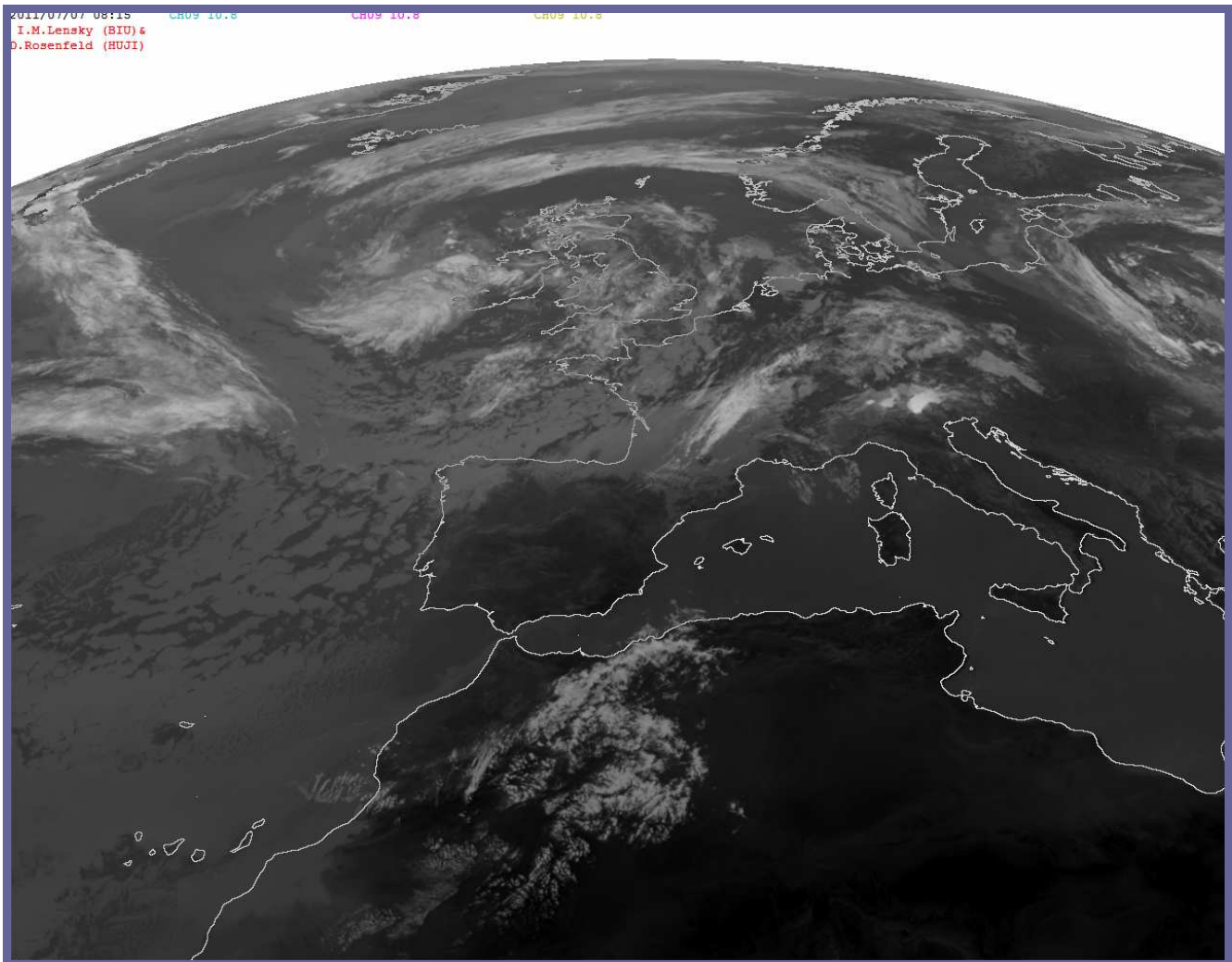


Figura 7. Immagine nel canale IR10.8 di Meteosat-9 realizzata grazie al programma MSG_RGB, dati forniti da Eumetsat.

Per ottimizzare la rappresentazione delle informazioni ottenute da più canali si possono costruire immagini composte. Ai tre colori di base (rosso, verde e blu) vengono associate le intensità registrate in tre diversi canali di SEVIRI. Le composizioni RGB possono essere costruite *ad hoc* per mettere in evidenza determinati fenomeni fisici e atmosferici.

Nell'esempio riportato nella figura successiva sono stati utilizzati i tre canali nel visibile VIS0.6 (blu), VIS0.8 (verde) e NIR1.6 (rosso). Il canale NIR1.6 viene usato per distinguere la fase dell'acqua nelle nubi; possiamo infatti osservare nell'immagine ottenuta come con questa composizione nubi basse composte da acqua abbiano sfumature rossastre, mentre le nubi più alte composte da ghiaccio appaiono bianche e azzurro ciano. La componente blu è associata al canale VIS0.6 e quella verde a VIS0.8; per questo le nubi più riflettenti, ovvero quelle alte e dense appaiono verdi-azzurro. La superficie coperta di vegetazione ci appare verde a causa dell'elevata riflettività a $0.8 \mu\text{m}$, mentre la superficie desertica appare rossa a causa della maggiore riflettanza nel canale NIR1.6 rispetto a VIS0.6. Gli oceani appaiono neri perché sono associati a bassi valori di riflettanza in tutti e tre i canali.

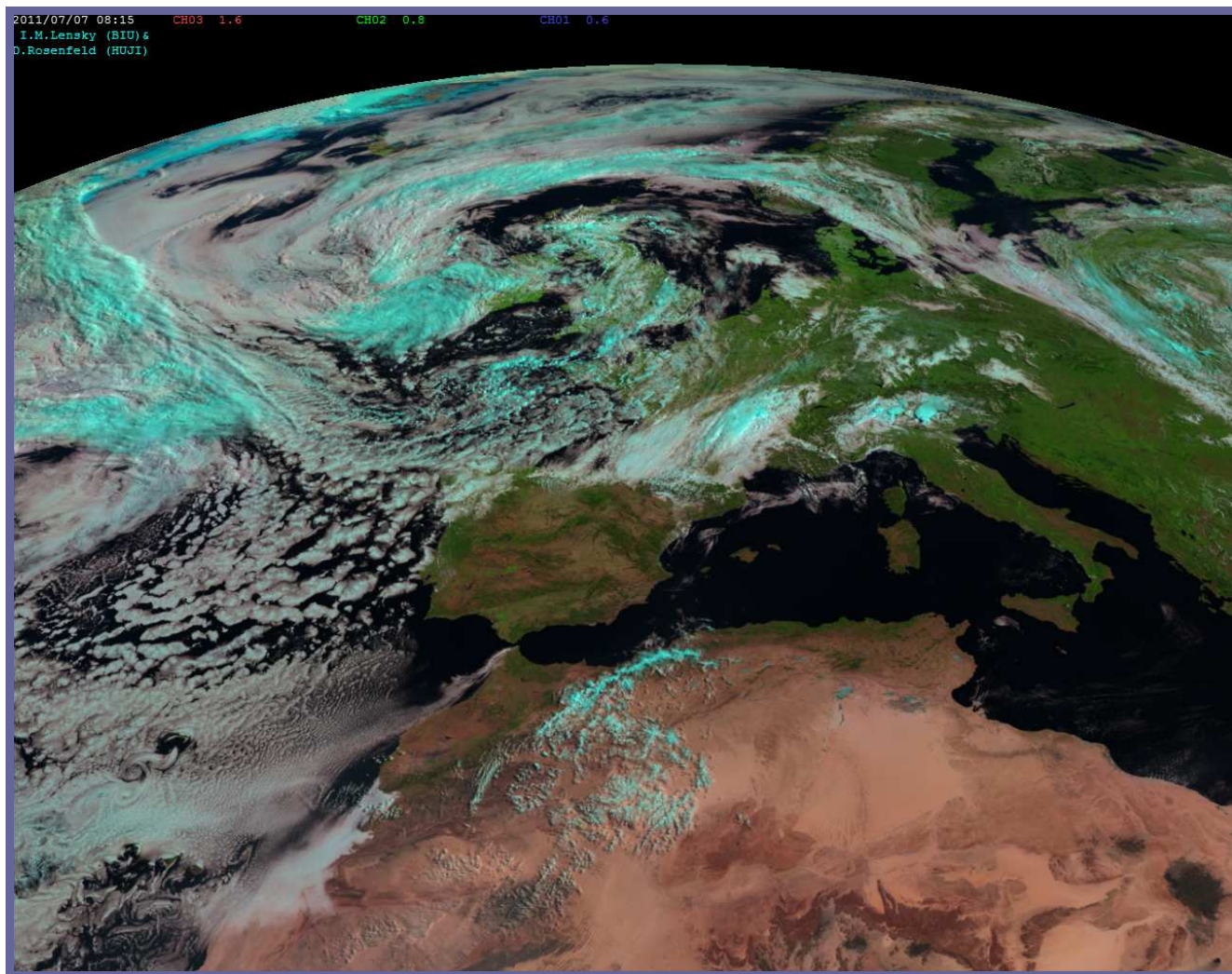


Figura 8. Composizione RGB "Natural Colors" realizzata grazie al programma MSG_RGB, dati forniti da Eumetsat.