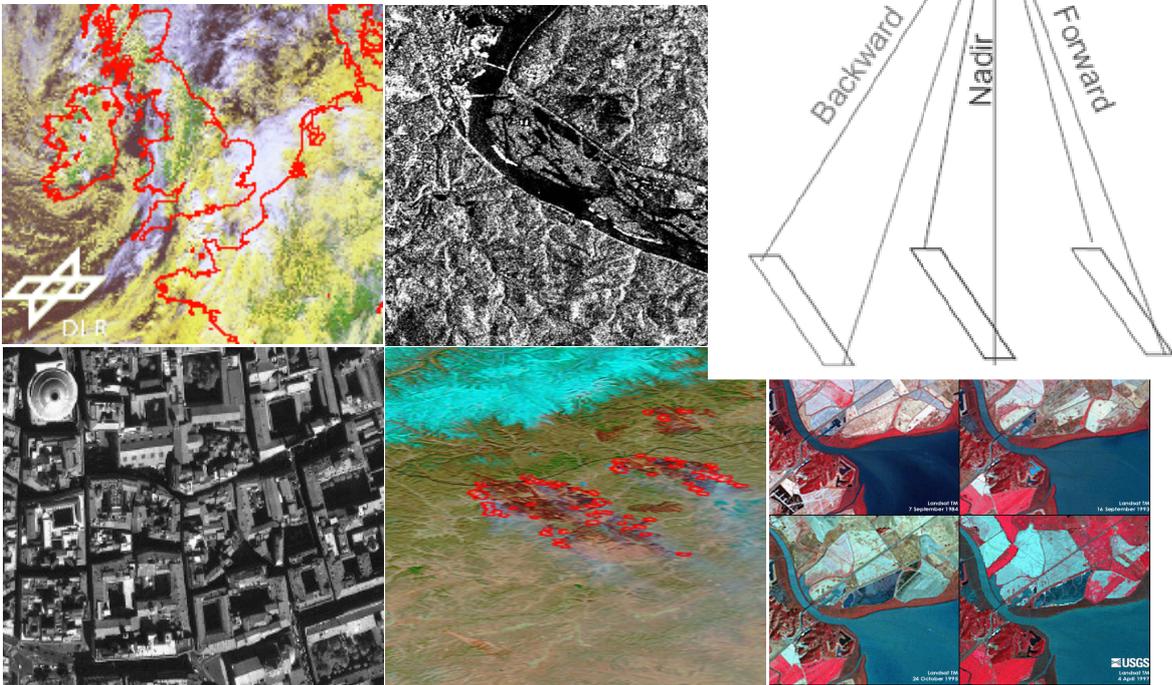


Assegno di ricerca:

**INTEGRAZIONE, TRATTAMENTO E DISTRIBUZIONE DEI DATI TERRITORIO- AMBIENTE ACQUISITI DA SENSORI A BORDO DI PIATTAFORME SATELLITARI, AEREE, TERRESTRI, VEICOLARI E MARINE**

## 1 Sensori a bordo di piattaforme satellitari



**Assegnista:** Silvia dalla Costa

**Tutor interno:** prof. Luigi Di Prinzio

**Tutor esterno:** ing. Sergio Samarelli- Planetek Italia

1	DEFINIZIONE DI SENSORE E CARATTERISTICHE GENERALI .....	3
1.1	Premessa.....	3
1.2	Sensore/trasduttore.....	3
1.3	Caratteristiche dei sensori.....	4
1.4	Classificazione dei sensori adottata .....	8
1.5	Conclusioni e prime considerazioni.....	11
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>12</b>
2	SENSORI SU PIATTAFORMA SATELLITARE .....	13
2.1	Principi di funzionamento .....	13
2.2	Tipologie di sensori.....	20
2.3	Approfondimenti sui sensori passivi .....	28
2.3.1	Modalità di ripresa della scena.....	28
2.3.2	Risoluzioni dei sensori passivi .....	29
2.3.3	Interazioni della radiazione con l'atmosfera e la superficie terrestre .....	31
2.3.4	Distorsioni geometriche delle immagini.....	34
2.3.5	Correzioni e pre-elaborazione dei dati.....	35
2.4	Approfondimenti sui sensori attivi.....	37
2.4.1	Sensori attivi nella regione del visibile e dell'infrarosso.....	38
2.4.2	Sensori attivi nel campo del microonde .....	38
2.4.3	Risoluzioni dei sensori attivi .....	42
2.4.4	Distorsioni .....	44
2.4.5	Correzione e pre-elaborazione dei dati.....	45
2.4.6	Principali tecniche d'uso dei sensori attivi .....	45
2.5	Caratteristiche e formato dei dati .....	47
2.5.1	Memorizzazione e formato dei dati.....	47
2.5.2	Dati e prodotti.....	49
2.5.3	Il Mercato .....	52
2.6	Missioni per lo studio e il monitoraggio territorio/ambiente.....	55
2.6.1	Satelliti ad alta risoluzione spaziale .....	55
2.6.2	Satelliti ad alta risoluzione spettrale .....	58
2.6.3	Satelliti ad alta risoluzione temporale.....	62
2.6.4	Altre missioni importanti .....	64
2.7	Panoramica delle applicazioni.....	66
2.7.1	Applicazioni a scala globale.....	68
2.7.2	Applicazioni a scala locale .....	75
2.7.3	Matrice sensori/applicazioni.....	86
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>87</b>
	<b>Sitografia.....</b>	<b>87</b>

## **1 DEFINIZIONE DI SENSORE E CARATTERISTICHE GENERALI**

### **1.1 Premessa**

Questo rapporto rappresenta l'esplosione del primo obiettivo richiesto dalla ricerca inerente l'analisi dei sensori dedicati alla registrazione di dati per tematiche territoriali e ambientali e la classificazione delle piattaforme su cui questi strumenti vengono alloggiati. Il documento approfondisce concetti e definizioni inerenti la sensoristica, in particolare gli strumenti e missioni satellitari e pubblica alcuni risultati, sotto forma di query, del database "DB Sensori". Rispetto al primo report pubblicato (aprile 2006) sono state apportate le correzioni indicate dal tutor interno ing. Sergio Samarelli ed integrati alcuni paragrafi, in particolare quello sulle applicazioni a scala locale (paragrafo 2.7.2) e sulle modalità di scansione della scena (paragrafo 2.3.1).

### **1.2 Sensore/trasduttore**

Un trasduttore è un dispositivo che converte energia da una forma ad un'altra, producendo un segnale in uscita. Quando un trasduttore in grado di ricevere e rispondere ad un segnale o ad una stimolazione con un segnale elettrico si definisce sensore. Per stimolazione (*stimulus*) si intende una quantità, una proprietà, una condizione fisica o chimica che è percepita e convertita in un segnale elettrico.

Si può anche dire che un sensore è un trasformatore di un segnale genericamente non elettrico in uno elettrico, cioè che può essere "canalizzato", amplificato e modificato da uno strumento elettronico. Il segnale di output del sensore può essere in forma di tensione o di corrente ed essere descritto in termini di ampiezza, frequenza o fase. Questo set di caratteristiche è chiamato "formato del segnale di output" [Fraden].

Il termine sensore va dunque distinto dal termine trasduttore, che genericamente è un convertitore di un qualsiasi tipo di energia in un altro.

Un sensore non è mai uno strumento indipendente, fa sempre parte di un più ampio sistema che può incorporare molti altri rilevatori, condizionatori di segnale, processori, memorie, registratori dati e attuatori. Fa comunque sempre parte di un sistema di acquisizione dati.

### **Unità di misura**

Le unità di misura di tutte le grandezze fisiche misurate da un sensore possono essere derivate dalle sette unità fondamentali stabilite dalla Quattordicesima

Conferenza Generale sui pesi e le misure (The 14th General Conference on Weights and Measures- 1971).

Il sistema di misura è conosciuto come SI, ovvero "Le Système International d'Unités"

### 1.3 Caratteristiche dei sensori

Pur non entrando nel merito della tecnologia con cui questi sensori vengono realizzati, peraltro in continua evoluzione, sembra utile accennare ad alcune caratteristiche tecniche e parametri significativi per la scelta da compiere sul tipo di sensore da utilizzare per lo studio del territorio o di un fenomeno. Nel corso della ricerca e della descrizione dei singoli strumenti tali caratteristiche, spesso molto diverse e variabili da sensore a sensore, verranno meglio specificate, tuttavia è opportuno introdurre termini come risoluzione, accuratezza, affidabilità, saturazione, calibrazione ecc. che sono definizioni comuni a tutti gli strumenti classificati.

In questo contesto si considera il sensore come una scatola vuota, valutando solo le relazioni tra segnali di input e quelli di output.

Individuare le caratteristiche di un sensore significa innanzitutto conoscere il legame matematico tra la grandezza fisica da misurare all'ingresso e il segnale di uscita. Dal segnale di input al dato di output un sensore può produrre numerose conversioni prima che si arrivi ad un segnale elettrico. La relazione ideale che lega il segnale di entrata con il segnale di uscita viene definita *Funzione di trasferimento*, tale funzione stabilisce la dipendenza tra il segnale elettrico prodotto dal sensore  $S$  e invece lo stimolo  $s$ :

$$S = f(s)$$

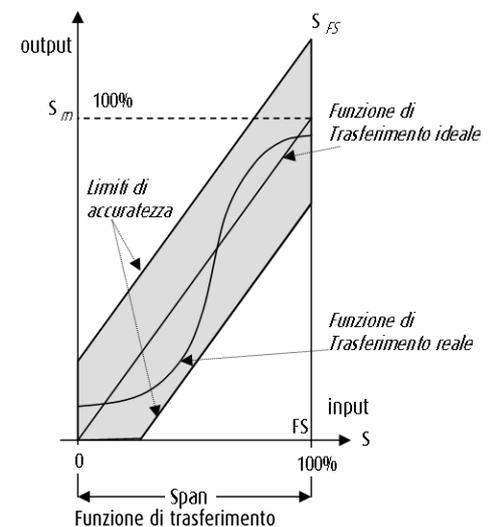
Questa funzione può essere sia di tipo lineare o non lineare, per esempio di tipo logaritmico, esponenziale o di potenza.

Nella maggior parte dei casi si ha a che fare con funzioni di tipo bi-dimensionale, rappresentabili dall'equazione:

$$S = a + bs$$

Dove  $a$  rappresenta il segnale di output nel momento 0 del segnale di input, e  $b$  il gradiente o meglio la sensibilità.  $S$ , ovvero il segnale di uscita elettrico, può essere rappresentato da frequenza, fase o ampiezza, a seconda delle proprietà del sensore.

Grandezza	Nome nel Si	Simbolo
Lunghezza	metro	m
Massa	chilogrammo	kg
Tempo	secondo	s
Corrente elettrica	ampere	A
Temperatura termodinamica	kelvin	K
Quantità di sostanza	mole	mol
Intensità luminosa	candela	cd
Angolo piano	radianti	rad
Angolo solido	steradiani	sr



Un sensore può essere rappresentato da una *Funzione di trasferimento* che nessuna delle suddette funzioni misura in modo esauriente. In questo caso è necessario utilizzare una funzione di ordine polinomiale.

Quando il sensore ha una funzione non lineare, la sensibilità  $b$  non è un numero fisso come invece per le relazioni lineari, ma ad un certo valore di input  $s_0$ , può essere definita:

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds}$$

In molti casi e sopra un certo limite, un sensore non lineare può essere considerato lineare. Sopra tale limite una *Funzione di trasferimento* non lineare deve essere modellata con l'uso di linee rette, questa approssimazione è definita *piecewise* (o funzione definita a tratti)

Per determinare se una funzione può essere rappresentata linearmente, sono introdotte nel valore di input variabili di incremento, mentre si osserva il valore di output. La differenza tra la risposta e il modello lineare è confrontata con gli specifici limiti di accuratezza.

Inoltre una *Funzione di trasferimento* può avere più di due dimensioni quando il segnale di output del sensore è influenzato da più di una grandezza fisica, un esempio calzante è la funzione relativa a sensori che misurano la radiazione termica. Tale funzione relaziona due temperature ( $T_b$  la temperatura assoluta di un oggetto misurato e  $T_s$  la temperatura assoluta della superficie del sensore) con il segnale di uscita  $V$ :

$$V = G(T_b^4 - T_s^4)$$

Dove  $G$  è una costante. La relazione tra la temperatura dell'oggetto e il voltaggio di output è non-lineare (si tratta di una parabola del quarto ordine) e inoltre dipende dalla temperatura della superficie del sensore. Per determinare la sensibilità del sensore, rispettando la temperatura dell'oggetto è necessario calcolare una derivata parziale:

$$b = \frac{\partial V}{\partial T_b} = 4GT_b^3$$

### ***Input Full Scale (FS)***

Detto anche Span o Input Range: è l'intervallo dei valori che la grandezza in ingresso può assumere, assicurando un limite prestabilito di incertezza della grandezza in uscita.

Una **funzione  $f(x)$**  è definita a tratti, se  $f(x)$  è dato da espressioni differenti su vari intervalli.

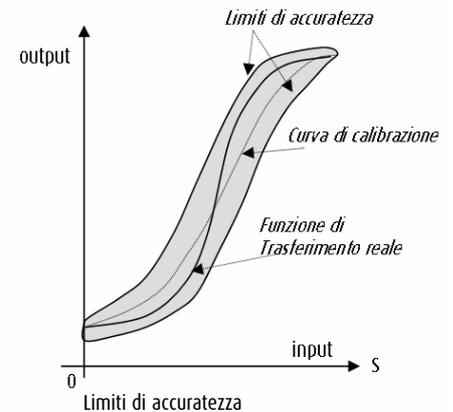
### **Full Scale Output (FSO)**

È la differenza algebrica tra il valore dell'uscita misurato in corrispondenza del minimo e del massimo valore dell'ingresso.

### **Accuratezza**

Una caratteristica molto importante di un sensore è l'accuratezza, o meglio la sua inaccuratezza, misurata come la più alta deviazione di un valore rispetto al valore ideale, o reale, di input. Il valore reale è attribuito all'oggetto di misurazione e quindi accettato come avente una specifica incertezza. Tale deviazione può essere descritta come la differenza tra valore che viene convertito dal sensore in energia elettrica e poi, senza alcun errore, riconvertito come valore di input.

Le specifiche sul grado di accuratezza sono spesso sostituite con valori di incertezza che comprendono gli effetti di distorsione, sia sistematici che casuali, e non solo l'inaccuratezza dovuta alla funzione di trasferimento.



### **Risoluzione**

La risoluzione descrive il più piccolo incremento del valore di input che può essere rilevato. Quando questo valore varia continuamente sopra un certo limite, i segnali di output di alcuni sensori possono e risultare non perfettamente "puliti", anche in condizioni di rumore assente. A livello generale la risoluzione del segnale digitale di uscita dei sensori è dato dal numero di bit. Per esempio la risoluzione può essere specificata a 8 bit, vedremo nel dettaglio soprattutto per quanto riguarda i sensori a bordo di satelliti, che tale risoluzione è definita radiometrica, per distinguerla da altre tipologie di risoluzioni (spaziale, temporale e spettrale).

### **Affidabilità**

È la capacità di un sensore di effettuare una funzione richiesta in condizioni dichiarate per un periodo dichiarato. È espressa in termini statistici come la probabilità che uno strumento funzionerà senza errori oltre un periodo specificato o dopo un certo numero di cicli o usi. Si tratta di prestazioni in condizioni operative normali.

### **Linearità/ Non linearità**

La non linearità indica quanto la curva di calibrazione sia approssimabile con una retta. Si misura come lo scostamento massimo tra la curva di calibrazione e la Funzione di trasferimento.

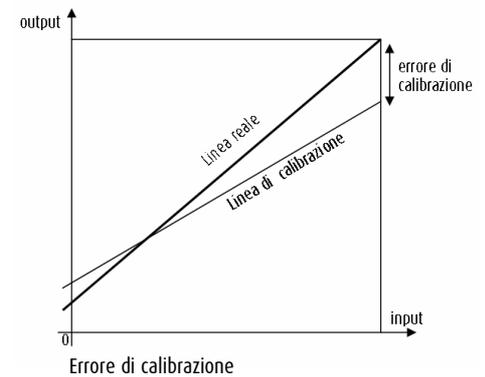
Nella teoria degli errori, l'**accuratezza** è il grado di corrispondenza del dato teorico, desumibile da una serie di valori misurati, con il dato reale o di riferimento. Mentre la **precisione** è il grado di convergenza di dati individualmente rilevati su un valore medio della serie cui appartengono.

### **Errori di Calibrazione**

L'errore di calibrazione è un tipo di inaccuratezza "di produzione", si tratta di un errore di natura sistematica, e che quindi può essere considerato già nella funzione di trasferimento, comune a tutti gli strumenti classificati in questa ricerca.

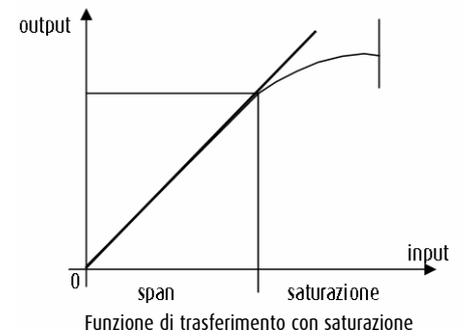
La calibrazione consiste nell'applicare al sensore valori noti di input (valori campione), registrando i corrispondenti valori dell'uscita.

Un ciclo di calibrazione si ottiene applicando valori dell'ingresso a partire dal minimo fino al massimo del Input Full Scale (FS), in modo crescente (dal minimo al massimo) quindi decrescente (dal massimo al minimo).



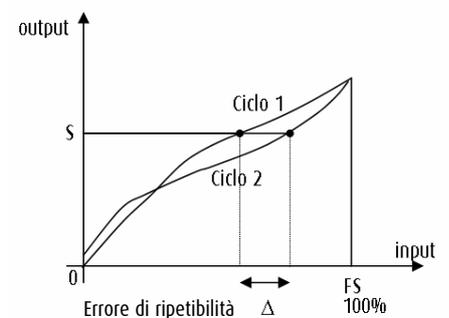
### **Saturazione**

Quasi tutti i sensori hanno limiti operativi, anche se considerati con funzione lineare: ad un certo livello di stimolazione in input, il segnale di output non risponde più, ulteriori incrementi del segnale in entrata non producono variazioni misurabili nel segnale di output. In questo caso il sensore ha raggiunto il livello di saturazione.



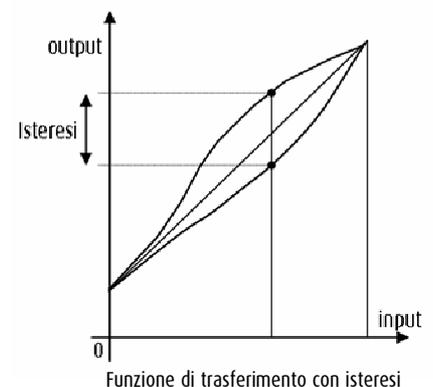
### **Ripetibilità**

Indica la "stabilità" del sensore nel tempo (rispetto a più cicli di calibrazione). Si misura come massima differenza tra due uscite relative allo stesso valore di ingresso, nelle stesse condizioni operative e nella stessa direzione (aumento o diminuzione), misurata tra due (o più) cicli diversi.



### **Isteresi**

Indica se il sensore risponde in modo diverso in fase di aumento o diminuzione del segnale di ingresso. Si misura come massima differenza tra i valori di uscita, per lo stesso valore dell'ingresso, nella fase di aumento e di diminuzione dell'ingresso, nello stesso ciclo di calibrazione).



### **Eccitazione**

È il segnale elettrico necessario per attivare le operazioni del trasduttore, ed è specificato come un limite di voltaggio e/o corrente. Per alcuni trasduttori, la frequenza del segnale di eccitazione e la sua stabilità devono essere specificati. Variazioni di eccitazione possono alterare la funzione di trasferimento del sensore e causare errori nel segnale di output.

### **Fattori ambientali**

Si riferiscono alle prestazioni del sensore durante l'esposizione (o dopo l'esposizione) a particolari sollecitazioni, diverse dal segnale di input da misurare (ad es. variazioni di temperatura, pressione, umidità, accelerazione, vibrazioni, ecc.).

Vengono indicate come variazioni percentuali rispetto al valore in condizioni di normale funzionamento.

Tra le sollecitazioni viene indicato anche il sovraccarico: rappresenta il massimo valore dell'ingresso oltre il quale il sensore può presentare alterazioni permanenti del suo funzionamento. È il valore che non deve mai essere superato.

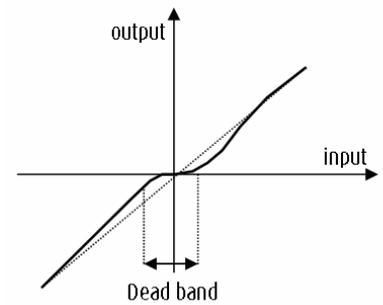
## **1.4 Classificazione dei sensori adottata**

La classificazione dei sensori si può estendere da una schematizzazione semplice ad una più complessa. Una prima distinzione può essere fatta tra sensori passivi o attivi. I sensori passivi generano direttamente un segnale elettrico in risposta ad uno stimolo esterno, cioè l'energia di input è convertita dal sensore in energia di output senza il bisogno di fonti di energia addizionali.

I sensori attivi richiedono una potenza esterna per operare, che è chiamata segnale di eccitazione (*excitation signal*).

Un altro modo di analizzare i sensori è anche quello di considerare tutte le loro proprietà: che cosa misurano (*stimulus*), quali sono i fenomeni fisici ai quali sono sensibili, con che materiale sono realizzati, quali sono i campi di applicazione a cui rispondono.

I principi fisici relativi alle grandezze misurate dai sensori sono diversi, questi strumenti inoltre consentono di misurare diverse tipologie di fenomeni, grandezze fisiche o variazioni: per esempio un sensore di temperatura può essere utilizzato come termometro ma anche come misuratore di flusso, oppure un sensore di forza può essere utilizzato come misuratore di pressione, come microfono, ecc.



Zona di dead band in una funzione di trasferimento

#### Classificazione per materiale

- Inorganico
- Conduttore
- Semiconduttore
- Sostanza biologica
- Organico
- Isolante
- Gas liquido o plasma
- Altro

#### Classificazione per "Stimulus"

- Biologico
- Chimico
- Onde elettriche, magnetiche, elettromagnetiche
- Calore, temperatura
- Spostamento meccanico
- Radioattività, radiazioni
- Altro

La classificazione più semplice è relativa al tipo di energia che rilevano. In questa sede le leggi e i principi fisici relativi alle grandezze misurate non vengono analizzati nel dettaglio, ma citati, se necessario, nella descrizione dei singoli strumenti.

<b>Posizione, livello, spostamento</b>	Sensori potenziometrici, Gravitazionali, Capacità/Potenza/capacitivo, Induttivi Magnetici , Magnetostrittivo, Ottici Ultrasuoni, Micropower impule radar
<b>Occupazione e rilevatori di movimento</b>	Ultrasuoni Rilevatori di movimento a Microonde Rilevatori di occupazione capacitivi Trielettrici Optoelettrici di movimento
<b>Velocità e accelerazione</b>	Sensori di velocità elettromagnetici Accelerometri Cavi piezoelettrici
<b>Sensori di Forza e sforzo</b>	Calibri di sforzo Sensori tattili Sensori di forza piezoelettrici
<b>Sensori di pressione</b>	Al mercurio Soffietti, membrane e piastre sottili Sensori piezoresistivi Capacitivi VRP Optoelettrici
<b>Sensori di flusso</b>	Sensori di trasporto termico A ultrasuoni Elettromagnetici Sensori di microflusso Sensori di brezza (breeze)
<b>Sensori acustici</b>	Microfoni resistivi Condenser microfoni A fibra ottica Piezoelettrici Electret microfoni Misuratori acustici allo stato solido
<b>Sensori di umidità e vapore</b>	Capacitivi Sensori a conduttività termica Igmometri ottici Igmometri a oscillazione
<b>Misuratori di luce</b>	Fotodiodi Fototransistor Fotoresistori Convertitori di luce Misuratori raffreddati Misuratori termici A fiamma di gas
<b>Misuratori di radiazione</b>	Rilevatori a fibre scintillanti Rilevatore di ionizzazione
<b>Rilevatori del campo elettromagnetico</b>	Sensori del campo magnetico Bolometri
<b>Sensori di temperatura</b>	Sensori termoresistivi A contatto termoelettrico Semiconduttori PN- junction Sensori ottici di temperatura Sensori acustici Piezoelettrici
<b>Sensori chimici</b>	Termici Elettrochimici Di concentrazione Ottico- chimici

Strumento di rilevamento	
Acustico	Ampiezza d'onda, fase, spettro, velocità dell'onda
Biologico	Biomassa (tipo e concentrazione)
Chimico	Componenti
Elettrico	Carica, corrente, voltaggio, potenziale campo elettrico (ampiezza e fase), conduttività, permittività dielettrica, altro
Magnetico	Campo magnetico (ampiezza, fase), conduttività, permittività dielettrica, altro
Ottico	Ampiezza d'onda, , fase, velocità d'onda, indice di rifrattività, emissività, riflettività, altro
Meccanico	Posizione (lineare, angolare), accelerazione, forza, stress, pressione, massa e densità, momento e torsione, velocità di flusso, variazione di massa, forma, rugosità, rigidità, conformità, viscosità, cristallinità, struttura
Radiazione	Tipo, energia, intensità, altro
Termico	Temperatura, flusso, calore specifico, conduttività termica, altro

Tuttavia la classificazione adottata per questa ricerca, almeno per la parte scritta, rimane ancorata ad una distinzione per tipologia di piattaforma, consentendo più articolate e differenziate classificazioni invece nell'uso della base dati che è consultabile a parte.

Si tratta di una "semplificazione" giustificata dalle difficoltà già accennate a inizio capitolo, per cui risulta conveniente fare una distinzione tra sensori, a partire da quelli montati a bordo di satelliti poiché sottendono agli stessi principi fisici (misura delle radiazioni elettromagnetiche, teoria delle onde elettromagnetiche...), tutti orientati (tranne quelli nati per scopi militari) a misurare oggetti e fenomeni territoriali e ambientali e la loro evoluzione nel tempo e nello spazio. Inoltre i sensori a bordo di queste piattaforme sono facilmente individuabili attraverso una ricerca tra enti, istituzioni e imprese meno numerose che in altri campi.

A supporto, integrazione o sostituzione dei dati provenienti da strumenti montati a bordo dei satelliti è possibile fare riferimento ad una serie di dati ricavabili da altri sensori alloggiati su altre piattaforme, stazioni, centraline.

Per coerenza quindi la classificazione prosegue con la distinzione tra sensori alloggiati su altre piattaforme, ovvero:

- Velivoli pilotati (aerei, elicotteri, aerei unmanned, palloni aerostatici, mongolfiere, ecc.)
- Mezzi a mare (navi oceanografiche, barche, ecc.)
- Veicoli a motore (macchine, camion, furgoni, veicoli pubblici, ecc.)
- Centraline a terra fisse (singole o rete di centraline)
- Stazioni mobili a terra (su bicicletta o su operatori umani e animali)
- Stazioni fisse nel sottosuolo

La classificazione per piattaforme si complica man mano che si ha a che fare con sensori commerciali o di uso molto comune. Dopo la panoramica dei sensori su satellite, l'orientamento della ricerca si è spostato all'individuazione di progetti e applicazioni realizzati con diverse tipologie di sensori, al fine di individuare stimoli e comuni denominatori a supporto della classificazione.

Per quanto riguarda la descrizione dei vari strumenti, in linea generale la domanda che ci si è posti è stata: quali sono le caratteristiche tecniche del sensore che consentono di capire e scegliere un prodotto, ovvero un dato, congruente e pertinente con il problema che si deve risolvere o il fenomeno che si deve studiare?

Semplicisticamente, nel caso dei sensori a bordo di satelliti ciò che interessa conoscere sono le diverse risoluzioni del dato prodotto, la scena coperta in termini di grandezza e frequenza, il formato e il costo delle immagini. Si è

quindi reso necessario individuare le caratteristiche comuni e confrontabili tra sensori e quelle invece specifiche per singolo strumento, a partire dai risultati di output.

L'individuazione delle caratteristiche tecniche dei sensori e il relativo sforzo di classificazione hanno poi consentito una prima valutazione sulle possibili integrazioni tra dati, sulle difficoltà riscontrabili e sui temi che potranno diventare oggetto di sperimentazione d'uso e appunto di integrazione tra dati. Infine si precisa, come accennato in premessa, che la classificazione adottata si è data alcune limitazioni:

- sono stati presi in considerazione solo strumenti in grado di generare dati utili e significativi relativamente al territorio e all'ambiente;
- sono stati classificati solo gli strumenti già operativi e non in fase di costruzione o testaggio, riservando qualche breve accenno ad alcuni possibili scenari o ad alcuni strumenti che per valore comunicativo, economico o sociale seppure non in produzione, potranno sicuramente dare un contributo fondamentale e aumentare l'interesse verso dati e prodotti informativi ricavabili da tali strumenti;
- non sono state presi in esame sensori e dati relativi a settori di nicchia ma quelli riguardanti tematiche di forte interesse e attualità;

per quanto riguarda inoltre la numerosissima sensoristica a terra, si sono presi in esame solo gli strumenti più significativi dal punto di vista applicativo e/o reti di centraline, in grado di produrre serie di dati spaziali e temporali di un certo livello.

### **1.5 Conclusioni e prime considerazioni**

Il miglioramento continuo delle tecnologie e il parziale abbattimento dei costi dovuto anche all'estensione del mercato privato sempre più concorrenziale anche per strumenti fino a poco tempo fa costruiti e gestiti da enti internazionali di ricerca o da istituzioni militari spingono all'uso sempre più frequente di dati ricavabili da questi strumenti per costruire il quadro di conoscenze necessario alla gestione e al governo del territorio e dell'ambiente. Le tecnologie stesse stimolano nuove domande di informazione.

Nonostante lo sforzo compiuto a livello europeo sia dai privati che dagli enti di ricerca di offrire dati e prodotti, ad un pubblico molto eterogeneo (la messa in orbita dei satelliti Galileo, il progetto GMES- Global Monitoring for Environment and Security, l'avvio del progetto Cosmo Sky Med, ecc.), il mercato dei dati derivati da satellite rimane ancora un mondo inaccessibile alla maggior parte dei quadri tecnici che si occupano di pianificazione o gestione del territorio: nel

cercare su web è probabile perdersi in una miriade di intoppi, i siti sono difficili da consultare o non aggiornati, gli stessi software di elaborazione delle immagini limitano l'uso dei dati ad una nicchia ristretta di fruitori.

Lo sforzo che si pone la ricerca, alla luce di queste prime considerazioni e delle difficoltà incontrate nella raccolta e classificazione dei materiali, rimane senz'altro quello di riflettere sull'uso dei dati e della loro integrazione per tematiche territoriali e ambientali, in termini di efficacia a rappresentare la realtà, economicità, settore applicativo, scala spaziale e temporale congrue. Ma lo sforzo è anche quello di avviare un ragionamento sulle necessarie semplificazioni da apportare alle modalità di accesso ai dati e alle informazioni ricavabili, a partire dalle domande espresse dalle numerose tipologie di attori che governano, pianificano, studiano il territorio.

### **Bibliografia**

Jacob Fraden, *Handbook of Modern sensors, Physics, Designs, and Applications*.

American Institute of Physics, Woodbury, New York 1999

G. Zingales, *Misure Elettroniche - metodi e strumenti*, UTET, Torino, 1992

## 2 SENSORI SU PIATTAFORMA SATELLITARE

Il capitolo si prefigge di fare da supporto e integrazione alla base dati DB SENSORI. Non ha assolutamente la pretesa di essere un trattato sul telerilevamento, ma propone una sintesi dei principi e delle problematiche necessarie a comprendere la materia e i dati da essa ricavabili.

Tra i paragrafi sono state inserite alcune query del database ad integrazione dei concetti spiegati e come esemplificazione del lavoro svolto finora e fornita una bibliografia e una sitografia sui temi affrontati, premessa ad una serie di questioni da approfondire in sede di Dottorato.

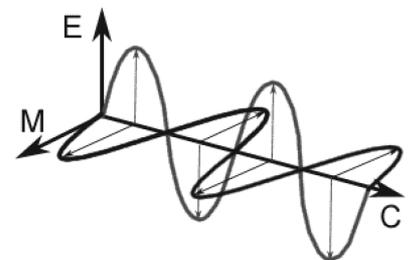
A questa parte dedicata al telerilevamento da satellite è stata data una certa enfasi per l'importanza che ha assunto negli ultimi decenni rispetto alle tematiche territorio e ambiente, ma anche perché alcuni concetti e caratteristiche tecniche, relative alla piattaforma, ai sensori e ai dati sono confrontabili con quelle riguardanti la sensoristica a bordo di velivoli, affrontata nel capitolo successivo.

### 2.1 Principi di funzionamento

Il telerilevamento si può definire come il rilievo e lo studio di oggetti e fenomeni attraverso l'uso di strumenti a bordo di piattaforme, distanti (non in diretto contatto) dall'elemento osservato, in grado di misurarne in particolare l'energia elettromagnetica emessa o riflessa.

La principale sorgente di eccitazione energetica utilizzata per illuminare la superficie terrestre è la radiazione solare. Quando la radiazione solare attraversa l'atmosfera una frazione dell'energia irraggiata viene assorbita, riflessa e/o trasmessa dagli oggetti.

La radiazione elettromagnetica consiste in un campo elettrico (E) e in un campo magnetico (m) orientato perpendicolarmente al campo elettrico. Il campo elettrico e quello magnetico sono tra loro ortogonali e sempre perpendicolari anche alla direzione di propagazione. La direzione del campo elettrico e conseguentemente anche quella del campo magnetico, in generale può variare con il tempo, mantenendosi però sempre ortogonale alla direzione di propagazione. Se la direzione del campo elettrico non varia, l'onda elettromagnetica viene definita come polarizzata rettilineamente. Una proprietà importante, conseguenza della equazione di Maxwell è che il campo elettrico e quello magnetico sono sempre in fase tra loro. Entrambi questi campi viaggiano alla velocità di luce (c).



#### Radianza

In un punto di una superficie ed in una direzione data è il rapporto tra l'intensità raggiante, nella direzione data, di un elemento infinitesimo di superficie che circonda il punto considerato, e l'area della proiezione ortogonale di questo elemento su un piano perpendicolare a questa direzione. Si misura in Watt al metro quadrato allo steradiante: [W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>].

La radiazione elettromagnetica incidente la superficie terrestre, ovvero la *radianza*, è caratterizzata da tre modi di propagazione:

- (1) trasmissione - parte della radiazione penetra in alcuni mezzi, per esempio nell'acqua;
- (2) assorbimento - parte della radiazione è assorbita attraverso interazioni molecolari o elettroniche con il mezzo attraversato; successivamente può essere parzialmente riemessa (*emittanza*), soprattutto in corrispondenza delle lunghezze d'onda maggiori, cosicché la radiazione solare contribuisce al riscaldamento dei corpi che forniscono una risposta termica;
- (3) riflessione - parte della radiazione viene riflessa (e diffusa) dal bersaglio in diversi angolazione (in funzione della "rugosità" della superficie e dell'orientamento della direzione di incidenza della radiazione solare rispetto all'inclinazione della superficie), inclusa la direzione del sensore che effettua l'osservazione.

### **Spettro elettromagnetico**

La distribuzione delle energie di radiazione può essere rappresentata sia in funzione della lunghezza d'onda che della frequenza in un grafico noto come spettro elettromagnetico.

Per convenzione lo spettro è suddiviso in regioni, ognuna delle quali comprende determinate lunghezze d'onda (o frequenze).

Ogni sensore è progettato per operare in una o più bande dello spettro. La componente compresa tra 0,4 µm (violetto) e 0,7 (rosso) µm può essere percepita dall'occhio umano, e quindi viene definita visibile, il picco di sensibilità dell'occhio umano è infatti 0,55 µm. La regione tra 0,01 µm e 0,4 µm è definita ultravioletto e invece la regione sopra il rosso, compresa tra 0,7 µm e 1000 µm è invece chiamata dell'infrarosso. La parte dell'infrarosso compresa tra 7 µm e 15 µm è relativa all'emissione termica dei corpi "caldi" ed è quindi definita infrarosso termico, tale radiazione emessa dalla terra può essere quindi misurata in forma di calore.

Per gli effetti dell'atmosfera le onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda inferiore a 0,4 µm (raggi gamma, x e UV) non sono usati in telerilevamento, anche se alcuni sensori montati a bordo di aerei, volando a bassa quota possono registrare i raggi gamma emessi da materiali radioattivi (sono anche quelli con il più alto valore di energia, contrariamente alle onde radio). Esistono poi una serie di strumenti in grado di misurare la lunghezza d'onda della regione definita del microonde che comprende lunghezze tra 1 mm e 300 cm., Radiazioni a queste lunghezze d'onda possono penetrare nubi.

#### **Trasmittanza o fattore di trasmissione**

Misura della capacità di un corpo di trasmettere l'energia incidente: è cioè rapporto fra energia trasmessa e energia incidente

#### **Emittanza**

indicare la densità di energia elettromagnetica emessa dall'unità di superficie di un corpo. Si misura in Watt al metro quadrato [W m<sup>-2</sup>]

**Frequenza**- f: numero di onde che passano in un punto determinato, in un'unità di tempo.

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

c= velocità della luce

**Lunghezza d'onda** -λ: la distanza tra due picchi o due passaggi di un'onda, misurata in frazioni di metro

Banda	Lunghezza d'onda
Violetto	0, 4-0,446 µm
Blu	0,446- 0,500µm
Verde	0,500- 0,578 µm
Giallo	0,592- 0,620 µm
Arancione	0,592- 0,620 µm
Rosso	0,620- 0,7 µm

Oltre le microonde ci sono le onde radio, usate nel telerilevamento per la gestione e il controllo dei satelliti e la strumentazione a bordo, non per il monitoraggio della superficie terrestre. Solitamente i dati registrati dai sensori sono inviati/trasmessi alle stazioni riceventi principali.

### ***Principali leggi fisiche del telerilevamento***

Le principali leggi fisiche alla base del telerilevamento descrivono il comportamento della realtà a partire da un oggetto teorico, il corpo nero, definito come una superficie ideale in grado di assorbire completamente tutta la radiazione dello spettro elettromagnetico e anche di emetterla, secondo la Legge di Planck. A partire dalla definizione e descrizione del corpo nero, la Legge di Planck fornisce l'andamento della potenza emessa dalle superfici di corpo nero in funzione della lunghezza d'onda e della temperatura. Data la relazione che lega frequenza e lunghezza d'onda, per cui:

$$c = \lambda \nu$$

dove:

$c$  = velocità della luce nel vuoto pari a circa 300.000 km·sec<sup>-1</sup>

$\lambda$  = lunghezza d'onda

$\nu$  = frequenza.

E' possibile stabilire che

$$e = h\nu$$

dove:

$e$  = quanto di energia dell'energia

$h$  = costante di Planck

$\nu$  = frequenza

Per cui l'energia derivata dalla radiazione elettromagnetica è proporzionale alla frequenza e invece inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda.

Se si compiono misure nel campo del microonde, per esempio, è necessario avere una porzione di territorio da registrare molto ampia al fine di ottenere un quantitativo di energia sufficiente per essere rilevato dal sensore.

La legge di Stefan Boltzmann invece lega la quantità totale di potenza emessa dalle superfici di corpo nero, calcolata su tutto lo spettro elettromagnetico, alla temperatura.

La legge di Wien mette in relazione la lunghezza d'onda  $\lambda$  corrispondente al massimo di energia, o potenza emessa da una superficie di corpo nero, con il suo valore di temperatura  $T$ .

Un'altra legge importante del telerilevamento è quella di Kirchhoff che stabilisce la relazione tra i coefficienti di assorbimento, riflessione, trasmissione

#### **Corpo Nero**

Superficie ideale, postulata dalla fisica classica, che ad una data temperatura irraggia il massimo di energia per unità di area e per ogni lunghezza d'onda e che può assorbire tutta la radiazione che incide su di esso. Il suo comportamento è descritto dalla legge della radiazione di Planck

#### **Superficie Lambertiana**

Superficie ideale che riflette l'energia incidente in modo uguale in tutte le direzioni.

ed emissione. A partire dai tre fenomeni principali di interazione radiazione/superficie terrestre e dal principio di conservazione dell'energia è possibile stabilire che:

$$E_i = E_r + E_a + E_t$$

dove:

$E_i$  = radiazione incidente

$E_r$  = radiazione riflessa

$E_a$  = radiazione assorbita

$E_t$  = radiazione trasmessa

E associare a ciascun parametro dei coefficienti:

Coefficiente di riflessione:  $\rho = E_r / E_i$

Coefficiente di assorbimento  $\alpha = E_a / E_i$

Coefficiente di trasmissione  $\tau = E_t / E_i$

Per cui:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Si tratta di una relazione generale, per cui nella realtà esistono sia corpi trasparenti con  $\tau = 1$ , o corpi opachi che non trasmettono pressoché nessuna radiazione. In telerilevamento si considerano solo i coefficienti di riflessione e assorbimento, che sono le radiazioni che possono arrivare al sensore.

Dopo aver enunciato la relazione tra coefficienti, la legge di Kirchhoff dimostra che:

$$\alpha = \varepsilon$$

con  $\varepsilon$  = emmissività, ovvero:

$\varepsilon$  = energia emessa dal corpo reale a  $T_0$  / energia emessa dal corpo nero a  $T_0$

Poiché ci si riferisce sempre ad un corpo nero, in grado di assorbire tutta l'energia  $\varepsilon$  e allo stesso tempo di emettere radiazione, il valore di emmissività è pari a 1.

Questa determina che per una stessa superficie il coefficiente di assorbimento  $\alpha$  è pari all'emissività  $\varepsilon$ , e sostituire all'equazione che legava i coefficienti la seguente relazione:

$$\rho + \varepsilon + \tau = 1$$

per cui, a parità di trasmissività  $\tau$  e per superfici opache, più le superfici sono riflettenti, meno emettono radiazioni e viceversa [Gomarasca].

### **Firma spettrale**

Ogni corpo dunque emette un certo valore di radiazione, dipendente dalla sua composizione chimica, dallo stato fisico e dalla sua temperatura. La quantità di radiazione elettromagnetica riflessa (assorbita, trasmessa) da un qualsiasi oggetto varia al variare della lunghezza d'onda. Questa importante proprietà consente l'identificazione e la separazione degli oggetti osservati attraverso la loro firma spettrale.

Misurando l'energia riflessa e/o emessa dagli oggetti alle diverse lunghezze d'onda è possibile costruire la loro curva o firma spettrale.

La quantità di radiazione proveniente da un oggetto, la radianza, è influenzata sia dalle proprietà chimico fisiche dell'oggetto, sia dalla radiazione che arriva all'oggetto (irradianza). Se il sole è la fonte di irradianza essa non può essere costante poiché si modifica a seconda dell'ora e delle condizioni atmosferiche. La radianza di un oggetto non è necessariamente un buon indicatore delle proprietà fisiche dello stesso. Si utilizza invece la riflettanza, data dal rapporto tra la radianza di un oggetto e l'irradianza che raggiunge lo stesso. La riflettanza di un oggetto dipende dall'angolo di osservazione dello strumento e dall'angolo del sole.

In linea di principio, vari tipi di superfici possono essere distinte fra loro grazie a tali differenze nelle riflettività (coefficiente di riflessione) relative, supposto che ci sia uno strumento adeguato per la misura di tali differenze in funzione della lunghezza d'onda e dell'intensità della radiazione riflessa (come frazione o percentuale della radiazione incidente).

Confrontando le firme di oggetti differenti è possibile distinguerli tra loro molto meglio che se fossero comparati su un'unica lunghezza d'onda, per esempio l'acqua e la vegetazione possono avere la stessa risposta spettrale nel campo del visibile ma sono quasi sempre ben distinguibili nel campo dell'infrarosso.

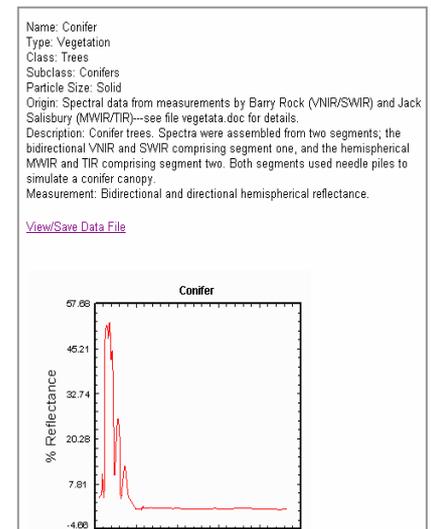
E' possibile consultare su internet una serie di librerie contenenti le firme spettrali di diversi materiali, le più importanti sono:

Aster (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>) data base (2.000 oggetti) con le firme spettrali di materiali naturali o prodotti dall'uomo e che include librerie del Jet Propulsion Laboratory (JPL), della Johns Hopkins University (JHU), della United States Geological Survey (USGS - Reston) Spectral Library (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>). Inoltre testi sulla metodologia adottata per la costruzione della libreria.

ASU Thermal Emission Spectral Library (<http://tes.asu.edu/speclib/>)

Una libreria con la firma spettrale nell'infrarosso termico di più di 150 minerali puri, con un'enfasi sui più comuni formazioni rocciose. Campioni includono: silicati, carbonati, solfati, fosfati, ogni firma è accompagnata da informazioni

**Riflettanza:** Rapporto tra energia riflessa e energia incidente. Si parla di fattore di riflessione spettrale quando ci si riferisce a un determinato intervallo di lunghezza d'onda dell'energia incidente.



Lo **spettrometro** è uno strumento che consente la misurazione di grandezze spettrali.

Esistono spettrometri che misurano lo spettro della radiazione elettromagnetica e spettrometri che misurano lo spettro di massa di una sostanza, ossia le masse dei suoi costituenti (atomi, molecole, composti).

descrittive in forma di database a compendio e sui processi di preparazione e analisi spettrale.

In alternative all'uso delle librerie esistono sul mercato molte tipologie di spettrometri o spettroradiometri, da campo o da laboratorio in grado di acquisire la composizione spettrale di ogni oggetto scansionato ottenendo la distribuzione delle intensità delle diverse lunghezze d'onda per ogni oggetto campionato e quindi di confrontare o analizzare i risultati provenienti dagli spettrometri o altre tipologie di strumenti alloggiati su satellite.

Il valore di riflettività di un materiale non può fare a meno di considerare gli effetti atmosferici sulla propagazione del segnale, variabili da luogo a luogo e nel tempo, per questo motivo una classificazione assoluta, ovvero basata su confronto tra firme spettrali, ovvero funzioni di riflettività e librerie potrebbe essere un obiettivo realizzabile solo su un pianeta senza atmosfera [Dermanis, Biagi].

Inoltre l'assorbimento e la diffusione dell'atmosfera (vedi paragrafo 3.3.3) modificano molto il rapporto tra la radiazione elettromagnetica effettivamente registrata dal sensore, rispetto a quella emessa o riflessa dalla superficie terrestre: l'azione di assorbimento è molto selettiva, ogni componente atmosferico assorbe la radiazione solare in modo funzionale alla lunghezza d'onda della stessa, da ciò si deduce che la trasmittività  $\tau$  dell'atmosfera alla radiazione solare è variabile, registrando la possibilità di rilevamento dei segnali solo negli intervalli dello spettro elettromagnetico definiti *finestre atmosferiche* [Gomasca].

### **Orbite**

Un sensore registra l'energia emessa o riflessa da un corpo da una determinata posizione nello spazio. Le orbite percorse dai satellite possono essere diverse in termini di altitudine, orientamento e rotazione rispetto alla terra.

La spinta gravitazionale diminuisce più ci si allontana dalla Terra, mentre la forza centrifuga aumenta all'aumentare della velocità orbitale. Quindi un satellite in un'orbita bassa, cioè a una distanza di circa 700 km dalla Terra, è esposto ad una forte attrazione gravitazionale e si deve spostare ad una velocità considerevole per generare una forza centrifuga di pari entità. Esiste quindi una connessione diretta tra la distanza dalla Terra e la velocità orbitale del satellite.

Dato che la spinta gravitazionale della Terra bilancia la forza centrifuga, un satellite può restare nella stessa orbita per un lungo periodo di tempo. Poiché i satelliti sono in orbita al di fuori dell'atmosfera, non è presente la resistenza

**Spettroradiometro:** strumento per determinare la distribuzione dell'energia radiante nello spettro, funzioni combinate di uno spettrometro con quelle di un radiometro.

dell'aria, quindi per la legge d'inerzia la velocità del satellite rimane costante e il risultato è un'orbita stabile attorno alla Terra.

La relazione tra il periodo dell'orbita  $T$  e il raggio dell'orbita  $r$  è dato dall'equazione:

$$T = 2\pi r \sqrt{\frac{r}{g_s R^2}}$$

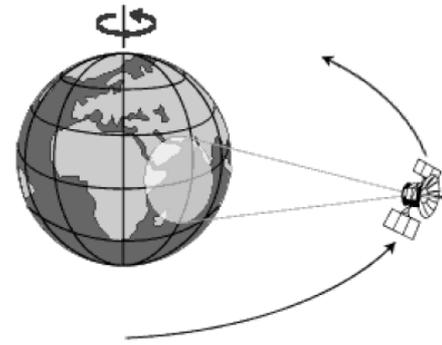
Dove  $g_s$  è l'accelerazione dovuta alla gravità ( $0,00981 \text{ kms}^{-1}$ ),  $R$  il raggio della terra (circa 6.380 km) e  $h$  l'altezza dell'orbita (ovviamente  $r = R+h$ ). per esempio  $h = 800 \text{ km}$  allora  $T \approx 6052 \text{ s} \approx 100.9 \text{ minuti}$  [Mather]. Ovviamente più considerevole è l'altezza maggiore sarà il periodo orbitale.

Satelliti ad una altezza di 36.000 chilometri di distanza dall'Equatore che vedono la stessa porzione di terra per tutto il tempo hanno un'orbita definita *geostazionaria*. Questi satelliti si muovono ad una velocità confrontabile con la rotazione della terra così da sembrare "stazionari" rispetto alla stessa, caratteristica che permette a questi satellite di osservare e collezionare informazioni in continuo su specifiche aree. Satelliti meteorologici e di telecomunicazioni, tra cui quelli televisivi, utilizzano questo tipo di orbita, i primi possono così monitorare prevedere le condizioni atmosferiche e la copertura nuvolosa di un intero emisfero, mentre i segnali provenienti dai secondi possono essere inviati in qualsiasi parte del mondo. I segnali di telecomunicazione si spostano in linee rette, quindi è necessario che i satelliti nelle loro posizioni restino in orbita stazionaria rispetto alla superficie della Terra.

Uno svantaggio delle orbite geostazionarie risiede nella grande distanza dalla Terra che riduce la risoluzione spaziale raggiungibile nell'ordine dei chilometri.

Molte piattaforme di telerilevamento sono progettate per seguire un'orbita (di norma Nord-Sud) che, insieme alla rotazione della terra (Ovest-Est), consente di coprire la maggior parte della superficie della terra in un determinato periodo di tempo. Mentre il satellite esegue rivoluzioni intorno alla propria orbita, la Terra ruota sul proprio asse. Queste orbite sono definite *quasi-polari*, per l'inclinazione dell'orbita relativa ad una linea congiungente i poli.

Molte di queste sono inoltre *elio-sincrone* poiché coprono una certa area del mondo ad un'ora locale costante del giorno. Ad una data latitudine, la posizione del sole nel cielo come il satellite passa sopra sarà la medesima durante la stessa stagione. Questo assicura condizioni di illuminazione conformi al momento di acquisizione dell'immagine in una specifica stagione in anni successivi, oppure sopra un'area particolare per una serie di giorni. Questo è un



Orbita geostazionaria (©CCRS/CCT)



Orbita polare (©CCRS/CCT)

fattore importante per il monitoraggio dei cambiamenti fra le immagini o per la mosaicatura di immagini adiacenti, poichè non devono essere corrette per condizioni differenti di illuminazione.

### **Swath**

Nel caso di orbite elio-sincrone, ogni volta che il satellite compie una rotazione completa della terra, viene effettuata una scansione di una nuova porzione della superficie. La zona "fotografata" sulla superficie, è definita *swath* e varia generalmente fra le dieci e le centinaia di chilometri in larghezza, a seconda dell'orbita o della tipologia di sensore impiegato. E' di fatto la scena, all'interno dell'angolo di vista il *FOV - Field of View* del satellite.

Dopo un certo numero di rotazioni si ha una scansione dell'intera superficie della Terra, che, a seconda della swath coperta è compresa tra pochi giorni e qualche settimana.



Swath (©CCRS/CCT)

## **2.2 Tipologie di sensori**

Si è accennato nel paragrafo introduttivo al fatto che la maggior parte della strumentazione a bordo dei satelliti misura e registra la radiazione elettromagnetica emessa e trasmessa dalla superficie terrestre, tuttavia la tipologia di strumentazione è assai differenziata e può essere classificata in diversi modi, prima di tutto in base a all'informazione che si vuole ottenere, sulla base di tre parametri: spettrale, spaziale e di intensità [Corista]. I satelliti possono montare a bordo strumenti imager, sounder, profiler, che enfatizzano l'informazione spaziale (a una, due e tre dimensioni), oppure spettrometri, che invece registrano il parametro spettrale, e ancora scatterometri, radiometri, polarimetri che misurano l'intensità della radiazione elettromagnetica registrabile.

In questo paragrafo si è fatto lo sforzo di classificare tali strumenti da diversi punti di vista, non significa naturalmente che essi rientrino in un'unica categoria, al contrario ogni strumento può essere spiegato da diversi punti di vista.

### **a) in base alla fonte di energia: sensori attivi e passivi**

Nella premessa si è accennato ad una prima distinzione tra sensori, di tipo attivo o passivo. Nel caso di strumenti a bordo di satelliti si hanno strumenti *passivi* che rilevano la radiazione elettromagnetica riflessa od emessa da fonti naturali, come il sole.

Questi sensori sono per esempio gli strumenti a bordo dei satelliti LANDSAT 5 (MSS- MultiSpectral Scanner, TM- Thematic Mapper), SPOT 5 (Doris- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, VEGETATION 2, HRG- High Resolution Geometric, HRS- High Resolution Stereoscopic), TERRA (Aster, Modis), ecc., oppure dei satelliti meteorologici METEOSAT (VISSR- Visible and Infrared Spin Scan Radiometer).

I *sensori attivi* invece rilevano la risposta riflessa da un oggetto irradiato da una fonte di energia generata artificialmente. La radiazione generalmente emessa da un antenna raggiunge l'oggetto e la frazione di energia riflessa viene rilevata e misurata da sensori del tipo *radar* o *lidar*.

Esempi di sensori attivi sono l'AMI -Active Microwave e l' RA-1- Radar Altimeter montati a bordo dei satelliti ERS 1 e ERS 2, oppure l'ASAR- Advanced Synthetic Aperture Radar, sul satellite dell'ESA ENVISAT.

I sensori passivi lavorano generalmente nella regione del visibile e dell'infrarosso, ma esistono anche sensori passivi nelle bande del microonde di tipo non imaging come il *radiometro* e il *sounder a microonde*, oppure imaging: il *radiometro a scansione*, il *sounder a scansione*, il *radiometro polarimetrico a scansione*. I sensori attivi lavorano sia nel campo delle microonde (radar) che nell'infrarosso visibile (lidar, laser), di giorno e di notte in qualsiasi condizione meteorologica.

Le caratteristiche di rilevamento, ma anche di uscita dei dati sono diverse tra sensori attivi e passivi, perciò i paragrafi successivi trattano alcune problematiche e caratteristiche tecniche in modo distinto.

#### Scanner multispettrale:

Serie di sensori allineati che scansiano e quantificano la radiazione elettromagnetica simultaneamente in diverse bande spettrali.

**Sounder:** strumento che misura profili di grandezze fisiche, solitamente atmosferiche (temperatura, pressione, umidità, etc.). Le misure possono essere prese sia sul piano orizzontale da sounder posizionati sul nadir, oppure sul piano verticale.

**Scatterometro:** strumento radar utilizzato per misurare la variazione del coefficiente di retro-diffusione del radar.

**Scatterometro ottico:** sensore attivo utilizzato per la misura dell'energia ritrasmessa (backscattered) di una superficie illuminata da laser.

**Spettrofotometro:** sensore per misurare il quantitativo dell'energia radiante o del flusso come funzione della lunghezza d'onda.

### Sensori attivi e passivi (query db Sensori)

Attivi			
Satellite		Sensori	Ente
ENVISAT	1	ASAR- Advanced Synthetic Aperture Radar	ESA- Europa
ERS 1 e 2	1	AMI- Active Microwave	ESA- Europa
	2	SAR- Synthetic Aperture Radar	
PRIRODA-MIR	1	ALISSA - Atmosphere par Lidar Sur Saliout	Russian Space agency RKA
RADARSAT- 1	1	SAR- RadarSat	RadarSat International- Canada

Passivi			
Satellite		Sensori	Ente
LANDSAT 5	1	MSS- Multispectral Scanner	NASA- USA
	2	TM - Thematic Mapper	
SPOT 5	1	Doris- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite	CNES- Francia
	2	VEGETATION 2	
	3	HRG- High Resolution Geometric	
	4	HRS- High Resolution Stereoscopic	
QUIKBIRD	1	Quikbird	DigitalGlobe
NOAA 14-18	1	AMSU-A- Advanced Microwave Sounding	NOAA- USA
	2	AVHRR/3- Advanced Very High Resolution Radiometer	
	3	HIRS/4- High Resolution Infra Red Radiation Sounder	
	4	MHS- Microwave Humidity Sounder	
	5	SBUV/2- Solar Backscatter Ultra violet instrument	
TERRA	1	Aster- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	NASA- USA
	2	Modis- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	

***b) in base all'orbita: sensori geostazionari, sensori quasi polari, eliosincroni, circolari***

E' stata già evidenziata nel paragrafo dedicato alle orbite la differenza tra orbite e relative missioni. I satelliti geostazionari sono caratterizzati dal fatto di operare da un'orbita elevata, dell'ordine dei 36.000 chilometri, e quindi di monitorare una scena molto ampia della superficie terrestre, con una risoluzione spaziale molto bassa. Questi satelliti e strumenti sono utilizzati per applicazione che necessitano di una visione globale e generale dei fenomeni o degli elementi da studiare. Si tratta per lo più di sensori dedicati alla meteorologia, allo studio dei cambiamenti climatici, all'oceanografia, ecc.

I sensori a bordo di satelliti su orbita polare, sono invece destinati alle misure e allo studio della superficie terrestre, con una scala di dettaglio maggiore, sia in termini spaziali che radiometrici. Anche in questo caso esistono diverse tipologie di strumenti, distinguibili per parametro misurabile (spettrale, di intensità, spaziale), per risoluzioni ottenibili, per modalità di scansione della scena utilizzata, ecc.

**Tabella orbite sensori**

Geostazionaria			
Satellite		Sensore	Ente
MSG- 2	1	GERB- Geostationary Earth Radiation Budget Experiment	EUMETSAT- Europa
	2	SEVIRI- Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager	
GOES- M	1	IMAGER-M	NOAA- USA
	2	SOUNDER	
GMS-5	1	VISSR (GMS)- Visible and Infrared Spin-Scan Radiometer	NASDA- Giappone
Fengyun- 2B	2	S-VISSR - S-Visible and IR Spin Scan Radiometer	NSMC- Cina
INSAT- 2E	1	VHRR- Very High Resolution Radiometer	ISRO- India

Elio-sincrona			
Satellite		Sensore	Ente
AQUA	1	AIRS- Atmospheric Infrared Sounder	NASA- USA
	2	AMSR-E- Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS	
	3	AMSU-A- Advanced Microwave Sounding	
	4	AMSU-B- Advanced Microwave Sounding	
	5	CERES- Clouds and Earth's Radiant Energy System	
	6	MODIS- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	
TERRA	1	ASTER- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	NASA- USA
	2	CERES- Clouds and Earth's Radiant Energy System	
	3	MISR- Multi-angle Imaging SpectroRadiometer	
	4	MODIS- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	
	5	MOPITT- Measurement Of Pollution In The Troposphere	
ENVISAT	1	AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer)	ESA- Europa
	2	ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)	
	3	DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)	
	4	GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)	
	5	MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument)	
	6	MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)	
	7	MWR (Microwave Radiometer)	
	8	RA-2 (Radio Altimeter)	
	9	SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)	
EROS A	1	EROS A	ImageSat International- Israele
ERS 2	1	AMI (Active Microwave)	ESA- Europa
	2	ATSR-2 (Along Track Scanning Radiometer)	
	3	GOME (Global Monitoring of Atmospheric Ozone)	
	4	RA (Radio Altimeter)	
	2	OCM (Ocean Color Monitor)	
Earth Probe	1	EP TOMS Earth Probe-Total Ozone Mapping Spectrometer	NASA- USA

Quasi polare elio-sincrona			
Satellite		Sensore	Ente
AURA	1	HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb Sounder)	NASA- USA
	2	MLS (Microwave Limb Sounder)	
	3	OMI (Ozone Monitoring Instrument)	
	4	TES (Tropospheric Emission Spectrometer)	
BEIJING-1	1	BEIJING-1-MS (Standard DMC sensor)	Surrey Satellite Technology Limited- Gran Bretagna
	2	Chinese Mapping Telescope	
MTI	1	TI- Multi-spectral Thermal Imager	U.S.Department of Energy- USA
NOAA 15-18	1	AMSU-A (Advanced Microwave Sounding)	NOAA- USA
	2	AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer)	
	3	HIRS/4 (High Resolution Infra Red Radiation Sounder)	
	4	MHS (Microwave Humidity Sounder)	
	5	SBUV/2 (Solar Backscatter Ultra violet instrument)	
TOPSAT	1	TOPSAT- PAN	British National Space Centre

Circolare			
Satellite		Sensore	Ente
ORBVIEW-3	1	ORBVIEW-3-	OrbImage- USA
SCISAT	1	CE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment - Fourier Transform Spectrometer)	Canadian Space Agency
	2	MAESTRO (Measurements of Aerosol Extinction in the Stratosphere and Troposphere Retrieved by Occultation)	
SORCE	1	ASIM (Spectral Irradiance Monitor)	NASA- USA
	2	SOLSTICE A & B (Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment)	
	3	TIM (Total Irradiance Monitor)	
	4	XPS (XUV Photometer)	
FORMOSAT-3	1	GOX- Global Positioning Satellite Occultation Experiment	NSPO- Taiwan
	2	TIP-Tiny Ionosphere Photometer	
	3	TBB- Tri-Band Beacon	
AlSat-1	1	Sensore SSTL	Surrey Satellite Technology Limited- Gran Bretagna

Altro tipo di orbita			
Satellite		Sensore	Ente
SRTM	1	SIR-C	NASA-USA
	2	X-SAR (Synthetic Aperture Radar)	
TOPEX/POSEIDON	1	ALT (Dual Frequency Radar Altimeter)	NASA- USA
	2	DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)	
	3	TMR (TOPEX Microwave Radiometer)	
Jason-1	1	DORIS- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)	NASA- USA
	2	JMR- Jason-1 Microwave Radiometer Poseidon 2 altimeter	
DK-1	1	DK-1- camera	Russian Space agency RKA

***c) in base all'intervallo di lunghezza d'onda misurato: sensori elettro-ottici, a microonde, sensori termici, radio e ultravioletti***

A seconda dell'intervallo di lunghezze d'onda da analizzare, i sensori, siano essi attivi o passivi, si suddividono in sensori elettro-ottici e a microonde.

I sensori elettro-ottici, diversamente da quelli ottici, come le camere fotogrammetriche, le camere panoramiche, ecc. montate solitamente a bordo di aerei, trasformano l'irradianza in un segnale elettrico (sia esso sotto forma di tensione o corrente) utilizzando un rilevatore fotosensibile.

I sensori a microonde misurano la medesima regione dello spettro elettromagnetico e possono essere sia di tipo attivo che passivo.

Le grandezze misurate nel campo del microonde da sistemi passivi come i radiometri sono per esempio la temperatura di brillantezza emessa dalla superficie terrestre e dall'atmosfera.

I sistemi attivi, come il radar, misurano il coefficiente di *back-scattering* (radiazione retrodiffusa dalla superficie terrestre e atmosfera).

I parametri utilizzati sono la frequenza, la polarizzazione e l'angolo di incidenza dell'impulso.

Una categoria a parte è quella relativa ai sensori che misurano l'energia nelle bande dell'infrarosso termico, e che rilevano l'energia emessa dalla superficie terrestre, ovvero la temperatura in superficie e le proprietà termiche degli oggetti. Questi rilevatori termici utilizzano uno o più misuratori di temperatura interna per il confronto con la radiazione rilevata, in modo da essere collegati con la temperatura radiante assoluta e sono tarati su temperature vicino all'assoluto zero in modo da limitare le loro emissioni termiche. Esistono poi sensori anche nelle regioni dell'ultravioletto, utilizzati principalmente per studi di chimica dell'atmosfera, come il GOMOS su ENVISAT o il GOME su ERS 2, entrambi costruiti per misurare il quantitativo di ozono (mappa), altre tracce di gas, come aerosol e microparticelle inquinanti nella bassa atmosfera.

### Panoramica dei principali sensori ultravioletti, elettro-ottici, termici, a microonde

Ultravioletto				
Satellite		Sensore	n° bande/bande ultravioletto	Intervallo lunghezza d'onda bande ultravioletto
ENVISAT	1	GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)	3/1	0,25- 0,675
	2	SCIAMACHY- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography	15/3	0,24-0,38
ERS- 2	1	GOME- Global Monitoring of Atmospheric Ozone	4/2	0,24- 0,405

Elettro-ottici				
Satellite		Sensore	n° bande visibile/bande infrarosso	Intervallo lunghezza d'onda mini/max
ENVISAT	1	AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer)	2/3	0,55- 3,7*
	2	MERIS- Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument	12/3	0,4125- 0,9
	3	MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)	0/5	0,685-2,41
	4	SCIAMACHY- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography	4/8	0,394- 2,38
ERS- 2	1	GOME- Global Monitoring of Atmospheric Ozone	2/0	0,4-0,79
JERS-1	1	OPS (Optical Sensor)	2/6	0,52-2,4
MTI Multi-spectral Thermal Imager	1	MTI Multi-spectral Thermal Imager	3/10	0,45-5,05

Termici				
Satellite		Sensore	n° bande/bande termiche	Intervallo lunghezza d'onda bande termiche
ENVISAT	1	AATSR- Advanced Along Track Scanning Radiometer	7/2	10, 8- 12
ERS- 2	1	ATSR- Along Track Scanning Radiometer	7/2	10, 8- 12
MTI Multi-spectral Thermal Imager	1	MTI Multi-spectral Thermal Imager	16/3	8,01- 10,7

Microonde				
Satellite		Sensore	bande microonde	Frequenza bande microonde (Ghz)
ENVISAT	1	ASAR- Advanced Synthetic Aperture Radar	Banda C	5,3
	2	MWR- Microwave Radiometer	Banda 1 Banda 2	23,8 36,5
	3	SCIAMACHY- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography		
ERS 2	1	AMI- Active Microwave	Banda C	5,3
RADARSAT-1	1	SAR- RadarSat	Banda C	5,6
JERS-1	1	SAR (JERS-1) (Synthetic Aperture Radar)	Banda L	1,275

***d) in base al campionamento spettrale: sensori pancromatici, multispettrali, iperspettrali***

I sensori *pancromatici* registrano una sola banda spettrale, molto ampia, solitamente tra 0,5-0,9  $\mu\text{m}$ , corrispondente alla parte visibile dello spettro. È così possibile ottenere immagini ad elevata risoluzione spaziale e radiometrica. L'osservazione con strumenti multispettrali è realizzata attraverso la registrazione simultanea di più bande spettrali, tipicamente quattro: blu, verde, rosso e infrarosso vicino. La risoluzione geometrica risulta inferiore rispetto al corrispondente pancromatico (di solito rapporto 1:4), ma il carico informativo che portano è di tipo spettrale, è così possibile riconoscere le superfici al suolo attraverso la loro firma spettrale al fine di generare mappe tematiche su vegetazione, uso o copertura dei suoli, censimento dell'urbano, ecc..

Lo sviluppo delle tecnologie legate alla sensoristica ha portato in questi ultimi anni allo sviluppo di *sensori iperspettrali* per l'osservazione della terra in grado di misurare la radianza spettrale in un numero molto elevato (svariate centinaia) di bande. Grazie alle caratteristiche di elevata risoluzione e fitto campionamento spettrale, le immagini iperspettrali fornite da tali sensori sono sempre più utilizzate per progetti di classificazione e di uso e copertura del suolo. Tuttavia gli strumenti a bordo dei satelliti sono meno utilizzati rispetto a quelli montati su velivoli, per una serie di ragioni che saranno evidenziate successivamente.

**Panoramica dei principali sensori pancromatici, multispettrali, iperspettrali**

Pancromatico				
Satellite		Sensore	n° bande	Lunghezza d'onda min/max
IKONOS	1	OSA (Optical Sensor Assembly) (PAN)	1	0,5-0,9
QUICKBIRD	1	QUICKBIRD (PAN)	1	0,45-0,9
EROS- A	1	EROS_A_P	1	0,5-0,9

Multispettrale				
Satellite		Sensore	n° bande	Lunghezza d'onda min/max
LANDSAT	1	TM: Thematic Mapper	7	0,45- 12,5
NOAA	1	AVHRR/3: Advanced Very High Resolution Radiometer	6	0,58- 12,4
TERRA	1	ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	15	0,52- 11,65
	2	MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	36	0,405- 14,385
IKONOS	1	OSA (Optical Sensor Assembly)_MMS	4	0,45-0,88
QUICKBIRD	1	QUICKBIRD_MMS	4	0,45-0,9

Iperspettrale				
Satellite		Sensore	n° bande	Lunghezza d'onda min/max
E0- 1	1	Hyperion -High resolution hyperspectral imager with 220 spectral bands	220	0.4- 2.5
PROBA	1	CHRIS- Compact High Resolution Imaging Spectrometer	18	0.43- 1.035

### ***e) in base al prodotto: imaging, non imaging (profiler, sounder)***

I sensori *imaging* registrano dati da cui è possibile ricavare direttamente mappe bidimensionali delle misure di radianza registrate utilizzando diverse tecniche di scansione, rappresentate da pixel ordinati su righe e colonne.

I sensori *non imaging* producono segnali in uscita che non sono direttamente traducibili in mappe, sono solitamente strumenti per misure monodimensionali, come altezze (radar altimetro, sounder atmosferico), o strumenti profiler, che misurano il profilo verticale di una grandezza fisica, per esempio l'ozono, come il sensore montato sul satellite ERS-2 GOME (Global Monitoring of Atmospheric Ozone). Per ricavare in fase successiva mappe bidimensionali per tali misure è necessario operare con differenti tecniche di interpolazione.

### **Tipologia principali sensori imaging, profiler, sounder**

	Sensori elettro-ottici	Sensori a microonde
<b>Imaging</b>	Radiometro a scansione meccanica Radiometro pushbroom	Radiometro a scansione RAR/SAR Scatterometro per il vento
<b>Non imaging</b>	Radiometro spettro radiometro LIDAR	Radiometro Sounder a microonde Scatterometro Altimetro

## 2.3 Approfondimenti sui sensori passivi

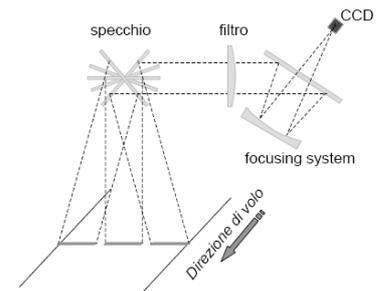
### 2.3.1 Modalità di ripresa della scena

I sensori più utilizzati nel telerilevamento aereo e da satellite sono costituiti da rivelatori ad accoppiamento di carica, i Charge Couplet Device- CCD. Quando l'energia elettromagnetica colpisce il CCD, il sensore rilascia un flusso di elettroni proporzionale all'intensità della luce incidente [Gomasca]. I CCD non hanno solo la funzione di catturare l'immagine che si forma sul sensore, ma anche quella di trasformarla in una matrice di numeri (i Digital Number) e memorizzarla su un supporto elaborabile da un computer [Galetto].

Le geometrie di presa utilizzate nel telerilevamento possono essere di tipo puntuale (come nelle camere fotogrammetriche su velivoli), a matrice (poco utilizzate) o a scansione. I metodi principali di scansione della scena per le piattaforme satellitari sono in modalità puntuale- *whiskbroom* o lineare- *pushbroom*.

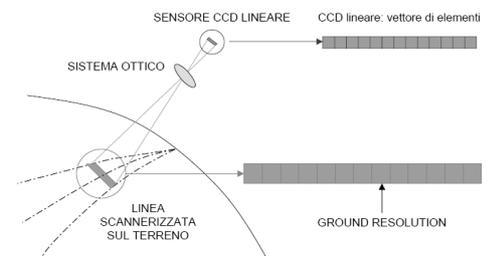
#### Scansione puntuale - scanner a specchio rotante

Nel caso più semplice il sistema è composto da un singolo detector, orientato perpendicolarmente rispetto alla direzioni di moto del satellite, i pixel della riga sono registrati in sequenza con l'ausilio di uno specchio rotante che cambia la direzione di osservazione. Terminata la scansione di una riga si inizia una nuova scansione, che per il moto del satellite si riferisce ad una riga successiva. L'energia elettromagnetica incidente sullo specchio viene inviata ad un prisma che, in corrispondenza delle diverse direzioni di rifrazione, ripartisce le differenti bande spettrali ai relativi sensori. Le immagini vengono acquisite sotto forma di strisciate. Questa modalità di scansione è anche chiamata *whiskbroom*, ed è più adatta ai sistemi con una discreta risoluzione spaziale, e non per un utilizzo fotogrammetrico, date le forti distorsioni causate proprio dalle caratteristiche di presa.



#### Scansione lineare along-track

I dispositivi *along-track* usano il moto della piattaforma per registrare linee di scansione successive e per creare un'immagine bidimensionale, perpendicolare alla direzione di volo ma, anziché uno specchio rotante, usano rivelatori CCD allineati linearmente.

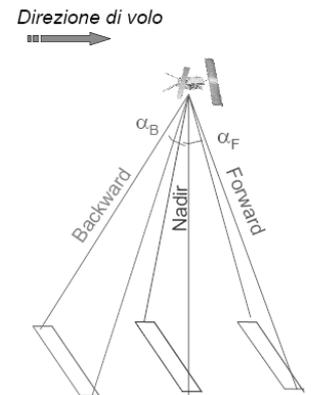


#### Pushbroom

Il metodo prevede l'osservazione simultanea di una intera riga dell'immagine mediante un vettore CCD per ciascun pixel della riga.

L'allineamento dei rivelatori e il movimento *push-broom* permettono ad ogni sensore di vedere e misurare l'energia proveniente dalla superficie per un periodo di tempo più lungo (*dwell time*). Perciò è rilevata più energia migliorando la risoluzione radiometrica. Anche l'IFOV è più piccolo e le bande spettrali per ogni rivelatore sono più strette. Inoltre non ha parti mobili e ciò lo rende più stabile.

Alcuni sistemi *along-track* inoltre permettono di rilevare la scena in diverse modalità, è infatti possibile che le linee CCD siano allineate parallelamente tra loro e perpendicolari alla direzione di volo, oppure che acquisiscano immagini contemporaneamente in direzione nadir e off-nadir. In questo modo si ottengono immagini stereo, acquisite sulla stessa orbita ma con piccole differenze temporali, dell'ordine dei secondi.



### 2.3.2 Risoluzioni dei sensori passivi

#### Risoluzione spaziale

La risoluzione spaziale può essere definito in diversi modi. La definizione più comune, definisce la risoluzione spaziale in base all'*IFOV- Instantaneous Field of View* del sensore, definito come il cono di visibilità di un'area a terra che, teoricamente, è rilevata dallo strumento da una certa altitudine, in un determinato istante [Mather].

L'*IFOV* è misurato in angoli (radianti) se si considera l'apertura dello strumento, o in dimensione (metri e suoi multipli) di apertura della scena a terra. Poiché la porzione vista dal satellite è avvicicabile ad un fascio, tale apertura di fatto è paragonabile ad un diametro, dove la distribuzione dell'intensità dell'energia è maggiore al centro e diminuisce ai bordi. Assimilando questo comportamento ad una curva gaussiana, la funzione di distribuzione dell'intensità è chiamata *PSF Point Spread Function*. Un'alternativa all'*IFOV* per definire la risoluzione spaziale è basata proprio sulla *PSF* dell'*IFOV*. Per esempio la risoluzione spaziale del Landsat 4 e 5 TM è 30 m ed è basata sul *PSF*, così come per il sensore MMS per cui la risoluzione è 90 metri calcolata come *PSF* e 79 metri come *IFOV*.

Gli altri requisiti di tipo spaziale che devono essere considerati nella scelta del sensore da utilizzare per le diverse applicazioni, sono la copertura della ripresa aerea, ovvero la *swath*, di cui si è già detto, e le accuratezze geometriche.

#### Risoluzione spettrale

Molte delle immagini digitali registrate dai sensori a bordo dei satelliti sono multispettrali, ovvero sono singole immagini registrate separatamente e in bande spettrali discrete, con il termine risoluzione spettrale si intende la

larghezza di queste bande spettrali e il numero di bande che determinano il grado con il quale singoli oggetti sono distinguibili in un'immagine multispettrale. Per ottenere risposte differenti e quindi un elevato valore di discriminazione sarebbe necessario avere uno strumento molto sensibile, come i sensori iperspettrali, purtroppo un'elevata risoluzione spettrale riduce il rapporto segnale/rumore del segnale di uscita del sensore, rumore che è la variazione involontaria aggiunta al segnale, sia di natura casuale che sistematica, causata dalle componenti meccaniche o elettroniche degli strumenti.

### ***Risoluzione radiometrica***

La risoluzione radiometrica rappresenta invece la minima variazione di segnale che il sistema riesce a distinguere. Ci sono modi diversi per esprimere questo parametro (in percentuale su un valore medio del segnale, in temperatura equivalente al livello di rumore nei sensori nell'infrarosso termico, in dB nei sensori radar) che è anche vincolato dal rapporto tra segnale utile proveniente dall'oggetto e il rumore introdotto dal sensore, come visto sopra [Pierdicca].

Di fatto si riferisce al numero di livelli digitali utilizzati per esprimere i dati raccolti dal sensore. Maggiore è il numero di livelli, maggiore è il dettaglio dell'informazione. Migliore è la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibile è nel registrare piccole differenze nell'energia riflessa o emessa. E' anche definito come il numero di livelli discreti in cui può venire suddiviso un segnale. Agli estremi si considerano immagini digitali a due livelli, in cui il valore 0 è rappresentato dal nero e il livello 1 con il bianco. Incrementando i livelli aumenta il grado di discriminazione degli elementi di un'immagine, fino ad avere immagini a diversi livelli di grigio.

Il numero di livelli è espresso in termini di numeri binari (bit). Per due livelli i numeri di bit richiesti è 1, per 256 livelli sono richiesti 8-bit, ovvero  $2^8 = 256$  byte.

Altri requisiti da considerare relativi a questo parametro di intensità, sono l'accuratezza radiometrica, ovvero l'accuratezza della misura, intesa come differenza tra valore misurato e valore vero del parametro radiativo o geofisico e infine l'intervallo dinamico, intervallo tra minimo e massimo valore misurabile.

### ***Risoluzione temporale***

Una delle caratteristiche importanti del telerilevamento è la possibilità di monitorare l'evoluzione di eventi e fenomeni, attraverso lo studio di immagini della stessa scena registrate in tempi successivi. Per risoluzione temporale si

intende il tempo che intercorre tra la registrazione di una scena e una nuova ripresa della stessa, vista con la stessa angolatura. Per i satelliti geostazionari viene misurata in minuti, mentre per i satelliti con orbita polare (o quasi polare) in giorni.

Infatti il periodo di rivisitazione, ovvero il tempo che impiega il satellite a compiere un ciclo di orbita (ovvero a ripassare sulla stessa area), per un satellite con orbita polare può essere di diversi giorni.

### **2.3.3 Interazioni della radiazione con l'atmosfera e la superficie terrestre**

Le interazioni atmosferiche della radiazione elettromagnetica influenzano in modo più o meno rilevante le risposte spettrali dei diversi oggetti rilevati, a seconda del percorso che l'onda deve compiere prima di essere registrata dal sensore. Maggiore è tale percorso, maggiori sono le influenze atmosferiche sui valori di radianza registrata dal sensore.

L'atmosfera modifica la radiazione utile al telerilevamento nei modi di seguito brevemente illustrati.

#### ***Scattering***

Fenomeno di dispersione delle onde elettromagnetiche che si manifesta quando particelle o molecole di gas presenti nell'atmosfera interagiscono con essa provocando il ri-direzionamento dell'energia elettromagnetica rispetto al percorso originale

Quanto il fenomeno di scattering influisca sull'energia registrata dipende da molti fattori, come la lunghezza d'onda della radiazione, la quantità di molecole e particelle presenti, e la distanza che deve percorrere la radiazione attraverso l'atmosfera (dalla superficie terrestre al sensore). Sono possibile tre tipologie di scattering:

#### ***Rayleigh scattering***

Fenomeno causato da molecole con diametro inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione, come molecole di nitrogeno oppure ossigeno. Il Rayleigh scattering avviene prevalentemente per radiazioni su bande corte (violetto e blu) rispetto ad onde più lunghe e più frequentemente nella parte più alta dell'atmosfera. Così quando la radiazione solare passa attraverso l'atmosfera, le onde più basse o corte dello spettro sono ridiffuse maggiormente rispetto a quelle più lunghe.

Il Rayleigh è una delle cause principali dell'effetto foschia rilevabile nella ripresa di immagini che è parzialmente attenuabile con l'uso di filtri che non trasmettono lunghezze d'onda corte.

### *Mie scattering o da aerosol*

Fenomeno che interessa lunghezze d'onda più lunghe di quelle interessate dalla diffusione di Rayleigh.

Avviene quando le particelle sono all'incirca della stessa grandezza della lunghezza d'onda della radiazione. Polveri, polline, fumo a vapor acqueo sono le cause comuni di questo fenomeno di dispersione. Il Mie scattering avviene soprattutto nella parte più bassa dell'atmosfera dove particelle più grosse sono più abbondanti e quando c'è copertura nuvolosa.

### *Nonselective scattering.*

Questo fenomeno avviene quando il diametro delle particelle è più grande rispetto alle lunghezze d'onda della radiazione.

Le gocce dell'acqua e le grandi particelle di polvere diffondono in modo pressoché uguale tutte le lunghezze d'onda del visibile e dell'infrarosso riflesso. La dispersione non selettiva prende il nome dal fatto che tutte le lunghezze d'onda sono ri-diffuse ugualmente. Questo tipo di interazione con l'atmosfera fa apparire bianche ai nostri occhi la nebbia e le nubi, proprio perché la luce rossa, blu, verde e tutta è diffusa in quantità pressoché uguale (blu+ verde+ rosso = luce bianca).

### *Assorbimento atmosferico*

Un altro fenomeno che può avvenire quando la radiazione elettromagnetica interagisce con l'atmosfera è l'assorbimento. Contrariamente alla dispersione, questo fenomeno induce le molecole nell'atmosfera ad assorbire l'energia alle varie lunghezze d'onda. L'ozono, l'anidride carbonica ed il vapore acqueo sono i tre elementi atmosferici principali che assorbono la radiazione per poi riemetterla sotto forma di energia radiante con lunghezza d'onda maggiore. L'ozono assorbe la radiazione ultravioletta dal sole, l'anidride ovvero il gas serra tende ad assorbire fortemente la radiazione nella parte dell'infrarosso lontano dello spettro.

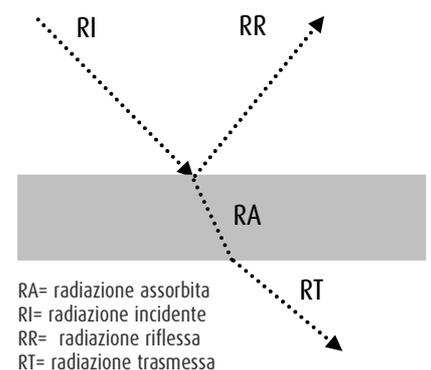
Il vapore acqueo nell'atmosfera assorbe gran parte della radiazione nelle bande più lunghe dell'infrarosso e più corte del microonde. La presenza di vapore acqueo nell'atmosfera più bassa varia notevolmente da luogo a luogo e lungo l'arco dell'anno

Poiché questi gas assorbono l'energia elettromagnetica in regioni molto specifiche dello spettro, è possibile individuare "zone" dello spettro che non sono influenzate da tale assorbimento atmosferico e quindi utilizzabili per il telerilevamento, sono le cosiddette *finestre atmosferiche*.

### *Interazione con la superficie terrestre*

Integrazione, trattamento e distribuzione dei dati territorio- ambiente acquisiti da sensori a bordo di piattaforme satellitari, aeree, veicolari e marine.

Documento: 1 Sensori a bordo di piattaforme satellitari Autore: Sdc Data: 30 agosto 2006



La radiazione che non è assorbita o diffusa nell'atmosfera può raggiungere ed interagire con la superficie della terra. Le forme di interazione che possono avvenire quando l'energia giunge alla superficie sono: *assorbimento, riflessione, trasmissione e rifrazione.*

L'energia incidente interagisce con la superficie in uno o più di questi tre modi. Le proporzioni di ciascuna interazione dipendono dalla lunghezza d'onda dell'energia, dal materiale e dalle condizioni dell'oggetto rilevato.

#### *Assorbimento*

Fenomeno che si manifesta quando la radiazione elettromagnetica è assorbita dalla superficie terrestre, per le caratteristiche chimico fisiche della stessa. Per esempio la vegetazione assorbe la maggior parte della radiazione incidente nella banda del rosso, per poi riemetterla sotto forma di energia termica a lunghezza d'onda maggiore.

#### *Riflessione*

Fenomeno provocato dall'incidenza del raggio luminoso su una superficie non trasparente e diretto in altra direzione senza che avvenga un cambiamento nella frequenza della radiazione. Il tipo di riflessione dipende dalla rugosità della superficie in confronto alla lunghezza d'onda dell'energia incidente: se è liscia in relazione alla lunghezza d'onda si ha una riflessione speculare, ovvero la radiazione incidente viene riflessa in un'unica direzione. Se la superficie è invece irregolare, la luce viene riflessa in modo diffuso

Se le lunghezze d'onda sono molto più piccole delle variazioni di superficie o delle dimensioni delle particelle che compongono la superficie, la riflessione diffusa sarà contenuta.

#### *Trasmissione*

Avviene quando la radiazione passa attraverso un mezzo senza subire una significativa attenuazione. La trasmissione dipende dalla lunghezza d'onda, esistono infatti corpi opachi in alcune lunghezze d'onda e trasparenti per altre.

#### *Rifrazione*

Avviene quando il raggio di luce attraversa due mezzi con indici di rifrazione o costanti dielettriche differenti. E' un cambiamento causato dalla variazione di velocità di propagazione dell'energia elettromagnetica. Le radiazioni con lunghezza d'onda più corta vengono rifratte maggiormente, cioè vengono deviate di più dalla loro traiettoria originale, di quelle con lunghezza d'onda più lunga. Il raggio luminoso viene curvato secondo la legge dell'ottica che lega gli angoli di incidenza ( $\alpha_1$ ) e di rifrazione ( $\alpha_2$ ), secondo la formula:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

**Indice di rifrazione di un mezzo:** il rapporto fra la velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica nel vuoto e la velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica nel mezzo. È uguale alla radice quadrata del rapporto fra la costante dielettrica nel mezzo e la costante dielettrica nel vuoto. L'indice di rifrazione varia in funzione della frequenza.

Nell'atmosfera questo fenomeno avviene al passaggio dei diversi strati atmosferici caratterizzati da umidità e temperature differenti. Tali variazioni influenzano la densità degli strati atmosferici causando una curvatura del raggio che li attraversa. Questo fenomeno è osservabile in estate durante le giornate molto calde, in cui si osserva un "tremolio" di oggetti posti in lontananza, dovuto al passaggio della luce vicino a superfici molto calde.

### **2.3.4 Distorsioni geometriche delle immagini**

Tutte le immagini derivate da satellite e non elaborate (*raw*) sono caratterizzate da distorsioni geometriche. È un problema intrinseco al telerilevamento, poiché si deve rappresentare la superficie tridimensionale della terra in immagine bidimensionale. Questi errori sono determinati da una serie di fattori, come:

- la prospettiva dell'ottica del sensore,
- il movimento del sistema di scansione,
- il movimento e instabilità della piattaforma,
- l'altezza della piattaforma, l'assetto e la velocità,
- la morfologia del terreno,
- la curvatura e rotazione della terra.

La geometria delle immagini registrate per esempio con scanner along-track è simile per ogni linea di scansione a quella di una fotografia aerea poiché ogni rivelatore essenzialmente acquisisce "una fotografia istantanea" per ogni pixel al suolo. Le variazioni geometriche fra le linee sono causate da variazioni casuali dovute all'altezza dell'orbita e al comportamento di moto della piattaforma lungo la direzione di volo.

Le immagini acquisite da scanner across-track sono invece soggette a due tipi principali di distorsioni geometriche. Anch'esse hanno una deformazione simile alle fotografie aeree, il cosiddetto *relief displacement* causato dalle variazioni di rilievo dei punti rispetto a un piano di riferimento misurato lungo una direzione passante per il nadir, ma soltanto nel senso parallelo alla direzione di scansione.

Un'altra distorsione è dovuta alla rotazione dell'ottica di scansione: mentre il sensore registra ogni linea, la distanza fra il sensore e la terra aumenta ai lati della scena. Anche se lo specchio di scansione ruota ad una velocità costante, l'IFOV del sensore si muove più velocemente (rispetto alla superficie) e scansiona un'area maggiore quando si muove più vicino ai bordi. Le fonti di distorsione geometrica e dell'errore posizionale variano al variare delle situazioni. Nella maggior parte dei casi è possibile rimuovere o ridurre questi

#### **Riflettanza**

Misura della capacità di una superficie di riflettere l'energia incidente: cioè rapporto tra energia riflessa e energia incidente. Si parla di fattore di riflessione spettrale quando ci si riferisce a un determinato intervallo di lunghezza d'onda dell'energia incidente."

errori, che in ogni caso devono essere considerati prima di effettuare le misure o estrarre informazioni da un'immagine.

### **2.3.5 Correzioni e pre-elaborazione dei dati**

Prima di essere utilizzati i dati registrati dai sensori necessitano di alcune elaborazioni, in cui si cercano di correggere gli errori, il rumore e le distorsioni introdotte durante l'acquisizione dell'immagine, così da poter ottenere una rappresentazione della scena osservata pronta per l'interpretazione. Le fasi di acquisizione fino alla trasmissione dei dati digitali a stazioni a terra possono riassumersi in:

- Acquisizione dei dati, e successiva registrazione in diversi canali spettrali, da parte di un sensore;
- eventuale compressione dei dati ;
- trasmissione ad una stazione di terra;
- pre-elaborazione generica (correzioni della sensibilità non uniforme dei sensori, eventuale ricampionamento);
- applicazione di correzioni più specifiche (per esempio georeferenziazione, ortorettifica, ecc.), che consentono di ottenere *una serie* di prodotti caratterizzati da diversi livelli di precisione;
- formattazione di ogni prodotto in un file con specifico formato.

Nel pre-processamento delle immagini rilevate, ovvero per i punti 5 e 6, le operazioni fondamentali sono la correzione geometrica, atmosferica e radiometrica. I livelli e le metodologie adottate per le diverse correzioni dipendono soprattutto dall'applicazione per cui si usano le immagini.

#### ***Correzione radiometrica***

Quando la radiazione raggiunge il sensore, il segnale viene immagazzinato come dato digitale DN-*Digital Number*, cioè come un valore numerico direttamente proporzionale all'intensità del segnale ricevuto. La prima forma di calibrazione, chiamata calibrazione al sensore, consiste nel tradurre questa grandezza adimensionale (il DN) in una grandezza fisica. La grandezza fisica comunemente utilizzata è la radianza, che rappresenta la quantità di energia trasmessa o ricevuta (espressa in Watt) come funzione della lunghezza d'onda della radiazione stessa (in  $\mu\text{m}$  o cm) e della superficie radiante (in metri o cm). La calibrazione al sensore è solo il primo passo verso la reale interpretazione del segnale che subisce profonde modifiche nel suo percorso dalla sorgente all'oggetto, e di nuovo dall'oggetto al sensore. La correzione radiometrica è la procedura di calibrazione e correzione delle variazioni dei parametri di gain (ovvero il rapporto tra il valore di una grandezza sottoposta al processo di

amplificazione e il valore iniziale della grandezza. In un dispositivo elettronico il fattore di amplificazione è il rapporto tra la tensione di uscita e quella di ingresso) e di offset (Dato un segnale o una grandezza variabile, indica la quantità costante che viene sommata o sottratta a tutto il segnale o a tutta la grandezza variabile). Questi parametri permettono appunto di risalire al valore di radianza che il sensore ha misurato, prima di essere trasformato in un segnale digitale. Essi variano sensibilmente lungo la vita del sensore, pertanto per effettuare una correzione precisa è opportuno conoscere i parametri di calibrazione quasi simultanei rispetto al tempo di ripresa.

Le immagini da satellite in commercio riportano, all'interno dei file ausiliari, i dati per convertire il valore digitale del pixel dell'immagine in valori di radianza secondo la formula:

$$Ln^* = a_0 + a_1 PV$$

dove

$Ln^*$  = la radianza apparente

$a_0$  = offset

$a_1$  = gain

PV = valore digitale del pixel

### ***Correzione atmosferica***

Non tutta la radiazione solare riflessa o emessa dalla superficie terrestre raggiunge i sensori, proprio perché l'atmosfera funziona da filtro selettivo alle diverse lunghezze d'onda e parte dell'energia elettromagnetica viene persa nei fenomeni di assorbimento e scattering.

Le correzioni degli effetti atmosferici sono necessarie poiché la lunghezza dei percorsi di andata e ritorno delle onde elettromagnetiche nell'atmosfera è tale da produrre significative alterazioni nel segnale ricevuto dal sensore. Solitamente le correzioni atmosferiche, ma anche la calibrazione ai sensori si rende necessaria nei processi di confronto tra immagini classificate provenienti da sensori diversi, o immagini multitemporali della stessa scena, o quando lo scopo dell'analisi dei dati è l'identificazioni dei cambiamenti (come per l'elaborazioni di mappe d'uso del suolo). Per quanto riguarda le correzioni atmosferiche esistono due metodologie con cui procedere:

La tecnica "*Dark Object Subtraction*" con cui si individua sull'immagine un "Dark Object" che si suppone abbia radianza pari a zero in tutte le bande. Se il valore di radianza di tale oggetto risulta maggiore di zero si attribuisce quel valore alla diffusione atmosferica. Il contributo dell'atmosfera così individuato viene sottratto a tutta l'immagine.

Altrimenti è possibile stimare gli effetti dell'atmosfera per mezzo di modelli analitici di trasferimento radiativo implementati da codici come il MODTRAN e il 6S. Per simulare le correzioni atmosferiche da apportare ai dati telerilevati è necessario fornire come ingresso ai programmi la configurazione dell'atmosfera corrispondente ai dati telerilevati, ovvero descrivere nel modo più accurato possibile la situazione ambientale al momento dell'acquisizione dei dati.

Il modello *6S (Second simulation of the Sensor signal in the solar Spectrum)* è in grado di simulare una superficie non Lambertiana per modellare il segnale misurato dal sensore. Questo modello include dati per il calcolo dell'assorbimento atmosferico utilizzando un maggior numero di gas atmosferici.

### ***Correzione geometrica***

La correzione si rende necessaria per eliminare le deformazioni introdotte dal sistema di ripresa a causa dell'assetto della piattaforma, del tipo di sensore, della morfologia della scena, o comunque per migliorare la coerenza geometrica. Avendo a disposizione più immagini corrette della stessa scena, è possibile confrontare i valori spettrali del pixel in un numero più elevato di bande, e ottenere informazioni più accurate sulla posizione degli oggetti osservati e sulla loro natura. Si tratta di operazioni per scalare le immagini e georeferenziarle. La tecnica relativa a tali correzioni è definita *registrazione*.

Il ricampionamento invece consiste nell'assegnare al pixel un valore di radianza. Poiché è già avvenuta la registrazione, è necessario operare per interpolazione, esistono differenti modi, che per il momento elenchiamo semplicemente:

- Nearest neighbor
- Bilinear Interpolation
- Bicubic Interpolation

mantenendo inalterata le proprietà spettrali, radiometriche e spaziali dei pixel.

## **2.4 Approfondimenti sui sensori attivi**

Anche nel caso dei sensori attivi, che utilizzano una fonte diversa dal sole per l'emissione di energia elettromagnetica è possibile avvalersi di alcune delle distinzioni e classificazioni fatte precedentemente: ci sono infatti sensori attivi nel campo del visibile e dell'infrarosso e sensori attivi nelle microonde, che a loro volta si possono suddividere in due categorie: sensori che restituiscono un'immagine (imaging), come i sistemi radar e sensori che invece misurano e registrano in un'unica direzione lineare come gli altimetri o gli scatterometri (no- imaging).

Nel caso di piattaforme satellitari lo sviluppo più interessante è stato realizzato nel campo dei sistemi attivi operanti nella regione del microonde, ovvero i sistemi radar. Meno utilizzati invece i sensori attivi operanti nelle bande del visibile e infrarosso (0,3- 15  $\mu\text{m}$ ), come i lidar, sistemi di rilevamento in campo ambientale basati sull'uso del laser. La strumentazione laser, sia di tipo imaging (laser scanner) che no- imaging (laser altimetro) verrà approfondita nei capitoli dedicati alle piattaforme aeree, dove questa tecnologia, per ragioni tecniche e applicative è molto più sviluppata ed utilizzata.

#### **2.4.1 Sensori attivi nella regione del visibile e dell'infrarosso Laser**

Il *lidar- Light Detection and Ranging* è un sensore che usa lo stesso principio del radar: emette un fascio elettromagnetico che viene diretto verso un oggetto o una porzione di superficie terrestre, la luce trasmessa interagisce con il questa superficie, la frazione ri- diffusa di energia ritorna allo strumento e registrata. E' possibile quindi determinare alcune caratteristiche dell'oggetto e la sua distanza dal sensore misurando il tempo di andata e ritorno del segnale. La differenza sostanziale con i sistemi radar sta nel tipo di radiazione emessa, viene infatti impiegato un emettitore *laser- light amplification by the stimulated emission of radiation*, che opera nella regione ottica tra i 0,3- 15  $\mu\text{m}$ .

Questo laser emette un impulso in atmosfera e il telescopio, che fa da ricevitore, osserva la frazione retrodiffusa di energia. Il lidar non è uno strumento a scansione, non produce immagini ma misure di tipo puntuale ed è utilizzato per studi sui componenti dell'atmosfera terrestre. Il Corista per esempio ha sviluppato tra il 2000 e il 2002 il progetto LAMPI al fine di realizzare un sistema LIDAR compatto, economico ed affidabile, da utilizzare nel monitoraggio dell'inquinamento dell'aria, soprattutto nei centri urbani, come l'inquinamento da aerosol (Particolato PM10).

#### **2.4.2 Sensori attivi nel campo del microonde**

Il telerilevamento nella porzione delle microonde può essere sia di tipo attivo che passivo. La radiazione elettromagnetica del microonde copre la regione dello spettro elettromagnetico tra 0,1 e i 30 cm. Fino a lunghezze d'onda dell'ordine dei 2 cm l'atmosfera assorbe la radiazione, per cui concretamente si opera a partire dai 3 cm. Dai 10 cm in poi l'interazione dell'atmosfera è pressoché nulla perché le dimensioni dei gas e delle particelle sono più piccole della lunghezza d'onda, in questo modo le radiazioni possono penetrare attraverso la copertura nuvolosa, la pioggia, nebbia ed è possibile operare in tutte le condizioni atmosferiche, sia di giorno che di notte.

I sistemi passivi nel microonde sono abbastanza simili concettualmente ai sistemi di rilevamento nell'infrarosso termico. Un sensore nel microonde misura l'energia naturale emessa nella porzione dello spettro del microonde, questa energia è relazionata ai parametri di temperatura e umidità.

Nel campo del microonde si ha a che fare con la struttura del campo elettromagnetico, nello specifico viene utilizzato solo il campo elettrico di cui si misurano i parametri di fase e intensità.

A causa dell'ampia lunghezza d'onda, l'energia di ritorno al sensore risulta piuttosto ridotta rispetto a quella misurata nella porzione del visibile o dell'infrarosso, perciò la porzione di superficie, deve essere abbastanza ampia per poter rilevare energia sufficiente da essere registrata dal sensore, la maggior parte degli strumenti passivi nella porzione del microonde è caratterizzata da una bassa risoluzione spaziale e utilizzati per il monitoraggio dei fenomeni a scala globale e studi sui cambiamenti climatici.

### ***Sistemi Radar***

Il *radar*, acronimo di *Radio Detection and Ranging* è uno strumento attivo che trasmette un segnale microonde e misura la porzione di segnale ri-diffusa dall'oggetto colpito sotto forma di eco e successivamente visualizzata sotto forma di spot luminoso [Gomasasca]. Opera in un intervallo di frequenza del microonde che va dai 40,00 ai 300 MHz. Consiste fondamentalmente in un trasmettitore, un ricevitore, un'antenna e un sistema elettronico per processare e registrare i dati.

Il trasmettitore genera impulsi a intervalli regolari di durata breve e di grande potenza e direzionati in un fascio da un antenna che li trasmette alla velocità della luce. Il fascio illumina obliquamente la superficie. L'antenna riceve una porzione dell'energia ri-diffusa dagli oggetti all'interno del fascio.

L'energia rilevata porta informazioni sulla forma e sulle caratteristiche fisiche degli oggetti mentre il tempo tra il segnale trasmesso e ricevuto determina la distanza (range) dall'oggetto. Il segnale si misura in decibels- dB, in tal modo il radar è in grado di determinare la direzione e la distanza dello strumento rispetto all'oggetto che rimanda l'energia.

L'intensità dell'energia ri-diffusa da un oggetto colpito da impulsi radar dipende da come essa interagisce con l'oggetto o la superficie da rilevare, ed è funzione di molti variabili e parametri. I parametri includono sia le caratteristiche costruttive dei sistemi radar che le caratteristiche della superficie o dell'oggetto rilevati. Per esempio la risoluzione spaziale ottenibile dipende dalle dimensioni dell'antenna in rapporto alla lunghezza d'onda utilizzata, l'aumento della risoluzione spaziale comporta l'aumento di lunghezza

dell'antenna. L'interazione tra energia ed oggetti rilevati dipendono principalmente da tre parametri:

- Rugosità della superficie
- Vista del radar e relazione con la geometria della superficie da rilevare
- Contenuto di umidità e proprietà elettriche dell'oggetto

La potenza infatti del segnale ricevuto è espressa dalla seguente equazione.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 R^4}$$

$P_r$  = potenza media ricevuta per pixel

$P_t$  = potenza trasmessa dall'antenna

$G$  = guadagno dell'antenna

$R$  = distanza tra antenna e oggetto rilevato

$\lambda$  = lunghezza d'onda del fascio radar incidente

$\sigma$  = coefficiente di backscattering (riflettività per unità di superficie della scena)

Il coefficiente di backscattering  $\sigma$ , espresso in dB dipende dalla polarizzazione, dalla frequenza, dall'angolo di illuminazione del fascio radar emesso dall'antenna, dalla rugosità e dal contenuto d'acqua della superficie rilevata.

#### *Rugosità della superficie.*

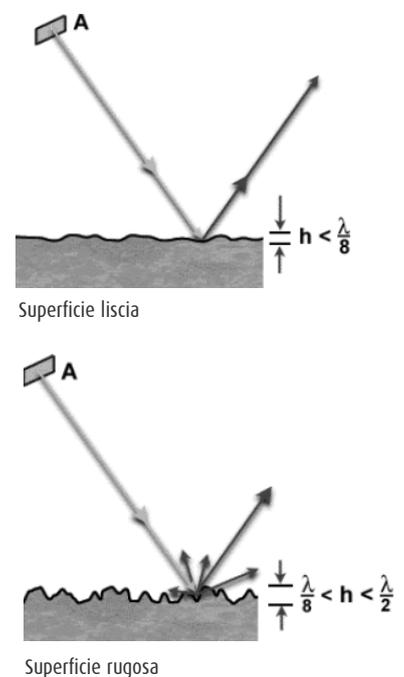
Si considera una superficie liscia se le dimensioni dell'oggetto sono inferiori rispetto alla lunghezza d'onda del radar, una superficie liscia causa una riflessione speculare dell'energia incidente, così solo un piccolo quantitativo di energia ritorna al radar. L'immagine misurata risulta nera per quella determinata lunghezza d'onda.

Una superficie "rugosa" invece ri-diffonde approssimativamente in tutte le direzioni e una parte significativa dell'energia ritorna al sensore, l'immagine appare più luminosa.

L'angolo di incidenza dell'impulso gioca un ruolo altrettanto importante perché all'aumentare dell'angolo di incidenza la superficie appare più liscia, allontanandosi all'interno del fascio, dal punto più vicino al sensore meno l'energia di ritorno al sensore diminuisce proporzionalmente, e l'immagine risulta più scura.

#### *Vista del radar e relazione con la geometria della superficie da rilevare*

Sono altri parametri che influenzano i risultati ottenibili da strumenti attivi nel microonde. Variazioni nella geometria di veduta possono accentuare la topografia e i rilievi in diversi modi e provocare una serie di distorsioni che necessitano di operazioni di correzione sui risultati. L'angolo di vista (*look angle*) descrive l'orientamento del fascio di energia trasmessa dal radar rispetto



alla direzione e all'allineamento degli elementi su una superficie (per esempio catene montuose). Se tale angolo è praticamente perpendicolare all'orientamento degli elementi allora una larga porzione dell'energia incidente sarà ri-diffusa verso il sensore. Se invece l'angolo è più obliquo tale energia e di conseguenza la luminosità diminuiranno. L'effetto *corner reflection* è causato invece dall'energia riflessa su superfici perpendicolari rispetto ad altre, che causano un aumento della superficie ri-diffusa dovuta ad uno o più "rimbalzi" della riflessione ed è un effetto tipico di aree urbane.

#### *Presenza di umidità*

È connessa alle proprietà elettriche di un oggetto o mezzo. L'acqua, con la sua costante dielettrica molto elevata accresce anche quella del suolo, quindi cambiamenti delle proprietà elettriche influenzano l'assorbimento, la trasmissione e la riflessione dell'energia nel microonde, così il contenuto di umidità determina come una superficie o un oggetto riflettono l'energia e come appaiono in un'immagine, generalmente la riflettività aumenta all'aumentare del contenuto di umidità.

#### ***SAR- Synthetic Aperture Radar***

Il radar ad apertura sintetica è uno strumento attivo che riproduce l'effetto di una antenna lunga e permette quindi di migliorare la risoluzione in azimuth, che è ottenuta grazie alla registrazione della fase e dell'ampiezza dei segnali di ritorno lungo la traccia di volo, in modo da avere la Doppler history, o storia di fase di ogni oggetto colpito dal fascio. I segnali di ritorno dalla superfici registrata vengono memorizzati e confrontati nel tempo, mentre il sensore si sposta lungo la linea di volo.

#### ***Scatterometro***

Si tratta di un sensore utilizzato per avere precise misure del quantitativo di energia trasmessa dall'oggetto (proprietà di diffusione), che dipende dalle proprietà fisiche dell'oggetto (rugosità) e dall'angolo con il quale viene colpito l'oggetto. È un radar in grado di misurare le capacità che hanno gli oggetti di ri-diffondere l'energia elettromagnetica incidente. Si rende necessario anche nelle campagne di rilevamento con il SAR, come strumento di calibrazione e validazione dei dati acquisiti.

Può essere progettato per operare con opportuni angoli di incidenza, frequenze e polarizzazioni e può essere montato su postazioni fisse o mobili.

Nel caso di postazioni mobili, si utilizzano scatterometri a lungo raggio, capaci di coprire estese aree e progettati per essere installati a bordo di aeroplani e satelliti, mentre sono impiegati scatterometri a corto raggio per misure più

localizzate, e generalmente per essere collocati a bordo di elicotteri od anche di navi.

Generalmente la progettazione di uno scatterometro é legata alle applicazioni per cui si intende utilizzarlo (studi morfologici del terreno, misurazione dell'umidità del suolo, calibrazione di sistemi SAR, studi della vegetazione e del mare) ed alle dimensioni delle aree da monitorare (superfici a grande estensione o localizzate).

Lo scatterometro ottiene informazioni sulla velocità e sulla direzione del vento sulla superficie del mare. Opera individuando i cambiamenti di riflessione della superficie del mare dovuti alla perturbazione operata da piccole increspature determinate dal vento sulla superficie. Le informazioni relative al campo di vento fornite dallo scatterometro consentono di rilevare le nuove posizioni di regioni di bassa pressione, in alcuni casi anche a molte centinaia di chilometri, portando a miglioramenti notevoli nell'accuratezza delle previsioni a breve e medio termine.

### **Radar altimetro**

Strumento che trasmette impulsi corti al microonde e misura il tempo di andata e ritorno dall'oggetto per determinare la distanza dal sensore. E' generalmente usato su aereo per determinare l'altitudine e su piattaforma aerea o su satellite per misure topografiche e della superficie dei mari consentendo di disporre di dati globali e ripetitivi delle zone osservate.

Banda	Lunghezza d'onda (cm)	Frequenza (GHz)
Banda P	30-100	0,3- 1
Banda L	15-30	1- 2
Banda S	7,5- 15	2-4
Banda C	3,75- 7,5	4-8
Banda X	2,4- 3,75	8-12,5
Banda Ku	1,67- 2,4	12,5- 18
Banda K	1,1- 1,67	18- 26,5
Banda Ka	0,75-1,1	26,5- 40

## **2.4.3 Risoluzioni dei sensori attivi**

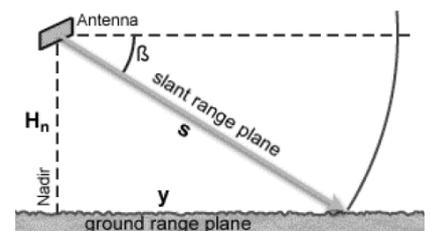
### **Risoluzione spettrale**

La porzione dello spettro nel microonde essendo una regione piuttosto ampia è spesso specificata riferendosi alla frequenza, suddivisa in bande caratterizzate da una lettera derivata da una codifica utilizzata durante la II Guerra Mondiale.

### **Risoluzione spaziale nei sistemi radar**

Le immagini che si ottengono da sensori radar necessitano di una interpretazione basata sulla conoscenza dei meccanismi di interazione microonde mezzi naturali, diversamente dalle immagini prodotti dai sensori elettroottici che nella maggior parte dei casi consentono un'interpretazione immediata [ESA].

Analogamente ai sistemi ottici la piattaforma su cui montano i sensori radar avanza nella direzione di volo, ma gli impulsi microonde sono trasmessi obliquamente rispetto al Nadir, pertanto lo *swath* è "slittato" parallelamente



rispetto al nadir. Il *range* si riferisce alla dimensione trasversale, perpendicolare rispetto alla direzione di volo, mentre l'*azimuth* si riferisce alla dimensione parallela rispetto alla direzione di volo.

L'antenna radar trasmette e riceve le risposte dagli oggetti all'interno del fascio misurandole sulla linea radiale, definita distanza *slant range*. Con il termine distanza *ground range* si definisce invece la distanza reale lungo la superficie, corrispondente ad ogni punto misurato invece sulla *slant range*.

Nel caso dei sistemi attivi la **risoluzione trasversale (in ground range)** dipende dall'ampiezza dell'impulso nella direzione *slant range* e dalla profondità dell'illuminazione lungo la direzione dell'*azimuth*.

### **La risoluzione longitudinale (azimuth)**

È determinata dalla profondità angolare dell'impulso e dalla distanza *slant range*. Tale misura è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'antenna, ovvero una antenna più lunga (una apertura) produce un impulso più vicino e quindi una risoluzione maggiore. Una buona risoluzione si può anche ottenere riducendo l'ampiezza dell'impulso o aumentando le dimensioni dell'antenna. Esistono comunque problemi costruttivi che limitano la dimensione di tali antenne a 1 o 2 metri per quelle montate su aereo e 10/15 metri per piattaforma satellitare. Per rimediare a questo problema e incrementare la risoluzione azimutale sono stati progettati particolari sistemi di movimento della piattaforma e di registrazione e processamento dei dati che simulano una antenna più lunga, come il radar ad apertura sintetica- SAR.

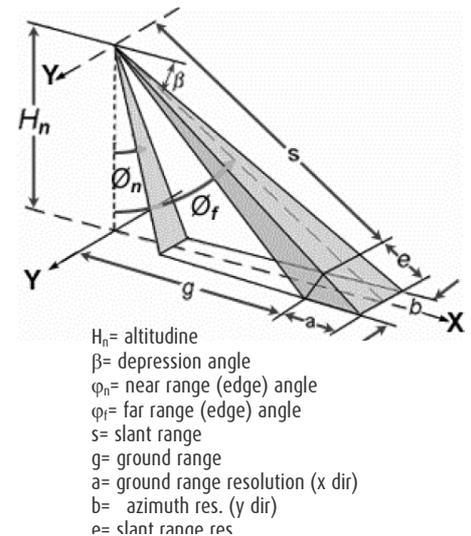
### **Risoluzione radiometrica**

Mentre nei sensori ottici si hanno solitamente risoluzioni radiometriche pari a 8 bit (256 livelli), i sistemi radar sono in grado di differenziare oltre 100.000 livelli. Poiché l'occhio umano non è in grado di distinguere più di 40 livelli distinti di intensità, spesso le immagini vengono ricampionate a 16 o a 8 bit.

### **Polarizzazione**

Si riferisce all'orientamento del campo elettrico. Il segnale radar può essere polarizzato sia in uscita dal sensore, sia durante la ricezione. La polarizzazione si dice orizzontale (H) se la vibrazione dell'onda insiste su un piano perpendicolare al piano di incidenza e verticale (V) se invece sul piano di incidenza stesso. Le combinazioni possibili possono essere:

- HH orizzontale trasmessa, orizzontale ricevuta
- VV verticale trasmessa, verticale ricevuta
- HV orizzontale trasmessa, verticale ricevuta



- VH verticale trasmessa, orizzontale ricevuta

La diversa combinazione di polarizzazione consente variazioni nella risposta radar, immagini radar raccolte usando differenti polarizzazioni e combinazioni di lunghezze d'onda possono fornire differenti e complementari informazioni relativamente agli oggetti rilevati.

## 2.4.4 Distorsioni

### Distorsione geometrica

Nell'interpretazione delle immagini ottenute con sistemi radar è importante comprendere gli effetti che tale sistema di ripresa introduce e che lo differenziano in modo sostanziale dai sistemi ottici.

Il dato ottenibile da sistemi radar dipende dall'intensità e dal tempo del segnale di ritorno ri-diffuso dalla superficie. Viene quindi misurata la distanza tra l'oggetto e l'antenna, ovvero la distanza in *slant range*. L'angolo di illuminazione diminuisce da posizioni prossime al sensore (*near range*) a posizioni più lontane (*far range*), ciò determina che punti alla stessa distanza sulla superficie orizzontale risultino in un'immagine essere più vicini in *near range* che in *far range*. Due oggetti al suolo misurati sulla *slant* perdono la loro scala di rappresentazione.

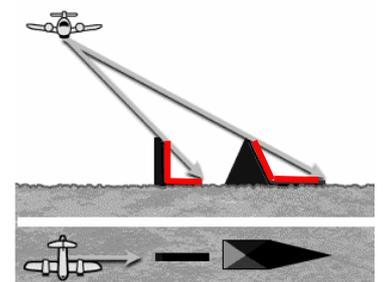
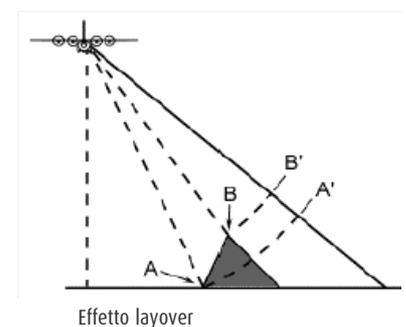
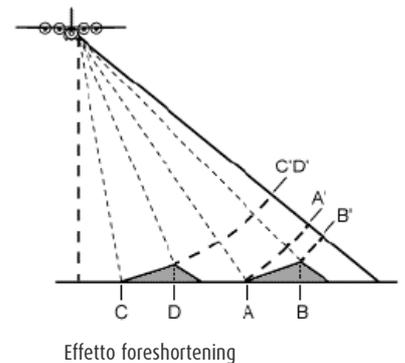
Con l'utilizzo della trigonometria è possibile calcolare la distanza reale alla superficie rispetto allo *slant* e all'altitudine della piattaforma. L'immagine in *round range* è derivata dalla correzione geometrica di quella in *slant range*.

Sono da considerare inoltre tre diverse effetti di distorsione dovute a rilievi (*relief displacement*): di scorcio, layover e l'effetto ombreggiatura.

Lo scorcio o *foreshortening* dipende dall'angolo di incidenza del fascio radar rispetto alla pendenza dell'oggetto da misurare.

Quando l'impulso radar arriva alla base di un rilievo prima che sulla sommità può avvenire l'effetto scorcio, per cui la pendenza reale, misurata sulla *slant* appare compressa e l'ampiezza della distanza dalla base alla sommità non corretta. Il *layover* avviene quando l'impulso arriva prima alla sommità che alla base. il segnale di ritorno della sommità sarà ricevuto prima rispetto al segnale della base, come risultato si avrà una non corretta posizione della sommità rispetto alla base il risultato è definito radar shadow, e di fatto si manifesta quando il fascio non è in grado di illuminare l'intera superficie.

L'effetto di ombreggiatura o *shadowing* avviene in direzione ortogonale alla traccia, si presenta quando alcune superfici (facciate di edifici, montagne, ecc.) non contribuiscono a formare l'eco radar.



Effetto shadowing

Tali effetti sono da tenere in massima considerazione nel caso si debba costruire un modello digitale del terreno.

#### **2.4.5 Correzione e pre-elaborazione dei dati Radar speckle**

Tutte le immagini radar appaiono con un effetto chiamato *speckle*, o sale e pepe, causato dalle interferenze casuali dei ritorni di energia che avvengono all'interno di ogni singola cella. Si tratta sostanzialmente di una forma di rumore che degrada la qualità di una immagine e rende più difficile la sua interpretazione. Tale effetto può essere corretto in due modalità:

- processamento multi-look (in fase di acquisizione dati)
- filtro spaziale (in post processing)

Il processamento multi-look consiste nello scomporre il fascio radar in sotto-fasci (da 1 a 5) ognuno "vede" la scena in modo diverso, ogni fascio è soggetto a macchia, ma sommando e facendo la media è possibile ottenere un'immagine con effetto ridotto.

Il filtro spaziale consiste nel muovere una finestra ridotta di pochi pixel sopra ogni pixel dell'immagine e applicare una funzione matematica usando il valore del pixel sotto la finestra (calcolo della media) e riposizionando il pixel centrale con il nuovo valore, la finestra viene posizionata nella dimensione sia delle righe che delle colonne, un pixel alla volta fino a coprire tutta l'immagine. Calcolando la media di una piccola finestra attorno ad ogni pixel si diminuisce l'effetto a macchia.

#### **Calibrazione**

Processo che garantisce che il sistema radar e il segnale misurato siano più consistenti e accurati possibili i tipi di calibrazione possibile sono di tipo relativo o assoluto.

#### **2.4.6 Principali tecniche d'uso dei sensori attivi**

Le principali applicazioni nel microonde passivo sono relative alla meteorologia, idrologia e oceanografia, è possibile infatti misurare il profilo dell'atmosfera, il suo contenuto di acqua e ozono, misurare il contenuto di umidità nei suoli, monitorare le superfici dei mari ghiacciate, le correnti, misurare il grado di inquinamento come i versamenti di olio a mare.

Sistemi laser e radar invece sono utilizzati per applicazioni di analisi e monitoraggio del rischio idrogeologico, come frane, smottamenti. Le modalità di acquisizione e le principali tecniche utilizzate sono:

### ***Interferometria***

Metodologia relativa alla misura della proprietà delle curve elettromagnetiche chiamata fase. L'interferometria usa due antenne separate da una piccola distanza, che registrano il ritorno di energia di ogni singolo pixel. Le antenne possono essere montate sulla stessa piattaforma oppure è possibile acquisire lo stesso dato da due passaggi distinti. Misurando la fase esatta tra due ritorni e conoscendo la posizione esatta delle antenne rispetto alla superficie terrestre è possibile calcolare la posizione e l'elevazione di ogni singola cella con una accuratezza dell'ordine delle frazioni di lunghezze d'onda utilizzate. Integrando i dati ottenuti dall'interferogramma e la quota alla quale si trovano le due antenne è possibile ottenere il Modello Digitale della Superficie, con precisioni di qualche metro, come è avvenuto nel corso del 1997 quando i satelliti ERS 1 ed ERS 2 vennero posti nella stessa orbita in modo da operare sulla stessa zona con un ritardo di un giorno ed è stato possibile ottenere i dati necessari per costruire un DSM di diverse zone della terra.

### ***Polarimetria***

Tecnica che utilizza sistemi radar in grado di trasmettere e di ricevere sia polarizzazione orizzontale che verticale, così è possibile acquisire e processare le 4 combinazioni di polarizzazione. Il termine "polarizzazione" si riferisce all'orientamento del vettore campo elettrico di un'onda elettromagnetica. Si considera solo il campo elettrico perché quello magnetico è vincolato di conseguenza.

Nel caso definito monostatico l'antenna trasmittente e ricevente coincidono, lo strumento misura la radiazione ri-diffusa nella stessa direzione di illuminazione. Un radar polarimetrico o radar a polarizzazione in quadratura trasmette invece con due polarizzazioni ortogonali, per esempio la lineare orizzontale (H) e la lineare verticale (V) e riceve l'onda ri-diffusa sulle stesse due polarizzazioni. Questo porta ad avere quattro canali acquisiti, cioè HH, HV, VV e VH, in cui vengono misurate sia l'ampiezza sia la fase. I canali HH e VV sono detti di co-polarizzazione, i canali HV e VH sono detti di polarizzazione incrociata o cross-polarizzazione.

I canali cross-polarizzati danno ritorno debole. Il canale HV è molto utile per la classificazione della vegetazione e per l'individuazione delle fratture visibili e le disomogeneità nel ghiaccio.

La modalità VV dà una risposta molto intensa sull'acqua. Quindi si ottiene un rapporto Segnale/Rumore molto alto, perciò è molto utilizzato per studi sulle superfici marine.

I sistemi SAR solitamente usano una sola polarizzazione per motivi di costo, gli strumenti costruiti per scopi di ricerca tendono ad avere invece polarizzazioni multiple, ("quad pol") che aiutano a distinguere la struttura fisica delle superfici illuminate.

## 2.5 Caratteristiche e formato dei dati

I sensori a bordo dei satelliti registrano la radiazione in segnale analogico, successivamente trasformato in digitale. La registrazione avviene dividendo la scena rappresentata in elementi quadrati o rettangolari, tutti della stessa dimensione e distribuiti su righe e colonne. Il modello matematico che descrive un'immagine digitale è una matrice di R righe e C colonne. L'elemento minimo che costituisce l'immagine, cioè l'unità più piccola che è possibile individuare è il "pixel".

Ad ogni pixel è associato un valore numerico intero positivo chiamato Digital Number- DN. Il DN esprime il livello di intensità luminosa associabile ad una porzione del territorio per mezzo di un numero reale appartenente ad un livello predefinito: il valore più piccolo corrisponde ad assenza di luce (nero), il valore massimo, alla massima intensità luminosa (bianco).

Viene adottato il sistema binario utilizzando solo valori interi, disponendo di k bit per ogni pixel i valori ammissibili sono  $2^k$ , e l'intervallo di definizione compreso tra 0 e  $2^k - 1$  [Dermanis, Biagi].

Il rapporto segnale rumore S/N, ovvero la percentuale di informazione registrabile rispetto al rumore di fondo (Signal to Noise) è proporzionale alla riflettanza ed emissività della superficie rilevata, agli effetti dell'atmosfera (scattering ed assorbimento), alla topografia (inclinazione della superficie rispetto all'azimuth e all'elevazione solare), dalla stessa elevazione solare, dall'angolo di vista del sensore.

### 2.5.1 Memorizzazione e formato dei dati

Un file per la memorizzazione di un'immagine digitale contiene tutti i valori del pixel che compongono l'immagine. Per memorizzare la matrice è necessario memorizzare uno ad uno i suoi elementi secondo un ordine prestabilito. L'ordine secondo il quale si effettua la memorizzazione degli elementi non è indifferente poiché una scena acquisita da un sensore multispettrale pesa qualche centinaio di Megabyte. I formati di memorizzazione sono:

#### *BSQ- Band- Sequential*

Le informazioni sono scritte in fila le bande sono memorizzate progressivamente, per lunghezza d'onda crescente (ordine naturale), mentre

**Byte:** insieme significativo di 8 bit consecutivi; è la più piccola unità indirizzabile in memoria e corrisponde alla codificazione di un carattere alfanumerico.

**Bit:** carattere che rappresenta una delle 2 cifre del sistema binario: 0 o 1. È la più piccola unità di informazione ed indica anche la più piccola unità memorizzabile

**Pixel.** Termine derivato dalla fusione dei termini inglesi 'picture element'. si definisce pixel ognuna delle superfici elementari che costituiscono un'immagine digitale. Ogni pixel è caratterizzato da tre valori: due coordinate che individuano la posizione del pixel all'interno dell'immagine (numero di riga e numero di colonna quando l'immagine è considerata come matrice) e il Digital Number- DN che rappresenta la radianza media nel particolare intervallo spettrale in cui il sensore vede la cella di risoluzione a terra corrispondente a quel pixel.

ogni banda è memorizzata linea per linea, da sinistra a destra. Si memorizzano prima tutti i DN dell'intera immagine relativi ad una sola banda, quindi si passa alla banda successiva. È un formato che privilegia l'informazione spaziale (adiacenza tra pixel) rispetto a quella spettrale.

#### *BIL- Band- Interleaved - by- Line:*

In questo formato la priorità è data alla righe che sono memorizzate banda per banda. È un compromesso tra la velocità di accesso alle informazioni spaziali ed a quelle spettrali.

*BIP- Band- Interleaved - by- Pixel:* per ogni pixel sono memorizzati sequenzialmente i valori corrispondenti a tutte le bande. Si privilegia l'informazione multibanda rispetto all'adiacenza spaziale tra i pixel.

Dal punto di vista dei tempi di accesso il formato BSQ è preferibile se si è interessati a lavorare su singole bande spettrali, mentre il BIP è più conveniente se si deve lavorare con più bande spettrali, in un'area limitata. Il formato BIL è una via di mezzo.

#### **Intestazione**

Le informazioni necessarie a ricostruire l'immagine dal file, per esempio il numero di bit utilizzati per ciascun valore, l'ordine di memorizzazione dei valori e il numero di colonne presenti oppure altre informazioni utili per interpretare il contenuto dell'immagine sono contenute in un file di intestazione. Nel formato CEOS, uno standard proposto dalla NOAA, il file di intestazione è chiamato "leader file", e contiene oltre all'organizzazione dei dati nel file pertinente anche i parametri di acquisizione più significativi.

L'*intestazione* può anche consistere di una serie di *byte* aggiunti nello stesso file prima dell'inizio del dato vero e proprio.

#### **Provini o "quicklook"**

Spesso le immagini sono accompagnate dai *provini*, ovvero versioni degradate (spesso in formato JPEG) ed a risoluzione significativamente ridotta delle stesse immagini. I provini hanno due funzioni fondamentali:

sono di solito distribuiti gratuitamente e prima dell'acquisto delle immagini per verificare la rispondenza ai requisiti di posizione e di qualità (es. copertura nuvolosa, per le immagini ottiche) delle immagini da acquistare;  
nelle ricerche in archivio permettono di "sfogliare" rapidamente le immagini contenute nell'archivio stesso senza necessità di leggere integralmente tutte le immagini di volta in volta visualizzate (importante specie per archivi remoti).

### **Band SeQuential**

Le informazioni (i pixel) sono scritte in fila  
Formato BSQ:

```
Header file banda 1
1° pixel, 1° banda
.....
.....
n° pixel, 1° banda
.....
.....
Header file banda n
1° pixel, n° banda
.....
.....
n° pixel, n° banda
```

### **Band Interlived by Lines**

Band Interlived by Line Format (BIL)									
Line 1	Band 1	Line 1	Band 2	Line 1	Band 3	Line 1	Band 4		
		Line 2	Band 1	Line 2	Band 2	Line 2	Band 3	Line 2	Band 4
			Line 3	Band 1	Line 3	Band 2	Line 3	Band 3	Line 3
				Line 4	Band 1	Line 4	Band 2	Line 4	Band 3

### **Band Interlived by Pixel**

Band Interlived by Pixel Format (BIP)									
Line 1	Pixel 1	Band 1		Line 1	Pixel 2	Band 1		Line 1	Pixel 3
		Band 2			Band 2				Band 2
		Band 3			Band 3				Band 3
		Band 4			Band 4				Band 4

### **Archiviazione: algoritmi di compressione**

L'acquisizione di dati con risoluzioni (spettrali, spaziali e radiometriche) sempre più elevate non è accompagnato da un analogo incremento della banda di trasmissione dei dati dalla piattaforma satellitare alle stazioni a terra e tra la rete digitale utilizzata per la distribuzione. Con i nuovi satelliti in orbita bassa i dati di telerilevamento creati ogni giorno superano la soglia dei 5 TeraByte.

Tali limitazioni impongono l'uso di metodi di compressione dei dati, che si differenziano in tecniche *lossless* senza perdita di informazione e tecniche di compressione *lossy* con perdita, a seconda che le immagini codificate siano esattamente ricostruite dal decodificatore o subiscano una distorsione.

Gli algoritmi di compressione *lossless*, garantiscono il recupero integrale dell'informazione ma non consentono di ottenere rapporti di compressione superiori a 2/3 per il rumore intrinseco dei dati rilevati dal sensore.

Una compressione *lossy* consente un significativo aumento del rapporto di compressione (ovvero riduzione del *bit-rate*), dovuto all'uso di tecniche trasformate per la decorrelazione, come la DCT (Discrete Cosine Transform) e la DWT (Discrete Wavelet Transform) che però producendo coefficienti reali impongono un'operazione di quantizzazione. Gli errori di decodifica derivano proprio dagli errori di quantizzazione e possono essere globalmente controllati, ovvero mantenuti mediamente sotto una certa soglia, ma non è possibile controllare localmente errori di distorsione o di picco. E' però necessario garantire che gli errori di ricostruzione non compromettono la qualità del dato, per cui l'uso di tecniche *lossy* convenzionali che limitano l'errore quadratico medio, ma non l'errore di picco, è da escludersi. Recentemente sono state proposte tecniche di compressione cosiddette *near-lossless* che riescono a controllare l'errore di picco e a garantire una qualità di ricostruzione uniforme in tutta l'immagine. D'altra parte occorre assicurare che almeno la compressione on-board, cioè sul sistema di registrazione dei dati su satellite, sia senza errori [Papini].

Il formato di compressione ECW (Enhanced Compressed Wavelet), basato su tecnologia Wavelet, è uno dei più utilizzati per applicazioni web, permette infatti di ridurre la dimensione di immagini raster (fino a 100 volte) e di visualizzare immediatamente le immagini compresse, senza tempi di attesa dovuti alla decompressione del dato, come invece accade per altri formati.

### **2.5.2 Dati e prodotti**

Le immagini a diversi stadi di elaborazione, ma anche prodotti preconfezionati o realizzati ad hoc, possono oramai essere acquistati quasi tutti utilizzando i siti

internet degli Enti Istituzionali, o delle società private proprietari o gestori dei dati, tramite FTP o l'invio di dvd.

La tipologia di immagini telerilevate oggi sul mercato, diversificate per tipologia di utente e livello di elaborazione sono riassumibili in tre formati:

- *Raw data*. Sono i dati grezzi provenienti direttamente dal sensore, utilizzati da esperti del settore.
- *Corrected data*. Sono i *raw data* dopo la fase di correzione radiometrica. I dati corretti vengono distribuiti agli utenti per le successive fasi di ortorettifica, ricampionamento, di analisi, interpretazione e classificazione.
- *Ortho data*. Sono le immagini corrette radiometricamente e geometricamente secondo parametri standard utilizzati dai gestori o richiesti dagli acquirenti, relativi a Datum, sistemi di riferimento cartografico e algoritmi di ricampionamento.

Il mercato in realtà offre una più ampia panoramica di immagini e prodotti che vanno appunto dai dati grezzi a dati originali senza correzione radiometrica a prodotti già elaborati. L'operazione più utilizzata è per esempio il Pansharpening, ovvero la fusione della banda pancromatica con le bande del visibile Rosso, Blu e Verde, o anche immagini classificate, anche vettorializzate, Modelli Digitali del Terreno, e così via.

I formati raster più utilizzati per prodotti già elaborati sono il Tif+ Tfw e il GeoTiff, .Img.

### ***Alcuni esempi***

#### ***Dati LANDSAT***

I dati del satellite Landsat 5TM, sono disponibili in tre formati:

- *Level 0 Reformatted (0R, RAW)*. I pixel non hanno correzioni geometriche né radiometriche cioè i pixel non sono stati allineati per la linea di scansione. Tutti i parametri radiometrici, rumore di impulso, rumore coerente, la memoria ecc. sono ancora presenti su qualunque livello 0R. Questo prodotto è dedicato agli utenti esperti in grado di gestire le diverse elaborazioni.
- *Level 1 Radiometrically Corrected (1R, RADCOR)*. Questo prodotto è corretto a livello radiometrico, le correzioni non sono reversibili, non ha però correzioni geometriche e anche in questo caso i pixel non sono allineati per linee di scansione.
- *Level 1 System Corrected (1G)*. È il prodotto standard, corretto a livello radiometrico e geometrico, su parametri richiesti dall'utenza.

### *Dati IKONOS*

Anche i principali prodotti IKONOS sono distribuiti in tre diverse modalità:

- *GEO*. I prodotti *GEO* sono geometricamente corretti ed ortorettificati. Possono a loro volta essere distribuiti in 3 diverse opzioni:  
*PAN*: Dato Pancromatico (Bianco e Nero) con risoluzione geometrica al suolo di 1 metro;  
*MSI*: Dato Multispettrale (4 bande) con risoluzione geometrica al suolo di 4 metri;  
*PSM*: Dato Pan Sharpened (3 bande fuse con il pancromatico) con risoluzione geometrica al suolo di 1 metro.
- *STEREO* I prodotti *STEREO* sono ottenuti da stereo-coppie acquisite nello stesso passaggio orbitale, minimizzando così le variazioni di luminosità; le immagini sono proiettate e ricampionate a 1 metro. Sono distribuite in due differenti livelli di accuratezza:  
*Standard STEREO* : 12 metri di accuratezza orizzontale e 13 metri di accuratezza verticale;  
*Precisione STEREO*: 1 metro di accuratezza orizzontale e 2 metri di accuratezza verticale.
- *ORTORETTIFICATI*. I prodotti *ORTORETTIFICATI* vengono distribuiti secondo diversi livelli di accuratezza e nelle tipologie (*PAN*, *MSI*, *PSM*), richiedono la fornitura, da parte del cliente, dei punti di controllo al suolo (*GCP*) che possono essere anche forniti dalla Space Imaging Eurasia pagando un prezzo addizionale.

### *Dati SPOT*

Le immagini SPOT hanno differenti livelli di pre- elaborazione divisi in due serie di prodotti:

- *Scene Spot*:  
 Livello 1A. Immagini corretto radiometricamente  
 Livello 1B: Immagini corrette radiometricamente come per il livello 1A e correzione geometrica degli errori sistematici.  
 livello 2A: Immagini corrette radiometricamente come per il livello 1A e correzione geometrica attraverso l'utilizzo di una proiezione cartografica standard, come UTM- WGS84, ma senza punti di controllo sul terreno (*GCP*).
- *Spot view*  
 Livello 2B (precision): prodotto radiometricamente e geometricamente corretto, previa fornitura di punti di controllo sul terreno (*GCP*).

Livello 3 (ortho): prodotto ortorettificato basato sui dati di riferimento 3D per eliminare le distorsioni dovute al rilievo, in funzione di punti di controllo sul terreno (GCP) e di un modello digitale del terreno (DEM).

### 2.5.3 Il Mercato

Le Stazioni riceventi distribuiscono i dati ad enti o a società che a loro volta e a diversi gradi di elaborazione, li distribuiscono sul mercato.

I dati provenienti da satelliti sviluppati da istituzioni pubbliche (NASA, USGS, ESA, ecc.) sono disponibili a pagamento, presso i portali delle istituzioni stesse o acquistabili da distributori commerciali che spesso offrono prodotti aggiuntivi o elaborazioni ad hoc. Presso alcuni portali istituzionali o nell'ambito di alcuni progetti è possibile reperire e scaricare gratuitamente immagini e prodotti derivati da satellite. E' il caso del recente progetto OASIS, finanziato dalla Commissione Europea e coordinato dal CNES, l'agenzia spaziale francese, il cui obiettivo è permettere alla comunità scientifica l'accesso gratuito all'archivio delle immagini del satellite SPOT

(<http://medias.obs-mip.fr/oasis/LogoutAction.do>).

#### *Distributori e siti per l'acquisto (cataloghi in linea):*

Un portale dove reperire dati e prodotti dei satelliti principali è il sito dell'U.S. Geological Survey USGS EarthExplorer.

<http://edcscns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

#### **Dati su U.S. Geological Survey USGS Earth Explorer**

satellite	sensori
NOAA 15-18	AVHRR Orbital Segments (Search only) Advanced Very High Resolution Radiometer Composites
EO-1	Advanced Land Imager
	Hyperion
LANDSAT 1-5	MSS (July 1972 - October 1992)
LANDSAT 4-5	TM (July 1982 - present)
LANDSAT 7	ETM+ International Ground Stations - Search
	Orthorectified ETM+ prodotti
SPOT	SPOT (Search Only)

L'Earth Observing System Data Gateway della Nasa, distribuisce dati di molti sensori e applicazioni, la ricerca si fa per sensore, applicazione, area coperta, ecc. <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>

## Dati sull'Earth Observing System Data Gateway della Nasa

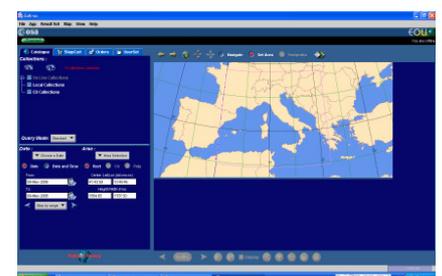
satellite	sensore
AQUA	AIRS/ Atmospheric Infrared Sounder
	AMSU-A/ Advanced Microwave Sounding
	HSB Humidity Sounder for Brazil
	MODIS/ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
	AMSR-E Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS
NOAA 15-18	AVHRR- 3
	AMSU-A/ Advanced Microwave Sounding
TERRA	MISR- Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
	CERES Clouds and Earth's Radiant Energy System
	MODIS/ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
	MOPITT- Measurement Of Pollution In The Troposphere
	ASTER- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ICESat	GLAS/ Geoscience Laser Altimeter System
AURA Atmospheric Chemistry	MLS/ Microwave Limb Sounder
	OMI Ozone Monitoring Instrument
	TES/ Tropospheric Emission Spectrometer
DMSP-16 Defense Meteorological Satellite Program	SSM/IS- Special Sensor Microwawe Imager/Sounder
ERS1 e 2	SAR prodotti
ADEOS-II	TOMS Total Ozone Mapping Spectrometer
	AMSR Advanced Microwave Scanning Radiometer
JERS -1	SAR prodotti
RADARSAT 1	SAR prodotti
ORBVIEW- 2	SEAWIFS
LANDSAT 1-5	TM prodotti



Mentre L' EOLI Web client è il catalogo on-line multi-missione dell'Agenzia Spaziale Europea che accede ai diversi cataloghi di prodotti telerilevati dell'ESA via web. <http://eoli.esa.int/servlets/template/welcome/entryPage.vm>

## Dati su ESA EOLI Web client

satellite	Sensori
ENVISAT	ASAR HH VV HV VH
	MERIS
	AATSR
	MIPAS
ERS	SAR
	ATSR
	ALTIMETER
	GOME
	WAVE MODE
	SCATTEROMETER
PROBA Project for On-Board Autonomy	CHRIS Compact High Resolution Imaging Spectrometer
	HRC High Resolution Camera
IRS	MOS odular Optoelectronic Scanning Spectrometer
JERS	SAR:
	OPS- Optical sensor (VNIR)
LANDSAT 4-5	TM Thematic Mapper (RAW, SCAS)
LANDSAT 1-5	MSS Multispectral Scanner Landsat (RAW, SCAS)
LANDSAT- 1	RBV- Return Beam Vidicon Camera)
NIMBUS	CZCS Coastal Zone Color Scanner
NOAA	AVHRR
SCISAT	ACE-FTS Atmospheric Chemistry Experiment - Fourier Transform Spectrometer
	MAESTRO Measurements of Aerosol Extinction in the Stratosphere and Troposphere Retrieved by Occultation
Orbview-2	SEAWIFS Sea viewing Wide Field Sensor
TERRA	MODIS
AQUA	MODIS



Integrazione, trattamento e distribuzione dei dati territorio- ambiente acquisiti da sensori a bordo di piattaforme satellitari, aeree, veicolari e marine.

Documento: 1 Sensori a bordo di piattaforme satellitari Autore: Sdc Data: 30 agosto 2006

Altri importanti portali commerciali per l'acquisto dati sono:

Spaceimaging <http://www.geoeye.com> (da query db sensori)

Satellite	sensori
IKONOS	OSA: Optical Sensor Assembly
IRS-1C	LISS 3- Linear Imagine Self Scanning System
	PAN
	WiFS- Wide Field Sensor
IRS-1D (5m)	PAN

SpotImage <http://sirius.spotimage.fr/anglais/Welcome.htm> (da query db sensori)

Satellite	sensori
SPOT 4 e 5	HRVIR: High Resolution Visible infrared,
	HRS: High-Resolution Stereoscopic
	HRG: High Resolution Geometric

Eurimage <http://www.eurimage.com/> (da query db sensori)

satellite	sensori
QUICKBIRD	QUICKBIRD
IKONOS	OSA: Optical Sensor Assembly
LANDSAT 5	MSS: Multispectral Scanner
	TM: Thematic Mapper
RADARSAT	SAR- Synthetic Aperture Radar
ERS-1 e -2	ATSR-2: Along Track Scanning Radiometer 2
	AMI-SAR Active Microwave Instruments - Synthetic Aperture Radar
	AMI-SCAT: Active Microwave Instruments - Wind Scatterometer
JERS-1	OPS- Optical Sensor
	SAR- Synthetic Aperture Radar
NOAA	AVHRR
TERRA	ASTER- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

Geoserve <http://www.geoserve.com> (da query db sensori)

satellite	sensori
QUICKBIRD	QUICKBIRD
IKONOS	OSA (Optical Sensor Assembly)
LANDSAT 5	MSS: Multispectral Scanner
	TM: Thematic Mapper
Orbview-3	Orbview-3
FORMOSAT	
SPOT 4 e 5	HRVIR: High Resolution Visible infrared,
	HRS: High-Resolution Stereoscopic
	HRG: High Resolution Geometric
IRS 5	LISS 3- Linear Imagine Self Scanning System
	PAN
	WiFS- Wide Field Sensor
LANDSAT 5	MSS: Multispectral Scanner
	TM: Thematic Mapper
TERRA	ASTER
E01	HYPERION

### Esempio dei siti dove reperire immagini TM LANDSAT (da query db SENSORI)

Nome Piattaforma	Nome sensore	Distributore	sito
Landsat 5	TM: Thematic Mapper	Earth Observing System Data Gateway	<a href="http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/">http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/</a>
Landsat 5	TM: Thematic Mapper	U.S. Geological Survey USGS EarthExplorer	<a href="http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/">http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/</a>
Landsat 5	TM: Thematic Mapper	ESA	<a href="http://www.eurimage.com/">http://www.eurimage.com/</a>
Landsat 5	TM: Thematic Mapper	Planetek Italia	<a href="http://www.planetek.it">http://www.planetek.it</a>

Integrazione, trattamento e distribuzione dei dati territorio- ambiente acquisiti da sensori a bordo di piattaforme satellitari, aeree, veicolari e marine.

Documento: 1 Sensori a bordo di piattaforme satellitari Autore: Sdc Data: 30 agosto 2006

## 2.6 Missioni per lo studio e il monitoraggio territorio/ambiente

Il paragrafo evidenzia alcune delle missioni descritte nella base dati, in particolare in questo contesto si segnalano solo le più significative per applicazioni relative al territorio e all'ambiente e quelle che hanno segnato ed enfatizzato l'uso di dati telerilevati per problematiche a scala locale.

### 2.6.1 Satelliti ad alta risoluzione spaziale

Le immagini e i prodotti derivati da sensori montati a bordo di questi satelliti sono utilizzati principalmente per applicazioni di tipo fotogrammetrico, ovvero per la realizzazione o l'aggiornamento di cartografia a scala locale. Le immagini derivate possono integrare o essere fuse ad altre immagini provenienti da sensori multispettrali, consentendo il miglioramento della risoluzione spaziale dei dati provenienti da quest'ultimi (operazione di pan-sharpened), oppure è possibile sovrapporre due immagini della stessa scena acquisite con differenti angoli di veduta o due passaggi consecutivi e realizzare stereocoppie di immagini che aggiungono l'informazione sulla quota e da cui è possibile creare modelli digitali del terreno (DTM Digital Terrain Model).

#### **IKONOS**

Il satellite Ikonos lanciato nel settembre 1999 da Space Imaging, ed operativo dall'inizio del 2000, è stato il primo satellite commerciale ad alta risoluzione.

#### *Sensori*

Sul satellite è montato un sensore che acquisisce sia in modalità pancromatica che multispettrale (3 bande del visibile e 1 banda nell'infrarosso vicino) nell'intervallo spettrale tra 0.45 e 0.90  $\mu\text{m}$ . La risoluzione geometrica al suolo varia per le due modalità da 1 a 4 m. La risoluzione radiometrica è di 11 bit, per un totale di 2.048 livelli di grigio.

#### *Applicazioni trattate utilizzando dati IKONOS*

Oceanografia e studi sulla fascia costiera	Gestione delle risorse ittiche
Vegetazione naturale	Monitoraggio del grado di deforestazione a scala locale
Vegetazione coltivata	Valutazione dello stato fitosanitario
	Stima della produzione e censimento delle colture agricole
	Monitoraggio delle rotazioni colturali
	Monitoraggio dei PAC (Politiche Agricole Comunitarie) in itinere
	Gestione del turno irriguo nelle risaie
Pianificazione ed Uso del suolo	Classificazione dell'uso del suolo
	Mappatura delle infrastrutture e delle opere antropiche
	Valutazione del grado di espansione del tessuto urbano
	Monitoraggio del grado di abusivismo
	Monitoraggio dei parametri di qualità delle acque interne

	Min	Max	Ris. spaz. (m)	Swath (Km)	Ris. radiom. (Bit)	Ris. emp. (gg)
Pancr.	0.45	0.9	1	11	11	3
Blu	0.45	0.52	4	11	11	3
Verde	0.52	0.6	4	11	11	3
IR vicino	0.76	0.9	4	11	11	3



Monitoraggio e stima catastrofi	Monitoraggio di incendi a scala locale
	Stima dei danni dopo il fuoco
	Monitoraggio di frane
	Stima dei danni da fenomeni di dissesto idro-geomorfologico
	Stima dei danni da fenomeni alluvionali
	Stima dei danni da tsunami e terremoti
Monitoraggio inquinamenti	Monitoraggio delle isole di calore in ambito urbano
Realizzazione cartografia, DTM	Topografia digitale
	Realizzazione di cartografia a scala locale
	Realizzazione di aggiornamenti cartografici
	Creazione di modelli digitali del terreno (DTM/DSM)
Pedologia, geologia, studi del suolo e sottosuolo	Indagini archeologiche

### *Dati*

Space Imaging fornisce direttamente dati e prodotti. E' comunque possibile richiederli anche a distributori locali, in Italia per esempio è possibile ordinare i dati Ikonos da Planetek Italia.

### **QUICKBIRD**

Il satellite QuickBird, lanciato nel 2001 opera su un'orbita polare eliosincrona posta a 450 km di altezza ed è caratterizzato da una swath di 16.5 Km.

### *Sensori*

Il sensore montato a bordo è in grado di acquisire sia in modalità multispettrale (tre bande del visibile e una nell' infrarosso vicino) che pancromatica, con risoluzione di 0,61 cm per angoli di acquisizione standard (tra 0 e 15 gradi).

### *Dati*

I dati QuickBird sono distribuiti in esclusiva per tutta Europa da Eurimage. Le immagini QuickBird, come per la maggior parte dei sensori pancromatici attualmente sul mercato, sono suddivisi in 3 categorie a secondo del livello di elaborazione cui sono sottoposti prima della distribuzione: immagini corrette solo radiometricamente, immagini standard, sottoposte a correzioni geometriche e radiometriche e immagini ortorettificate.

### **EROS - Earth Resources Observation Satellite**

Nel 2000 Imagesat International N.V., società Israeliana ha lanciato in orbita il suo primo satellite commerciale ad alta risoluzione, EROS A1. Il satellite EROS impiega, per una intera rivoluzione intorno alla Terra, circa 94-96 minuti ed esegue approssimativamente 15 rivoluzioni intorno alla Terra ogni 24 ore, è quindi annoverabile anche tra i sensori ad alta risoluzione temporale. Il satellite acquisisce immagini pancromatiche con uno swath di 14 km.

### *Sensori*

Il satellite è dotato di un sensore pancromatico a 1.9 metri di risoluzione con la possibilità di campionare ulteriormente il dato fino ad una risoluzione massima di circa 1 metro (Hypersampled mode).

L'ampiezza dello swath e la grandezza del pixel variano sensibilmente con il variare dell'angolo di acquisizione. La modalità "hypersampled" infatti consente di avere immagini alla risoluzione sub-metrica ma con uno swath di circa 9,5 km. Il satellite EROS è costruito in modo da consentire l'acquisizione di immagini su aree diverse in un unico passaggio ed ottenere così immagini stereo acquisite sulla stessa aerea.

#### *Dati*

Sono acquistabili direttamente da Imagesat, anche in questo caso è possibile ottenere i dati raw, oppure radiometricamente corretti, geometricamente corretti e infine ortorettificati.

### **ORBVIEW -3**

Si tratta di un satellite gestito da Digitalglobe e operativo dal 2003 in orbita circolare di 450 chilometri. La dimensione della scena registrata è di 16,5 km al Nadir.

#### *Sensori*

Il satellite monta un sensore analogo per risoluzione spettrale a quello di Ikonos, ovvero con tre bande nel visibile e una nell'infrarosso vicino e un canale pancromatico. Anche la risoluzione radiometrica è analoga, le immagini infatti sono registrate a 11 bit. La risoluzione a terra in modalità pancromatica è di 0,61 metri.

#### *Dati*

I tre prodotti principali sono il basic, corretto radiometricamente, il geo, proiettato su mappa ma solo con dati di posizione del satellite e l'ortho, ortorettificato. Tutte le tre modalità sono disponibili sia pancromatiche che multispettrali.

### **Confronto risoluzioni e costi tra sensori commerciali ad alta risoluzione temporale**

		Ikonos	Quickbird	Orbview 3	Eros A1
Risoluzione spaziale (m)	PAN	1	0,61	1	1,9
	MS	4	2,44	4	/
Swath (km)		11	16,6	8	14
Risoluzione temporale (gg)		3	3	3	2,5
Risoluzione radiometrica (bit)		11	11	11	11
Risoluzione spettrale (micron)		4 bande (visibile e infrarosso vicino) 1 pancromatico da 0,45 a 0,9	4 bande (visibile e infrarosso vicino) 1 pancromatico da 0,45 a 0,9	4 bande (visibile e infrarosso vicino) 1 pancromatico da 0,45 a 0,9	1 banda 05-0,9
Costo/Km <sup>2</sup> (€)		15	22,5	9	86
Distributore dati		Spaceimaging www.spaceimaging.com	Digitalglobe <a href="http://www.digitalglobe.com">http://www.digitalglobe.com</a>	Orbimage www.orbimage.com	ImageSat International <a href="http://www.imagesatintl.com">http://www.imagesatintl.com</a>

### **2.6.2 Satelliti ad alta risoluzione spettrale**

Sono principalmente sensori iperspettrali, strumenti (spettrometri) in grado di registrare un numero molto rilevante, dell'ordine di qualche centinaia, di bande. Le esperienze svolte finora relativamente a strumenti su piattaforme satellitari sono abbastanza limitate e di tipo sperimentale, poiché la distanza della piattaforma dalla Terra non consente una discretizzazione tra elementi leggibile da un sensore iperspettrale, gli sforzi si sono quindi spostati verso piattaforme a bordo di aerei.

Tuttavia alcuni sensori, pur non essendo associabili ai sensori iperspettrali montano sensori in grado di registrare un numero consistente di bande, possono pertanto essere impiegati in applicazioni come la classificazione d'uso e copertura del suolo che necessitano la lettura e interpretazione di diversi elementi e fenomeni territoriali e ambientali, da suddividere in classi e categorie.

#### **EO-1**

Il satellite è stato lanciato dalla NASA nel 2000 ad un'orbita di 705 km e tempo di rivisitazione di 16 giorni, swath di 7,7 km. Monta a bordo 3 strumenti, di cui uno, l'Hyperion, iperspettrale.

#### **Sensori**

ALI Advanced Land Imager,

Hyperion spettrometro a 220 bande, nell'intervallo da 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ , risoluzione spaziale di 30 metri

(LEISA) Linear Etalon Imaging Spectrometer Array

#### **Dati**

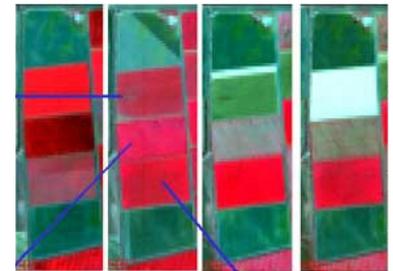
Le immagini acquisite dal satellite EO-1 sono archiviate e distribuite dall'USGS Center for Earth Resources Observation and Science (EROS), e da altri distributori locali, come Geoserve <http://www.geoserve.nl/index.html>.

#### **Applicazioni**

Il sensore iperspettrale è utilizzato soprattutto per il testaggio e la ricerca relativa alla sensoristica iperspettrale su satellite, le applicazioni possono essere numerose, sono legate soprattutto alla classificazione della copertura del suolo, al supporto e monitoraggio dell'agricoltura, ma anche in geologia, in silvicoltura e monitoraggio dell'ambiente.

#### **TERRA- EOS - AM1**

Il satellite Terra della Nasa fa parte del programma EOS- Earth Observing System, un sistema integrato di satelliti in orbita polare per le osservazioni della superficie della terra, della biosfera, dell'atmosfera e degli oceani.



Riconoscimento colture tramite il sensore Hyperion

Il satellite Terra è stato lanciato nel 1999 ed è operativo dal 2000. La quota di orbita è di 705 chilometri e il tempo di rivisitazione temporale di 16 giorni.

### *Sensori*

Monta a bordo 5 sensori: ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer), CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System) MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer , MOPITT (Measurement Of Pollution In The Troposphere).

I sensori più importanti sono l'ASTER e il MODIS.

L'ASTER di pone l'obiettivo di contribuire allo studio dei fenomeni locali e globali relativi alla superficie terrestre e all'atmosfera. Lavora in 14 bande, nel visibile (2), nell'infrarosso vicino (2), nell'infrarosso medio (6) e nell'infrarosso termico (5). La risoluzione spaziale varia da 15 metri, nelle bande del visibile e infrarosso vicino, fino a 90 metri nell'infrarosso termico. La scena acquisita misura invece 60 chilometri.

L'altro sensore molto significativo è lo spettroradiometro MODIS, che è anche montato a bordo del satellite Aqua, che fa sempre parte del programma EOS, Modis lavora invece in 36 bande e la sua risoluzione spaziale varia da 250 (banda 1-2) ai 500 metri (bande 3-7) fino ai 1.000 metri (bande 8-36). Le bande acquisiscono informazioni relativamente a forma e proprietà della superficie, di nuvole e aerosol, colore dell'oceano, fitoplacton e geochimica, vapore atmosferico, temperatura di superfici e nuvole, temperatura atmosferica, proprietà delle nuvole, ozono, altezza al top delle nuvole.

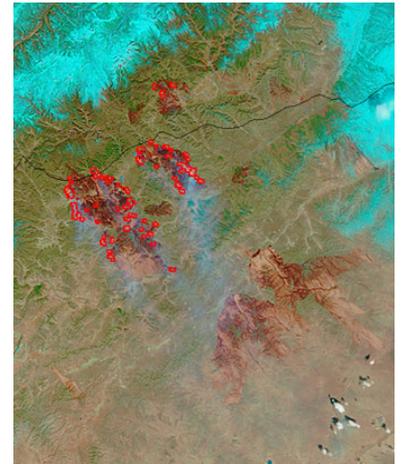
### *Dati*

I dati derivati da TERRA sono distribuiti , a seconda del tipo di dato richiesto e dell'applicazione a cui serve da diversi enti e uffici della NASA. Per esempio il DAAC- NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC) fornisce i dati Modis.

### *Applicazioni*

Il Modis è utilizzato per studi sulla alla vegetazione, agli incendi, alla neve su terra e ai ghiacci su mare. Fornisce dati e indicazioni anche sulla alle proprietà delle nubi e degli aerosol, sulla tipologia della superficie e della clorofilla degli oceani. I dati sono e utilizzati negli studi per la comprensione delle dinamiche globali e dei processi relativi alla terra, agli oceani e agli strati più bassi dell'atmosfera e previsioni riguardo i cambiamenti globali.

Con i dati provenienti dal sensore Aster è possibile la realizzazione di Modelli digitali del terreno, analisi geologiche, il monitoraggio dei ghiacciai, la classificazione della copertura del suolo e l'analisi dello sviluppo urbano, la classificazioni delle nuvole, il monitoraggio dell'umidità del suolo e



Un'immagine a falsi colori di Modis che mostra in rosso le aree interessate da incendi

l'individuazione delle zone umide, l'analisi del bilancio energetico, dello stress e dello sviluppo della vegetazione, dei vulcani e degli incendi.

### **LANDSAT 5-7**

La serie Landsat, satelliti costruiti dalla NASA, ha segnato la storia del telerilevamento, soprattutto nel campo del monitoraggio e degli studi relativi alla superficie terrestre.

Attualmente sono in orbita, quasi-polare eliosincrona i satelliti 5 e 7. Dal 31 maggio 2003 non è più in funzione lo Scan Line Corrector (SLC) del Landsat 7 per cui ad oggi si utilizzano dati e prodotti derivati dal Landsat 5.

#### *Sensori*

I sensori (nel LANDSAT 5) sono il MSS- Multi Spectral Scanner, a 4 bande spettrali e pixel di 60 x 80 cm e il TM- Thematic Mapper , a 7 bande di cui una nell'infrarosso termico.

#### *Dati*

Sono distribuiti direttamente dalle stazioni a terra, tra cui quella italiana di Fucino, da altri distributori ufficiali come Eurimage, ImageNet, USGS Earth Explorer, altrimenti è possibile scegliere on line la scena da acquistare, con il portale Earth Observing System Data Gateway.

#### *Progetti principali*

Corine Land Cover 2000, si tratta dell'aggiornamento del database CORINE Land Cover con una rappresentazione all'anno 2000, ovvero del database che raccoglie la classificazione della copertura del suolo nei Paesi europei.

#### *Applicazioni*

Grazie alle diverse bande che il sensore TM riesce a registrare il Landsat è uno dei satelliti più utilizzati nello studio della vegetazione ma anche dell'espansione urbana, viene utilizzato generalmente per lo studio dell'uso e della copertura del suolo e dei relativi cambiamenti, è possibile infatti reperire numerose scene d'archivio (o prodotti già elaborati) per costruire analisi multitemporali.

### **ENVISAT**

Progettato e costruito dall'ESA, è stato lanciato nel 2002. Lanciato con il vettore Ariane-5 dalla base di Kourou si trova ora in un'orbita polare elio-sincrona che gli garantisce una ripetitività al suolo di 35 giorni.

#### *Sensori*

Envisat monta a bordo 10 strumenti, sia attivi che passivi.

MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer): sensore con 15 bande e 300 metri di risoluzione al nadir.



Analisi multitemporale (1984/97) realizzata con sensore Landsat TM- Thematic Mapper (©USGS)

MIPAS (Michelson Interferometric Passive Atmospheric Sounder): spettrometro IR- infrarosso (4-15 micron) ad alta risoluzione.

ASAR (Advanced Synthetic-Aperture Radar): radar SAR ad alta risoluzione

GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars): spettrometro tarato mediante l'ausilio di stelle particolarmente luminose.

RA-2 (Radar Altimeter): radar altimetrico

MWR (Microwave Radiometer): radiometro MW- microonde

LRR (Laser Retro-Reflector): specchio riflettente per le stazioni laser di terra per la calibrazione degli strumenti a bordo.

SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)

AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer)

DORIS (Doppler Orbitography and Radio-Positioning Integrated by Satellite)

#### *Dati*

Esa e Spot Image sono i distributori dei dati disponibili e dei prodotti realizzati su richiesta. La disponibilità dei dati è visibile sul sito <http://cat.envisat.esa.int>. Le stazioni riceventi a terra distribuiscono in tempo reale i dati per applicazioni come il monitoraggio del clima e previsioni meteorologiche.

#### *Progetti principali*

Nel sito dedicato a Envisat sono presenti i prodotti e i progetti realizzati con i dati provenienti dai sensori, come per esempio ATSR World Fire Atlas, che raccoglie le mappe degli incendi e delle serie storiche degli incendi a livello mondiale attraverso immagini derivate dalle missioni ERS ed Envisat

#### *Applicazioni*

MERIS: studiato per l'osservazione della superficie terrestre e dei vari strati dell'atmosfera.

MIPAS: misura i vari costituenti dell'atmosfera su scala globale. Per studiare le problematiche dovute al buco dell'ozono, agli scambi termici tra troposfera e stratosfera e alle concentrazioni di gas dovuti ad attività antropiche.

ASAR (Advanced Synthetic-Aperture Radar): radar per il monitoraggio di onde marine, movimenti di calotte polari e ghiacciai montani, movimenti tettonici e osservazione di catastrofi naturali come inondazioni e terremoti.

GOMOS: spettrometro per lo studio dell'Ozono

RA-2: radar altimetro per l'analisi dell'altitudine della superficie terrestre e della topografia marina.

MWR: studio dell'umidità atmosferica al fine di correggere i dati provenienti dal RA-2 che sono influenzati dal contenuto del vapor d'acqua.

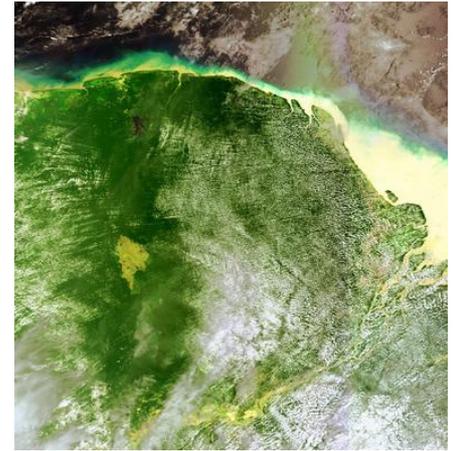


Immagine ESA del satellite Envisat (2005). La costa della foce del Rio delle Amazzoni è interessata da una scia di sedimenti sospesi riversati dal fiume in mare

SCIAMACHY: stima le tracce dei vari gas per lo studio dei fenomeni che influenzano la chimica atmosferica come gli incendi, l'inquinamento industriale, le tempeste di sabbia e le eruzioni vulcaniche.

AATSR misura delle temperature superficiali degli oceani e stima delle biomasse e del loro contenuto di umidità e la loro crescita.

### **2.6.3 Satelliti ad alta risoluzione temporale**

Sono principalmente i satelliti geostazionari che per le caratteristiche dell'orbita e naturalmente per gli scopi per cui sono stati realizzati monitorano la terra costantemente, i satelliti europei Meteosat, per esempio, inviano dati della superficie terrestre ogni trenta minuti. In questo contesto, poiché si intende porre l'attenzione su strumenti e dati relativi al territorio e all'ambiente a scala locale, nel database sono stati schedati solo alcuni satelliti meteorologici, utilizzati anche per lo studio e il monitoraggio degli oceani, dei ghiacciai e in generale per lo studio dei cambiamenti climatici. Se si escludono i satelliti geostazionari è possibile annoverare tra i satelliti ad alta risoluzione temporale i già citati satelliti commerciali ad alta risoluzione spaziale, e i satelliti della serie NOAA, nati principalmente per applicazioni meteorologiche, ma ad oggi molto utilizzati anche per l'osservazione della terra.

#### ***METEOSAT***

La seconda generazione Meteosat (MSG) consiste in una serie di quattro satelliti meteorologici geostazionari, gestiti da Eumetsat che integrano i dati provenienti dai satelliti americani e giapponesi e dalla serie di satelliti polari (Metop) lanciati recentemente e a operativi nei prossimi anni.

#### ***Sensori***

Il sensore principale è il (SEVIRI) Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager, radiometro che fornisce dati-immagine in 12 canali dello spettro elettromagnetico. Dei 12 canali, 8 si trovano nella parte infrarossa dello spettro elettromagnetico, 3 sono nella porzione visibile (di cui uno ad alta risoluzione) e uno nel vicino infrarosso. La risoluzione spaziale varia al variare delle bande, nel canale del visibile ad alta risoluzione è di 1 km, per le altre bande la risoluzione è di 3 km.

#### ***Dati***

Il sensore registra il dato in formato WEFAX analogico, su cui non è possibile svolgere alcuna post-elaborazione numerica e in formato HRI (High Resolution Image) digitale criptato.

I dati della trasmissione analogica sono acquisibili tramite stazioni secondarie (SDUS: Secondary Data User Station) commerciali, mentre i dati della

trasmissione digitale richiedono l'uso di una stazione di ricezione primaria (PDUS: Primary Data User Station) con una unità di decriptazione rilasciata dall'Eumetsat tramite il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare.

### *Applicazioni*

Previsioni metereologiche, indagini sul clima e cambiamenti climatici, nello specifico è possibile l'analisi del tipo e dello spessore di nuvolosità, il rilevamento della nebbia e della neve, la misurazione della temperatura del suolo, del mare e il rilevamento degli incendi.

Possono essere monitorati vortici e turbini di vapor acqueo anche dove non è presente della nuvolosità vera e propria.

### **NOAA 15-18**

I satelliti TIROS, poi NOAA serie 12-18, in orbita quasi polare a 870 km sono gestiti dalla National Oceanographic Atmospheric Administration (NOAA) a bordo montano 4 strumenti principali. I dati ricavati da queste satelliti vengono impiegati da tutti i Paesi per l'elaborazione di dati su oceani, vegetazione e agricoltura e per la ricostruzione dello stato termodinamico dell'atmosfera. Attualmente sono in orbita due satelliti, che consentono la copertura globale della terra ogni 6 ore. Un satellite attraversa l'Equatore al mattino da Nord a Sud, il secondo lo attraversa di pomeriggio.

### *Sensori*

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer a 6 bande nel campo del visibile- rosso e dell'infrarosso e del termico. L'AVHRR viene utilizzato per la determinazione della copertura nuvolosa, della temperatura superficiale del mare e del terreno, l'osservazione della vegetazione, della neve e del ghiaccio, del mare e delle acque interne.

AMSU-A (Advanced Microwave Sounding)

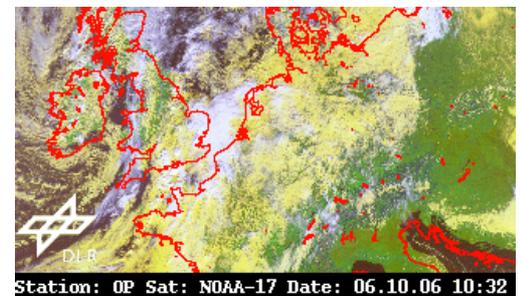
HIRS/4 (High Resolution Infra Red Radiation Sounder)

MHS (Microwave Humidity Sounder)

### *Dati*

La maggior parte dei dati è reperibile e acquistabile on line, da siti dell'ESA, della NASA e naturalmente del NOAA. Sul sito <http://www.class.noaa.gov>, per esempio, è possibile individuare e ordinare una serie di prodotti del NOAA e del Dipartimento della Difesa USA, come quelli del programma POES (Polar-orbiting Operational Environmental Satellite) e GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite).

Nel 2003 il Lamma- Laboratorio di Meteorologia e Modellistica Ambientale in collaborazione con l'università di Berlino (Free University of Berlin), ha realizzato un nuova banca dati (<http://www.lamma.rete.toscana.it>), per il



NOAA 17 AVHRR, immagine Europa 6 agosto 2006

bacino del Mediterraneo con una risoluzione di circa 4km al fine di derivare, a partire dai valori registrati nella varie bande dell'AVHRR, informazioni relative alla temperatura superficiale del mare e dell'indice di vegetazione, per utilizzarle nel modello meteorologico di previsione RAMS

#### *Applicazioni*

Il sensore AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer), è stato progettato per applicazioni di meteorologia, con il tempo tuttavia i dati acquisiti sono stati utilizzati per il monitoraggio della temperatura superficiale sia marina che terrestre e per studi sulla vegetazione terrestre, sull' agricoltura (umidità dei suoli) e per la localizzazione e il monitoraggio di incendi e vulcani.

### **2.6.4 Altre missioni importanti**

#### ***SPOT 5***

Costruito da CNES- Centre National d'études spatiales in Francia, nel 2002 è stata lanciata la serie 5, in orbita polare eliosincrona a 832 km. Il satellite monta a bordo un sensore dedicato alle informazioni relative alla vegetazione, a bassa risoluzione , e due sensori con risoluzione più alta che consentono (anche in stereoscopia) di elaborare produzioni e aggiornamenti cartografici. L'angolo di vista dei sensori può essere calibrato per modificare la vista oltre la direzione verticale sul nadir così da incrementare la capacità di rivisitazione del satellite.

#### *Sensori*

Gli strumenti a bordo sono: DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), HRG (High Resolution Geometric) a quattro bande e con risoluzione spaziale di 10 metri e di 20 metri nella banda del termico, HRS (High Resolution Stereoscopic), che prevede l'acquisizione delle immagini in stereoscopia nella banda del pancromatico arrivando ad una risoluzione di 5 metri e VEGETATION 2, per studi a scala globale (risoluzione spaziale di 1 km). sulla vegetazione.

#### *Dati*

I dati sono distribuiti da Spot Image o da distributori locali (nazionali)

#### *Progetti principali*

GLC (Global Land Cover) del 2000, con i dati ricavati dal Vegetation. GMES- GUS  
Il progetto GUS (Global Monitoring for Environment and Security GMES Urban Services), promosso dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea) e dall'Unione Europea al fine di monitorare i cambiamenti dell'uso del suolo, le trasformazioni del territorio e la qualità ambientale urbana.

### *Applicazioni*

Con il sensore Vegetation: monitoraggio delle produzioni agricole, delle aree desertiche e deforestazioni a scala globale, e monitoraggio della biosfera (<http://www.spot-vegetation.com/vegetationprogramme/index.htm>).

Con il sensore HRS: realizzazione stereocoppie che consentono la realizzazione di DTM e cartografia digitale o aggiornamento della stessa.

### ***ERS-2: European Remote-Sensing Satellite-1 (Ariane 4)***

Il satellite è composto da un Radar Altimetro, il radiometro ATSR, lo strumento AMI (SAR e Wind Scatterometer), Prare (Precise Range and range -rate Equipement), il Laser retroreflector, lo strumento IDHT (Instrument Data Handling and Trasmission). Il satellite è l'evoluzione dell'ERS1, al radiometro ATSR sono state aggiunte delle bande nel visibile. La missione ERS2, come la precedente ERS1, a differenza di altre missioni (Landsat p.e.) prevede ripetibilità dipendente dai progetti in corso.

### *Sensori*

ATSR/MWR: Along Track Scanning Radiometer Microwave e ATSR/IRR: Along Track Scanning Radiometer Infrared che lavora in 4 bande, una nel rosso e tre nell'infrarosso termico. AMI-SAR: Radar ad Apertura Sintetica, AMI-SCAT: AMI in Wind Scatterometer Mode, RA-1: Radar Altimeter

### *Progetti*

Uno dei risultati più interessanti ottenuti dalle missioni ERS sono state nel campo dell'interferometria SAR, dove per la prima volta sono state prodotte precise informazioni topografiche accoppiando immagini dell'ERS 1 e 2 tra luglio 1995 e luglio 1996.

### *Applicazioni*

Con l'ATSR nel microonde: Misura del vapor acqueo atmosferico, così da aumentare il grado di accuratezza delle misure sulla temperatura degli oceani.

Con il SAR (AMI): in campo ambientale, valutazione versamenti accidentali in acque (chiazze di olio, inquinanti) e avvistamento e localizzazione di scarichi abusivi di idrocarburi. Nel campo dei rischi: monitoraggio esondazioni e valutazione estensione per stima dei danni e stima di forti variazioni temporali di umidità del terreno. Con il radar altimetro: parametri dei ghiacci (misure topografiche, tipi di ghiacci, confine ghiaccio/acqua) e studio della superficie dei mari per valutazioni geodetiche e sulle correnti marine. Con l'ATSR nell'infrarosso: copertura nuvolosa e sua temperatura e SST- Sea Surface Temperature.

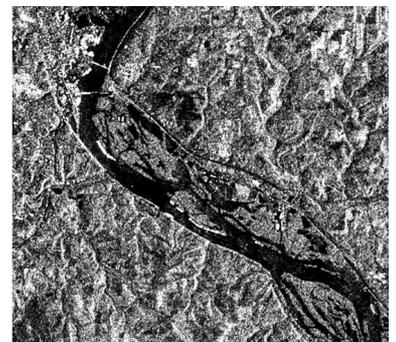
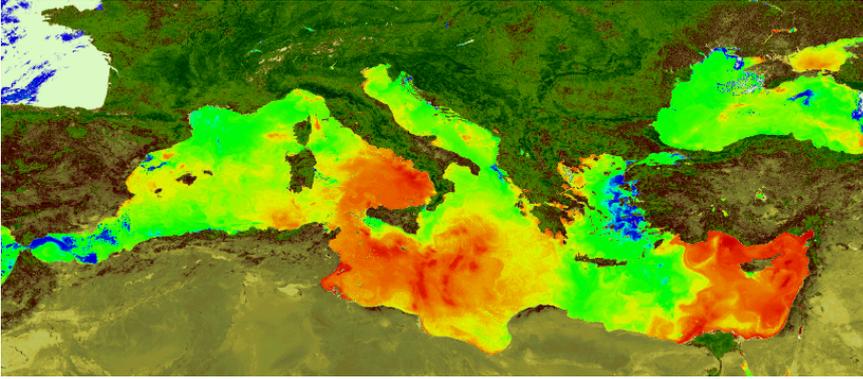


Immagine Radar - SAR- ERS-2



L'immagine mostra il bacino del mediterraneo ripreso dal sensore ATSR-2 nell'estate del 1996, restituendo valori relativi alla temperatura della superficie del mare e alla vegetazione. La temperatura è derivata combinando i dati prodotti dalle bande dell'infrarosso termico.

## **2.7 Panoramica delle applicazioni**

L'obiettivo di questo paragrafo è di descrivere la classificazione adottata nella base dati DB SENSORI relativamente alle diverse applicazioni d'uso dei sensori a bordo dei satelliti. Il telerilevamento è sempre più utilizzato per studi che abbracciano diverse tematiche, in campo marino, terrestre e atmosferico. I dati ricavabili sono utilizzati a supporto e integrazione di studi e progetti o di archivi e base di dati derivati da altre fonti e di diverso formato. Il Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) ha avviato dal 1998 la "Integrated Global Observing Strategy" (IGOS), un programma internazionale dove i rappresentanti dei diversi enti e delle agenzie spaziali nazionali si prefiggono di studiare, promuovere e rendere accessibili i dati provenienti da satellite secondo una classificazione delle applicazioni più promettenti e significative, tra cui:

- Ricerca sul clima;
- Chimica della stratosfera;
- Previsioni meteorologiche;
- Servizi all'agricoltura ed alle foreste;
- Censimento delle risorse;
- Monitoraggio dei rischi e la valutazione dei danni derivanti da eventi catastrofici;
- Monitoraggio dei ghiacci;
- Gestione delle acque costiere;
- Applicazioni oceanografiche.

Le caratteristiche tecniche e le considerazioni sulle problematiche principali che influenzano o modificano il dato registrato dai sensori elencate in questo capitolo avevano l'obiettivo di evidenziare, anche se non di approfondire, i principi di funzionamento di tali strumenti. Ma soprattutto di individuare i

parametri che consentono di scegliere o di valutare quale strumento utilizzare nei diversi campi applicativi.

Il principio di funzionamento dei sensori si basa, ed è stato più volte ribadito, sulla registrazione, da parte dello strumento, della radiazione elettromagnetica proveniente dagli oggetti osservati, alle diverse lunghezze d'onda. Le regioni dello spettro che il sensore è in grado di rilevare vanno generalmente dal visibile al microonde.

Ciò consente di fare una prima distinzione tra applicazioni: ovvero tra usi più vicini alla fotogrammetria, che utilizzano le bande del visibile e a volte dell'infrarosso vicino, con strumenti dalle spiccate caratteristiche spaziali che consentono di sostituire o migliorare la fotointerpretazione e quindi la successiva restituzione cartografica e invece usi che enfatizzano la risposta o firma spettrale dei diversi oggetti e che necessitano di operazioni di classificazione più o meno complesse, così da esaltare le caratteristiche chimico-fisiche di quanto rilevato e che utilizzano molte più regioni dello spettro elettromagnetico, dall'ultravioletto al microonde.

E' però doveroso specificare che molto spesso nella fotointerpretazione si ricorre al miglioramento della risoluzione radiometrica e spettrale per esaltare la luminosità e le differenze tra oggetti sommando dati provenienti da sensori multispettrali, oppure evidenziando cambiamenti minimi di morfologia con l'uso di sensori attivi di precisione (laser scanner o radar). Per contro le operazioni di classificazione spesso prevedono operazioni di fusione dei dati multispettrali con dati pancromatici, al fine di migliorare l'informazione spaziale.

Altra distinzione e classificazione possibile è legata al tempo di rivisitazione del satellite a cui di fatto si lega nuovamente una scelta sulla risoluzione spaziale, applicazioni di tipo meteorologico necessitano di monitoraggi continui per cui la maggior parte dei satelliti lavora su orbite geostazionarie, a 36.000 km dalla superficie terrestre che hanno il pregio di fornire i dati sia di giorno che di notte in modalità continua e in *real time*, a scapito però della risoluzione spaziale, che non va mai sotto il chilometro. Le stesse considerazioni valgono per studi di oceanografia e cambiamenti climatici. L'evoluzione delle trasformazioni urbane, dell'uso e della copertura del suolo possono essere invece evidenziati attraverso il confronto di immagini della stessa scena riprese a mesi, se non ad anni di distanza, in questo caso si fa ricorso a sensori e ad archivi di sensori a media risoluzione spaziale e spettrale, che consentono analisi multitemporali.

La classificazione individuata e adottata nel DB SENSORI parte da una distinzione tra tematiche e applicazioni su scala globale, solo accennate, per soffermarsi invece sulle applicazioni a scala locale, relative a problematiche di tipo territoriale e ambientale. Un'ultima precisazione va fatta sul grado di dettaglio

che si è scelto di adottare: esistono già archivi e database, quello del CEOS su tutti, che evidenziano nello specifico quali bande del sensore utilizzare per misurare un parametro o costruire un indicatore: misura della clorofilla, della colonna di aerosol, ecc. Poiché l'obiettivo comune delle ricerche è l'individuazione dei dati più "adatti" (per tempo, costo, scala, ecc) a fornire informazioni di supporto alla pianificazione in campo territoriale e ambientale, il dettaglio con cui sono stati affrontati gli strumenti è volutamente meno specifico e tecnico. Nella base dati pertanto non si arriva a dettagliare il parametro, ma piuttosto i risultati attesi, inoltre a questo livello di lavoro non è possibile entrare nel merito delle singole bande, sarà comunque interessante, in fase successiva per una determinata applicazione specificare meglio i parametri utilizzabili.

### **2.7.1 Applicazioni a scala globale**

Si tratta di applicazioni relative alla meteorologia e agli studi climatici, al monitoraggio dell'ambiente e di grandi eventi e fenomeni, a scala mondiale (deforestazioni, monitoraggio ghiacciai, grandi incendi). Nella ricerca queste applicazioni, non direttamente correlate a studi puntuali sul territorio, vengono solo citate. Resta la consapevolezza che un confronto e una verifica dei dati ricavabili da satelliti che operano a scala globale possono portare ad importanti considerazioni anche per problematiche a scale più grandi, come per lo studio dell'inquinamento atmosferico che colpisce le città, per l'analisi delle catastrofi naturali, per la gestione delle aree costiere, ecc.

#### **1) Meteorologia e studi climatici**

Si tratta di applicazioni inerenti lo studio dell'atmosfera terrestre da cui sono ricavabili previsioni e informazioni meteorologiche. Lo studio dell'atmosfera è utile anche per studi sui cambiamenti climatici. Tra le informazioni ricavabili, soprattutto dai sensori geostazionari si possono elencare:

- spessore, altezza, posizione e densità delle nubi
- temperatura e umidità dell'atmosfera e della superficie terrestre
- velocità dei venti
- colonna totale di ozono

#### **Bande utilizzate**

*Visibile:* individuazione delle nubi e valutazione del loro spessore

*Infrarosso termico:* temperatura delle nubi, che insieme allo spessore i identificano il tipo di nube.

*Infrarosso medio*: dati sul vapor acqueo e quindi sul contenuto d'acqua della troposfera.

*Ultravioletto*: informazioni sui livelli e la distribuzione dell'ozono stratosferico, regione dello spettro dove l'energia solare è solo parzialmente assorbita dall'ozono.

*Microonde (passivo)*: individuazione dell'acqua presente in atmosfera allo stato liquido o solido.

### ***Esempi di applicazioni***

▪ Analisi degli scambi termici tra troposfera e stratosfera
▪ Analisi dei venti
▪ Analisi dell'umidità dell'atmosfera
▪ Analisi delle temperature dell'atmosfera
▪ Analisi sulla forma e proprietà delle nuvole
▪ Classificazione e carte della copertura nuvolosa
▪ Monitoraggio dello strato di ozono
▪ Previsioni del tempo
▪ Stima dell'albedo (frazione di luce o, più in generale, di radiazione incidente che viene riflessa)
▪ Studi sugli aerosol (nuvole, nebbia, pulviscolo atmosferico)
▪ Studi sullo stato termodinamico dell'atmosfera
▪ Valutazione della temperatura superficiale marina
▪ Valutazione e previsione delle precipitazioni

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

Per previsioni e informazioni metereologiche l'Europa è costantemente osservata dai satelliti geostazionari Meteosat, che acquisiscono immagini anche per l'Africa e il Medio Oriente con risoluzione temporale di circa 30 minuti. Le altre aree del mondo sono monitorate da altri satelliti metereologici geostazionari, per l'America per esempio i satelliti GOES Est e GOES Ovest, per il Giappone i GMS, per l'India la serie INSAT, il cinese FY e il GOMS russo. I dati derivati dai sensori geostazionari possono essere integrati con quelli derivati da satelliti in orbita quasi-polare, come i sensori americani NOAA- National Oceanic and Atmospheric Administration, per studi climatici e ambientali. Per l'Europa è possibile ora utilizzare l'archivio NOAA e tra qualche tempo una serie di piattaforme polari dedicate (la serie Metop).

Per le analisi invece sulla concentrazioni di gas atmosferici, sempre a scala regionale, l'ESA ha sviluppato i sensori sul satellite ENVISAT Mipas e Sciamachy.

Il Gomos su ENVISAT e la strumentazione Toms sul satellite EARTH PROBE misurano la colonna totale di ozono, dalla superficie terrestre all'estremità superiore dell'atmosfera.

## ***2) Monitoraggio fenomeni naturali e antropici (indicatori di cambiamenti climatici)***

Incendi a scala globale, riduzione della superficie e dello spessore dei ghiacciai, processi di desertificazione, sono considerati dalla comunità scientifica importanti indicatori dei cambiamenti climatici in corso.

### *Ghiacciai*

I ghiacci polari coprono una superficie vicina all'estensione del continente Nord Americano. Questa enorme superficie contribuisce in modo determinante al valore dell'albedo terrestre che rappresenta il rapporto tra l'energia elettromagnetica riflessa o diffusa dalla terra e l'energia totale incidente su di essa. La neve ed i ghiacci avendo un'alta riflettività del visibile, contribuiscono in modo significativo al valore di questo parametro le cui variazioni, sia a livello di distribuzione che di entità, determinano conseguenti cambiamenti nel bilancio energetico del nostro pianeta. Una diminuzione dei ghiacci comporta infatti una riduzione dell'albedo terrestre con un conseguente aumento di assorbimento di energia determinando un innalzamento globale della temperatura.

### *Deforestazione*

Le foreste contengono un grande numero di ecosistemi che costituiscono un'immensa riserva di specie vegetali e animali e giocano un ruolo molto importante per il clima a livello mondiale. Negli ultimi decenni, in diverse regioni della terra, per diverse ragioni soprattutto economiche, è avvenuta una riduzione sostanziale di tali foreste. L'utilizzo di immagini da satellite offre una visione sinottica delle aree soggette a deforestazione e consente di monitorare i cambiamenti ad intervalli regolari di tempo.

### *Incendi a scala globale*

L'importanza di questo fenomeno è dovuta allo stretto legame che esiste fra gli incendi nelle zone tropicali del globo e la chimica della troposfera: la combustione della biomassa, di cui è costituita la vegetazione, provoca il rilascio nell'atmosfera di grandi quantità di gas quali anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), che sono in parte responsabili dell'effetto serra, o gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>)

che contribuiscono alle piogge acide e sono tutti precursori dell'ozono troposferico.

Ciò giustifica i recenti numerosi progetti di ricerca a livello internazionali per la conoscenza e la stima dei cambiamenti di superficie e volume nei ghiacci polari

### ***Bande utilizzate***

#### *Ghiacciai*

*Microonde attivo.* La tecnologia radar risulta essere particolarmente adatta per studi in queste aree in quanto è in grado di fornire informazioni sulle superfici investigate in qualunque condizione meteorologica. Inoltre, dall'analisi di coppie di immagini radar dello stesso territorio (in particolare attraverso tecniche di interferometria), riprese in tempi diversi, si possono individuare con grande precisione i cambiamenti nella struttura e tipologia dei ghiacci.

#### *Deforestazione*

Un metodo ampiamente utilizzato per monitorare i cambiamenti subiti dalle foreste su questo tipo di immagini è la fotointerpretazione. Poiché si tratta di una applicazione a scala mondiale, si utilizzano comunque sensori a risoluzione spaziale media.

A livello metodologico, per valutare i cambiamenti che un'area forestata ha subito nel tempo, viene eseguita l'interpretazione di immagini satellitari acquisite ad alcuni anni di distanza l'una dall'altra, utilizzando composizioni RGB a falsi colori standard (RGB: 432 = IR, rosso, verde) che consentono di visualizzare la vegetazione in colore rosso. I risultati della fotointerpretazione vengono successivamente confrontati tra loro per valutare i cambiamenti avvenuti e stimare la superficie di area deforestata.

#### *Incendi a scala globale*

Per l'individuazione dei fuochi attivi viene generalmente utilizzato il canale dell'infrarosso medio, per il fatto che il suo intervallo spettrale è prossimo al valore massimo della radiazione emessa da corpi con temperatura attorno agli 800 K, la temperatura tipica degli incendi di savana. In sostanza questo canale risulta più sensibile alla radiazione emessa dagli incendi rispetto ai canali dell'infrarosso termico, più idonei invece per misurare le emissioni ad una temperatura di 300 K. Tuttavia, a causa della confusione che può crearsi tra gli incendi e altre superfici altamente riflettenti, quali specchi d'acqua, zone desertiche o con scarsa copertura vegetale, che determinano a loro volta una risposta molto alta nel canale dell'infrarosso medio, i metodi in genere utilizzati

per l'individuazione dei pixel contenenti fuochi attivi si basano sull'utilizzo combinato dei canali 3 e 4 del sensore AVHRR o meglio sulla differenza relativa tra i due canali, che è più grande per bersagli caldi rispetto a quelli freddi.

### ***Esempi di applicazioni***

- Discriminazione del confine ghiaccio/acqua

---

- Monitoraggio del grado di deforestazione a scala globale

---

- Monitoraggio dell'umidità del suolo

---

- Monitoraggio della neve

---

- Monitoraggio delle nebbie

---

- Monitoraggio delle tempeste di sabbia

---

- Monitoraggio di incendi a scala globale

---

- Studi sui bilanci energetici globali

---

- Studi sulla riduzione dei ghiacciai

---

- Studio delle emissioni di SO<sub>2</sub> da eruzioni vulcaniche

---

- Valutazione della temperatura superficiale terrestre (LST)

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

#### ***Ghiacciai***

Il primo satellite utilizzato per mappare la regione antartica è stato il RADARSAT, adesso sono disponibili e sono stati utilizzati altri sensori attivi SAR- Synthetic Aperture Radar, sia montati su ERS 1 e 2 che su ENVISAT.

#### ***Deforestazione***

I sensori maggiormente utilizzati sono il NOAA-AVHRR e lo SPOT-VEGETATION. Quest'ultimo sensore è stato progettato appositamente per studi sulla vegetazione a scala globale (risoluzione spaziale 1 km).

Le immagini a bassa risoluzione costituiscono comunque una guida per individuare aree su cui effettuare studi più approfonditi mediante dati a maggiore risoluzione spaziale, come quelli dei satelliti LANDSAT e SPOT.

#### ***Incendi***

Il satellite più utilizzato per l'individuazione degli incendi è sicuramente il NOAA-AVHRR, grazie alle sue caratteristiche peculiari: la presenza di canali dell'infrarosso medio e termico, il basso costo e la larga disponibilità dei dati, l'esistenza di archivi storici decennali, la capacità di copertura giornaliera delle aree da studiare.

### ***3) Oceanografia e studi sulla fascia costiera***

I mari rappresentano un'enorme serbatoio di nutrienti e sali minerali, sostanze essenziali per l'intera catena alimentare del pianeta, e giocano un ruolo determinante negli equilibri gassosi con il comparto atmosferico. La CO<sub>2</sub> disciolta negli oceani è infatti in stretta correlazione, in funzione della temperatura delle acque, con quella atmosferica e si stima che gli oceani siano i più grandi serbatoi di carbonio al mondo. Inoltre i mari "sottraggono" la CO<sub>2</sub> atmosferica grazie ai processi fotosintetici di alghe e fitoplancton, fissandola nei legami di carbonio di molecole più complesse che sono alla base dell'intera catena alimentare marina. In questa ricerca gli studi di oceanografia sono considerati solo come supporto allo studio e al monitoraggio delle fasce costiere e la loro gestione integrata.

#### ***Bande utilizzate***

*Visibile:* possibilità misurare il contenuto di clorofilla o altri pigmenti contenuti nel plankton (ad esempio usando canali a 0.46 e 0.54  $\mu\text{m}$ ) oppure la presenza di sedimenti (nella regione 0.7-0.8  $\mu\text{m}$ ). anche per il controllo delle aree costiere (inquinamento, erosioni, ecc.).

*Infrarosso:* i corpi d'acqua diventano molto assorbenti (poco riflettenti) a lunghezze d'onda oltre il visibile, si distinguono bene da altre superfici nell'infrarosso vicino e medio.

*Infrarosso termico:* per la valutazione della temperatura superficiale del mare, sia di giorno che di notte trattandosi di radiazione emessa spontaneamente.

Ne fanno grande uso enti centralizzati per la previsione meteorologica o per studi di tipo climatologico. Spesso la temperatura del mare è un "traccante" di altri processi e può essere utile nel controllo di fenomeni costieri.

*Microonde:* misura la rugosità (moto ondoso) e quindi il vento superficiale che l'ha prodotta. Si utilizzano radiometri (passivi) ma soprattutto con sistemi radar (tra cui lo scatterometro dedicato proprio alla misura del vento).

#### ***Esempi di applicazioni***

- Analisi costiere, laghi e batimetria
- Gestione delle risorse ittiche
- Monitoraggio dei ghiacci in mare (movimenti delle calotte polari)
- Monitoraggio del grado di trofia
- Monitoraggio del moto ondoso
- Monitoraggio del valore di clorofilla
- Monitoraggio della temperatura superficiale dei mari (SST)

- Monitoraggio di sedimenti riversati in mare
- Produzione di cartografie della concentrazione di sedimenti in acque torbide
- Produzione di cartografie delle scogliere coralline
- Studi sull'inquinamento costiero
- Studi sulla superficie dei mari per valutazioni geodetiche
- Studi sulla topografia marina
- Valutazione delle correnti marine

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

I sistemi di telerilevamento da satellite specificatamente progettati per applicazioni in questo settore sono quelli operanti nelle bande ottiche del visibile, preferibilmente a bande strette e, per lo studio delle temperature superficiali, nell'infrarosso lontano. Fra questi il *CZCS- Coastal Zone Colour Scanner* e il sensore *SeaWiFS Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*.

Il sensore *CZCS* è stato progettato dalla NASA alla fine degli anni '70 e lanciato sul satellite *Nimbus-7* nell'ottobre del 1978. Il sensore ha lavorato per più di sette anni fino al giugno del 1986 acquisendo più di 68.000 immagini. Il *CZCS* è uno scanner multispettrale a sei bande: i primi 4 canali, sono stati appositamente progettati per lo studio del colore delle acque. Il canale 6 operava nella regione dell'IR termico, misurando l'energia emessa dalle superfici ed è stato perciò usato per la produzione di mappe di temperatura dei mari. Il progetto della Comunità Europea *OCEAN (Ocean Colour European Archive Network)* iniziato nel 1990 è un esempio dell'applicazione dei dati *CZCS* per monitorare i mari europei. Obiettivo del progetto era creare una banca dati dei che descrivesse i parametri di concentrazione dei pigmenti fitoplanctonici e di temperatura superficiale delle acque.

La temperatura dei mari può essere anche monitorata con i satelliti NOAA, che forniscono più di un immagine al giorno di temperatura superficiale dell'area indagata, grazie alle bande che misurano la radiazione nella regione IR termico. La possibilità di accedere ad archivi storici di questi dati consente di vederne le variazioni, di ricavarne valori medi stagionali o annuali e di poter studiare le relazioni che intercorrono tra temperatura e concentrazioni di clorofilla seguendone andamenti e interdipendenze.

Anche il livello dei mari e la velocità dei venti può essere stimata usando dati da Telerilevamento satellitare. Satelliti quali *GEOSAT*, *ERS-1* e *ERS-2* e *TOPEX* montano sensori radar che possono fornire misure dell'altezza delle superfici che riprendono (radar altimetri). Questi strumenti consentono infatti di

conoscere quale sia la distanza tra il satellite e la superficie osservata analizzando le differenze tra il segnale trasmesso e quello retrodiffuso dalla superficie. Tra questi sensori il *TOPEX- Ocean TOPography Experiment* nasce da una collaborazione tra Stati Uniti e Francia proprio per la misurazione del livello dei mari ed è stato progettato per contribuire agli studi sulla circolazione generale degli oceani e sulla relazione che questa ha con l'atmosfera ed i fenomeni climatici. A partire da questo tipo di dati si possono perciò misurare le variazioni di quota del livello dei mari e la velocità dei venti che le determinano.

## **2.7.2 Applicazioni a scala locale**

### **4) Vegetazione naturale**

Le immagini telerilevate sono un efficace strumento per la classificazione delle specie vegetali e per la mappatura della loro estensione. Con l'utilizzo di sensori multispettrali, integrate a dati provenienti da satelliti ad alta risoluzione spaziale è possibile foto interpretare la vegetazione e discriminarla. Le stime quantitative possono inoltre essere integrate a misure qualitative, sullo stato di salute della vegetazione, che di conseguenza influiscono in generale sulla più generale qualità ambientale.

È possibile infatti costruire indici sintetici come l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index:  $NDVI = (RNIR - RRED) / (RNIR + RRED)$ ) per monitorare le condizioni della copertura vegetale mettendo in relazione l'assorbimento spettrale della clorofilla nel rosso con la riflessione nel vicino infrarosso, fortemente influenzata dal tipo di strutture fogliare. L'NDVI fornisce un valore numerico adimensionale, teoricamente compreso tra -1 e +1. Tale valore è in stretta relazione con lo stato di salute della vegetazione, intesa come biomassa e area fogliare (Leaf Area Index), ed ai processi biochimici ad essa correlati (attività fotosintetica). La caratteristica del comportamento dei pigmenti delle foglie non sottoposte a stress è infatti quella di riflettere soltanto circa il 10% della radiazione ricevuta nella regione spettrale della luce visibile (rosso), ed allo stesso tempo di riflettere oltre il 40% di quella ricevuta nell'infrarosso vicino. Valori bassi di NDVI si verificano in aree a bassa o assente copertura vegetale, o dove la vegetazione presente è senescente o sofferente, mentre gli alti valori dell'indice rispecchiano una situazione di forte attività fotosintetica e quindi elevata presenza di biomassa.

Il *Leaf Area Index* LAI (definito come l'area fogliare per unità di superficie del terreno) e la Frazione di radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dalla vegetazione (FaPAR) sono altri due parametri vegetativi importantissimi per descrivere molti processi delle piante come la fotosintesi e l'evapotraspirazione.

Molti modelli utilizzati per descrivere e studiare gli ecosistemi utilizzano il LAI e l'FaPAR come parametri di input.

### ***Bande utilizzate***

*Visibile e infrarosso vicino:* i canali nel visibile messi in relazione a quello nel vicino infrarosso permettono di valutare l'attività fotosintetica, mentre canali a maggiore lunghezza d'onda, sempre nell'infrarosso vicino, sono sensibili al contenuto d'acqua. Pertanto, l'analisi della firma spettrale permette non solo di distinguere un certo numero di tipi di vegetazione, ma anche valutarne le condizioni di sviluppo e di salute. Se le immagini hanno una risoluzione geometrica adeguata è possibile anche studiare la forma delle aree vegetate, fino ad arrivare alla forma delle singole piante, ulteriore strumento per identificarne la tipologia.

*Microonde:* osservando la vegetazione a microonde con radar ad alta risoluzione possono essere ricavate informazioni complementari a quelle dei sensori ottici. Queste sono relative soprattutto alle caratteristiche morfologiche (geometria e distribuzione spaziali di foglie e rami) e al contenuto d'acqua, fattori che contribuiscono ulteriormente al riconoscimento tematico e alla valutazione dello stato vegetativo (ad esempio la biomassa vegetale).

### ***Esempi di applicazioni***

- Discriminazione delle classi vegetazionali
- Individuazione di vegetazione in aree desertiche o semi-desertiche (NDVI)
- Monitoraggio del grado di deforestazione a scala locale
- Monitoraggio dell'estensione e dei cambiamenti nelle classi di vegetazione
- Monitoraggio dello stato di salute della vegetazione idrofila
- Stima delle biomassa vegetali
- Studi sullo stress e sullo sviluppo della vegetazione
- Valutazione dell'evapotraspirazione
- Valutazione delle condizioni idriche della vegetazione
- Valutazione dello stato fitosanitario

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

I sensori *LANDSAT* e *SPOT* sono utilizzati per la costruzione di "inventari" vegetali. Le bande 4 del *Landsat TM- Thematic Mapper* e le bande 6 e 7 del *MSS Multispectral Scanner* (o la banda 3 dello *SPOT*) sono le più sensibili per

misurare la riflettanza nell'infrarosso delle cellule delle piante (modificate dal contenuto idrico). La banda 3 del TM e 5 del MSS Band 5 (o Banda 2 nello SPOT), che misurano la riflettanza nel rosso, forniscono informazioni sull'assorbimento della radiazione da parte della clorofilla.

Il radar *SAR* su *ENVISAT* consente la costruzione, in interferometria, di Modelli digitali delle superfici- DSM e quindi consentono l'individuazione della morfologia della vegetazione.

Il sensore MODIS su Terra ha molte bande sensibili alla vegetazione usate per calcolare la variazione nell'indice NDVI, attraverso l'indice *EV- Enhanced Vegetation Index*.

La serie *NOAA- AVHRR* è utilizzata per la costruzione dell'indice NDVI e per analisi multitemporali sull'estensione e salute della vegetazione.

I Sensori commerciali ad alta risoluzione spaziale sono utilizzati per la fotointerpretazione e quindi per il miglioramento della discriminazione tra specie.

Sono stati realizzati alcuni studi sulla vegetazione anche con il satellite sperimentale *CHRIS - Project for On-Board Autonomy*, finanziato da ESA, che monta a bordo il sensore CHRIS, uno spettrometro iperspettrale ad alta risoluzione spaziale.

### **5) Vegetazione coltivata**

L'agricoltura gioca un ruolo dominante sia nei paesi sviluppati sia in quelli in via di sviluppo dove è importante per tutti ottimizzare il rapporto tra produzione e risorse impiegate, preservando allo stesso tempo lo stato dell'ambiente. Per raggiungere questo obiettivo è necessario acquisire, su grandi aree e ad intervalli più o meno regolari di tempo, una serie di informazioni sullo stato di salute delle colture, le condizioni del suolo, la presenza di eventuali infestazioni, ecc. Poter valutare in anticipo i danni che una coltura sta subendo, la gravità dell'attacco e le zone maggiormente colpite consente di effettuare interventi fito-sanitari mirati sull'area colpita, riducendo così i tempi dell'intervento, preservando l'ambiente e tutelando il consumatore.

In agricoltura il telerilevamento è utilizzato per la classificazione del tipo di colture presenti, il monitoraggio del loro stato fenologico e di salute, per elaborare la previsione dei raccolti o monitorare le aree sottoposte a piani di assetto e incentivazione. Per applicazioni in agricoltura si sfruttano le potenzialità di discriminazione della firma spettrale dei sensori multispettrali e le elevate risoluzioni spaziali e radiometriche dei recenti satelliti commerciali, come IKONOS, QUICKBIRD, ecc. L'esigenza di potenziare la discriminazione tra classi di colture, me anche di poter far uso di immagini in tempi molto rapidi o

su commessa ha spinto tali applicazioni verso l'utilizzo integrato di sensori iperspettrali a bordo di piattaforme aeree, sistemi di centraline meteo a terra e uso di Gps per il controllo dei mezzi di semina o raccolta dei prodotti.

### ***Bande utilizzate***

*Visibile.* Bande utilizzate per la fotointerpretazione delle colture, anche attraverso analisi multitemporali e per la costruzione di indici vegetazionali come l'NDVI.

*Infrarosso vicino.* Analisi dello stato di salute, costruzione (insieme al visibile) di indici vegetazionali.

### ***Esempi di applicazioni***

- Gestione del turno irriguo nelle risaie
- Monitoraggio dei PAC (Politiche Agricole Comunitarie) in itinere
- Monitoraggio del grado di irrigazione e di stress idrici
- Monitoraggio delle gelate in arboricoltura
- Monitoraggio delle rotazioni colturali
- Stima della produzione e censimento delle colture agricole
- Studi fenologici (parte dell'ecologia che studia i rapporti tra fattori climatici e manifestazioni stagionali di alcuni fenomeni della vita vegetale)
- Valutazione dello stato fitosanitario

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

Le riprese di sensori come il *LANDSAT* offrono in generale una buona risoluzione geometrica e informazione multispettrale, ma non possono registrare attraverso le nuvole. È pratica comune quindi, per applicazioni in campo agricolo, integrare le informazioni di tali sensori con quelle derivate da sensori radar che garantiscono l'acquisizione di dati anche in presenza di copertura nuvolosa e quindi con una maggiore frequenza temporale. Inoltre il segnale radar può fornire informazioni utili sulla struttura, il volume e l'allineamento delle colture nonché sul loro contenuto d'acqua.

Le metodologie impiegate per studi di tipo agricolo prevedono:

- l'uso dell'NDVI e di indici fogliari in relazione a modelli di sviluppo fenologico delle colture;
- la fotointerpretazione per la definizione delle aree test;
- l'applicazione di algoritmi di classificazione appositamente sviluppati.

### **6) Pianificazione ed Uso del suolo**

Le differenti caratteristiche naturali e artificiali degli elementi possono essere identificate e catalogate in termini di copertura del suolo. Il termine uso del suolo è spesso un sinonimo, ma si riferisce più appropriatamente alle caratteristiche che descrivono come il suolo sia usato dall'uomo. Uno dei primi progetti significativi di utilizzo delle immagini da satellite Landsat è stata la costruzione del *Corine Land Cover* nel 1990, e la versione successiva dell'anno 2000, integrata da immagini SPOT e prodotti cartografici locali (CTRN, ortofoto, ecc.), che hanno consentito la realizzazione di mappe d'uso del suolo, delle trasformazioni d'uso e l'analisi dell'espansione urbana a scala regionale per l'intero territorio europeo.

La realizzazione di mappe d'uso del suolo in ambito urbano risulta assai significativa per rappresentarne l'espansione, ma anche le forme di degrado, come aree abbandonate, edifici, discariche e cave abusivi soprattutto se è possibile utilizzare immagini multispettrali in grado di discriminare le diverse risposte spettrali degli oggetti, integrate ad immagini ad alta risoluzione spaziale e radiometrica e archivi di dati (tra loro confrontabili), per la costruzione di indagini multitemporali.

A scala urbana sono state realizzate alcune esperienze con sensori radar e tecnica interferometrica, a supporto del monitoraggio di edifici e infrastrutture degradate, poiché sono ottenibili misure molto accurate degli spostamenti e cedimenti delle strutture e infrastrutture.

#### ***Bande utilizzate:***

*Pancromatico:* i sensori ad alta risoluzione spaziale permettono, attraverso tecniche di fotointerpretazione di analizzare lo sviluppo della città e del territorio, soprattutto se confrontate ad altri dati delle stesse aree, come cartografie storiche o immagini fotogrammetriche.

*Visibile/infrarosso vicino:* è possibile fare un'analisi dei cambiamenti urbani basandosi sulle variazioni di alcuni indici come l'indice di brillantezza o indici vegetazionali. L'indice di brillantezza indica il "quantitativo di riflessione" di una superficie (per cui una superficie ad alta riflessione è indice di nuovo edificato e quindi dell'aumento dello sviluppo urbano). Gli indici vegetazionali -LAI, NDVI- servono per valutare le aree costruite, il mantenimento di polmoni verdi, il quantitativo di suolo permeabilizzato/impermeabilizzato di una città.

### ***Esempi di applicazioni***

- Classificazione uso del suolo
- Mappatura multi-temporale cambiamenti d'uso del suolo
- Analisi espansione urbana
- Analisi suoli e calcolo indice di impermeabilizzazione

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

*LANDSAT 5*: è utilizzato sia per analisi e costruzione di indici ottenuti dal confronto tra bande spettrali, sia per analisi multitemporali, essendo operativo (nelle diverse versioni di sensori comunque), dal 1972.

*SPOT 4/5*: utilizzato per la realizzazione di DTM e fotointerpretazione dell'espansione urbana (HRS)

*Satelliti commerciali ad alta risoluzione spaziale* (Ikonos, Eros...).

### ***7) Monitoraggio e stima catastrofi***

Le applicazioni di monitoraggio e stima catastrofi comprendono lo studio degli eventi a scala locale come gli incendi, le frane e gli smottamenti, alluvioni, terremoti, eruzioni vulcaniche, ecc. Le diverse tipologie di immagini da satellite possono essere un efficace supporto alla previsione del rischio, ma soprattutto al monitoraggio pre-evento, e alla stima dei danni, più difficile il loro utilizzo durante l'evento, per la non coincidenza tra manifestarsi dell'evento e passaggio delle piattaforme, tuttavia l'uso dei dati satellitari in ambito di protezione civile in caso di alluvioni, terremoti, frane, incendi è sempre più determinante. In questi casi la tempestività e freschezza dei dati possono diventare fattori determinanti. Diventa importante in questi casi un approccio multimissione che utilizzi tutte le risorse spaziali disponibili, siano essi satellitare o aeree, oppure la realizzazione di costellazioni di satelliti che ottimizzino il tempo di accesso ai dati di interesse (come ad esempio il programma COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana).

### ***Incendi***

Nel corso degli ultimi anni gli incendi boschivi hanno registrato un aumento nelle regioni mediterranee con un elevato costo in vite umane e proprietà.

Le cause naturali che favoriscono l'insorgere degli incendi sono principalmente i fulmini e la combustione spontanea della vegetazione secca, cui si somma la capacità di autosostentamento degli incendi associata alla loro crescita; oltre alle cause naturali è poi necessario considerare i numerosi incendi dolosi

registrati durante la stagione estiva. Anche i campi abbandonati dopo il raccolto possono essere fonte di rischio.

La prevenzione e l'allarme immediato sono gli unici mezzi per ridurre i danni provocati dagli incendi. L'utilizzo delle informazioni provenienti dai satelliti consente di identificare le zone a rischio, individuare gli incendi e avere in tempi brevi una visione generale della situazione su vaste aree del territorio, di monitorare le emergenze e, una volta domato l'incendio, di quantificare e georeferenziare i danni.

### *Alluvioni, frane e smottamenti*

Le piogge possono causare enormi danni alle città ai servizi di trasporto e alle attività produttive, prime tra tutte quelle agricole. In molti casi, a questi eventi è associata anche la perdita di vite umane. Uno dei principali problemi in queste situazioni di emergenza è ricostruire le dimensioni del fenomeno nella sua completa estensione geografica, e avere una previsione ragionevole degli sviluppi più probabili. Inoltre le condizioni meteorologiche in cui si sviluppano questi eventi sono spesso proibitive per i mezzi aerei convenzionali e nel caso in cui l'area geografica investita dal fenomeno fosse molto vasta l'utilizzo di piattaforme aviotrasportate comporterebbe comunque costi e tempi troppo elevati. Soprattutto il fattore tempo, in questi frangenti ha dimostrato di rappresentare un elemento chiave per evitare ad un fenomeno naturale di assumere le dimensioni di una catastrofe.

Altrettanto vitale è la rapida stima delle dimensioni del danno al cessare della fase dell'emergenza. Questa informazione rappresenta un dato essenziale sia per le Amministrazioni Pubbliche coinvolte che per le compagnie di assicurazione che garantiscono questo tipo di rischi. Le mappe dettagliate dell'evento rappresentano quindi un supporto alla fase di valutazione del rischio e un contributo a modelli idrogeologici utilizzati tra l'altro per la pianificazione di interventi strutturali di modifica dei corsi d'acqua .

### ***Bande utilizzate***

#### *Incendi*

Infrarosso medio. La radianza di un incendio boschivo è generalmente dipendente dalla sua temperatura che può essere molto differente in funzione del tipo di combustibile, dell'umidità e delle condizioni meteorologiche. In accordo con la legge di Wien, le sorgenti ad alta temperatura emettono a piccole lunghezze d'onda, tanto che i più adeguati strumenti per il rinvenimento di incendi boschivi (in cui la temperatura ha un range compreso tra gli 800 e i

1000 K) dallo spazio, sono dei sensori nell'infrarosso medio che operano nella finestra atmosferica da 3 a 5  $\mu\text{m}$ .

Questo è il caso del canale 3 dell'AVHRR (da 3.55  $\mu\text{m}$  a 3.93  $\mu\text{m}$ ) che è situato vicino al massimo dello spettro di emissione radiativa per gli oggetti che emettono alle tipiche temperature degli incendi boschivi.

### *Alluvioni, Frane e smottamenti*

I satelliti per telerilevamento attualmente in uso possono invece riprendere un'area investita da un'inondazione entro poche ore dall'evento. Gli strumenti SAR radar ad apertura sintetica permettono di osservare la superficie terrestre con alta risoluzione, con qualsiasi condizione meteorologica e di illuminazione solare. Confrontando due o più immagini della stessa area, riprese in momenti diversi, è possibile discriminare efficacemente un'area inondata. Al fine di rilevare l'estensione di un'area inondata, è possibile adottare due diversi tipi di approccio: il primo consiste nel confrontare due immagini SAR della stessa zona, riprese una prima ed una immediatamente dopo l'alluvione, ed evidenziando le zone invase dalle acque come aree in cui la risposta elettromagnetica è diminuita; un secondo approccio implica l'uso dell'informazione di coerenza dedotta da una coppia interferometrica, isolando zone di bassa coerenza che sottendono modifiche nelle caratteristiche elettromagnetiche della superficie, dovute eventualmente all'inondazione. È inoltre possibile fare uso di una combinazione delle due tecniche.

### *Esempi di applicazioni*

- Monitoraggio dei vulcani
- Monitoraggio di frane
- Monitoraggio di incendi a scala locale
- Stima dei danni da fenomeni alluvionali
- Stima dei danni da fenomeni di dissesto idro-geomorfologico
- Stima dei danni da tsunami e terremoti
- Stima dei danni dopo il fuoco

### *Satelliti e sensori più utilizzati*

#### *Incendi*

Diversi satelliti si sono rivelati utili a tali scopi. I dati di AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), sensore a bordo del satellite TIROS NOAA costituiscono un ottimo strumento in tal senso; questo satellite fornisce due riprese mattutine e due pomeridiane della stessa area (ciascuna scena copre

un'area di 3000 x 6000 Km), offrendo una visione costante della superficie terrestre. Utilizzando più di un migliaio di immagini nelle quali sono presenti incendi è stato sviluppato un algoritmo semiautomatico per l'individuazione degli incendi basato sulla sensibilità del Canale 3 (3.7 micron) di AVHRR alle temperature caratteristiche di un incendio (400-1000 K). Questo consente, grazie alle dimensioni delle immagini AVHRR, di rendere operativo un servizio di rivelazione degli incendi su scala continentale.

Un altro utile strumento è il TM (Thematic Mapper) a bordo del satellite *LANDSAT 5 MSS*: fornisce efficaci immagini a colori di un'area 180 x 180 Km con una risoluzione di 30 m che consentono di distinguere aree danneggiate e incendi in corso. Ambedue i satelliti ottici possono rivelare incendi e fumo.

### *Alluvioni, Frane e smottamenti*

*SPOT* e *LANDSAT TM*: delimitazione delle aree inondate. La principale difficoltà nell'individuazione di zone inondate con dati ottici da satellite quali *SPOT* e *LANDSAT*, risiede nella copertura nuvolosa nei periodi di cattivo tempo. Il radar ad apertura sintetica (SAR) del satellite ERS-1 ha giocato un ruolo importante in questo studio.

## **8) Monitoraggio Inquinamenti**

### *Discariche abusive*

Uno dei problemi ambientali maggiormente diffuso sul territorio è la presenza dei siti utilizzati come discariche abusive, si tratta molto spesso di cave dismesse, aree nelle vicinanze di discariche legali, aree difficili da raggiungere. Il telerilevamento, da satellite può essere utilizzato per la loro individuazione analisi fotointerpretative realizzate con sensori ad alta risoluzione spaziale o attraverso l'analisi delle bande nell'infrarosso termico: la temperatura viene utilizzata come indicatore di una modifica in atto dell'ambiente. La digestione della parte organica dei rifiuti, depositata in discarica e messa in condizioni di anaerobicità, per seppellimento con strati di terra, trasforma la frazione volatile in biogas: il processo è accompagnato dalla produzione di calore superiore al campo termico naturale dei terreni indisturbati [Fiumi].

### *Inquinamento aree costiere*

L'inquinamento derivante dagli scarichi industriali e da sorgenti domestiche, sta interessando seriamente l'ambiente litoraneo. L'introduzione di materiali tossici, insieme a sostanze inquinanti organiche contenute negli scarichi domestici, sta compromettendo la vita marina litoranea a causa della sempre maggiore

penuria di ossigeno disciolto nel mare. Gran parte degli scarichi che si riversano in mare non sono trattati.

Di impatto ancora maggiore, in mare aperto, è la pratica delle petroliere di scaricare gli eccessi di petrolio e ripuliscono le stive.

La conseguenza di queste attività industriali è che durante i mesi estivi, l'eccesso di nutrienti determina un deficit di ossigeno sul fondo che innesca fenomeni di decomposizione di sostanze organiche con produzione di composti tossici. A causa di ciò sotto costa il fitoplancton aumenta durante la primavera e subisce una progressiva diminuzione fino ai mesi invernali. In acque aperte, gli effetti antropici hanno meno influenza, per cui si osserva un aumento durante i mesi estivi seguito da un calo in autunno con un secondo rialzo in inverno dovuto alla presenza di correnti provenienti dal mare aperto.

### ***Esempi di applicazioni***

- Avvistamento e localizzazione di scarichi abusivi di idrocarburi
- Valutazione di versamenti accidentali in acque
- Individuazione delle sorgenti termiche artificiali
- Monitoraggio delle isole di calore in ambito urbano
- Monitoraggio di inquinamenti chimici
- Individuazione discariche abusive
- Monitoraggio di inquinamento di tipo termico

### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

#### *Discariche abusive*

*IKONOS* e altri satelliti commerciali ad alta risoluzione per la fotointerpretazione delle aree (forma, dimensione, struttura).

*Landsat 7-ETM +*, è il sensori con la banda termica a più elevata risoluzione spaziale (60 metri), e quindi di fatto l'unica utilizzabile a scala provinciale/regionale.

#### *Inquinamento aree costiere*

*IKONOS* e altri satelliti commerciali ad alta risoluzione per la fotointerpretazione delle aree

*ERS 2* e *ENVISAT -SAR* Radar ad Apertura Sintetica: lungo la costa è possibile utilizzare il radar per individuare le perdite di petrolio e gli scarichi a mare abusivi.

### **9) Fotogrammetria: realizzazione cartografia e modelli digitali del terreno**

Ai tradizionali sistemi di ripresa fotogrammetrici, nel corso degli ultimi anni si sono aggiunti ulteriori strumenti per la produzione cartografica, l'aggiornamento della stessa e la costruzione di modelli digitali del terreno. I sensori su satellite, ancor più delle camere fotogrammetriche digitali, hanno parzialmente sostituito l'uso di prodotti fotogrammetrici, soprattutto per finalità di aggiornamento speditivi di cartografie esistenti. Il valore aggiunto dei sistemi satellitari va ricercato soprattutto nella notevole risoluzione spaziale e radiometrica raggiunta dagli sistemi di osservazione della terra commerciali, come IKONOS, ORBVIEW, QUICKBIRD, ma anche nella possibile realizzazione di stereocoppie da satellite (SPOT), che sfruttano i sistemi di presa (nadir e off-nadir) e le orbite seguite dai satelliti. Da stereocoppie si possono ottenere informazioni sulla terza dimensione, analogamente alla fotogrammetria tradizionale e quindi costruire modelli tridimensionali del terreno. Tali modelli, si possono ottenere anche sfruttando i sensori radar attivi come quelli ad apertura sintetica a bordo di ERS 2 e ENVISAT.

#### ***Bande utilizzate***

Visibile (pancromatico): per fotointerpretazione, integrazione con visibile in RGB e spesso in infrarosso vicino per integrazioni con informazioni spettrali degli elementi da acquisire.

*Microonde (radar attivo):* per la costruzione di modelli digitali del terreno.

#### ***Esempi di applicazioni***

- Creazione di modelli digitali del terreno (DTM/DSM)
- Realizzazione di aggiornamenti cartografici
- Realizzazione di cartografia a scala locale

#### ***Satelliti e sensori più utilizzati***

IKONOS e altri satelliti commerciali ad alta risoluzione spaziale.

SPOT 4-5, JERS, stereocoppie realizzate o con due passaggi successivi o con sensori posizionati off-nadir che consentono di riprendere la stessa scena da due angoli di vista diversi (oltre il nadir).

ERS1- 2 con le immagini radar SAR, attraverso la misura dello sfasamento tra l'onda dell'eco e l'onda trasmessa è possibile ricavare modelli digitali del terreno.

### 2.7.3 Matrice sensori/applicazioni

#### Applicazioni a scala locale

applicazione	Alta e Medio alta risoluzione				Media risoluzione				Bassa e bassissima risoluzione				Regioni
	Satellite	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Vegetazione naturale	IKONOS-OSA QUICKBIRD ORBVIEW-3 EROS A1				LANDSAT 5 TM				NOAA-AVHRR-3 TERRA MODIS SPOT-5 Vegetation ENVISAT AATSR				Ultravioletto
					ENVISAT ASAR ERS 2 AMI SAR								Visibile
Vegetazione coltivata	IKONOS-OSA QUICKBIRD ORBVIEW-3 EROS A1				LANDSAT 5 TM				NOAA-AVHRR-3 TERRA MODIS SPOT-5 Vegetation				Infrarosso
					ENVISAT ASAR ERS 2 AMI SAR								microonde
Pianificazione/Usò del suolo	IKONOS-OSA QUICKBIRD ORBVIEW-3 EROS A1				LANDSAT 5 TM EO-1 HYPERION SPOT- HRS				TERRA MODIS				Ultravioletto
													Visibile
Catastrofi	IKONOS-OSA QUICKBIRD ORBVIEW-3 EROS A1								NOAA-AVHRR-3 TERRA MODIS				Infrarosso
					ENVISAT ASAR ERS 2 AMI SAR								Microonde
Inquinamento													Ultravioletto
					RADARSAT SAR ERS 2 AMI SAR								Visibile
Cartografia	IKONOS-OSA QUICKBIRD ORBVIEW-3 EROS A1												Infrarosso
													Microonde

La matrice opera una semplificazione della tabella a sinistra [Gomasca].

Alta risoluzione= 0,1 cm- 4 m

Medio- alta risoluzione= 4 m- 12 m

Media risoluzione= 13-50 m

Bassa risoluzione= 51- 250 m

Bassissima risoluzione= > 251

Classi di risoluzione	Risoluzione in metri	Definizione di risoluzione	semplificazione
1	0,1-0,5	Altissima	Alta
2	0,5- 1	Molto alta	
3	1-4	Alta	
4	4-12	Media	Medio- alta
5	12-50	Medio- bassa	Media
6	50-250	Bassa	Bassa
7	250-1000	Molto bassa	
8	> 1000	Bassissima	Bassissima

## **Bibliografia**

### ***Sensori e materiali di riallineamento***

J. Fraden, *Handbook of Modern sensors*, Physics, Designs, and Applications, American Institute of Physics, Woodbury, New York 1999

J. R. Taylor, *Introduzione all'Analisi degli Errori- Lo studio delle incertezze nelle misure fisiche*. Zanichelli, Bologna 1999

M. Rasetti, *Fisica generale I*, materiali didattici e slides del videocorso Nettuno ([www.uninettuno.it](http://www.uninettuno.it))

F. Ferraris, C. Offelli, A. Taroni, *Strumentazione Elettronica di Misura*, materiali didattici e slides del videocorso Nettuno ([www.uninettuno.it](http://www.uninettuno.it))

### ***Telerilevamento passivo***

P. M. Mather, *Computer Processing of Remotely- Sensed Images- Third Edition*, John Wiley & Sons, Chichester 2004

Dermanis, L. Biagi *Telerilevamento. Informazione territoriale mediante immagini da satellite*, Casa editrice ambrosiana, Milano 2002

M. Gomasasca, *Elementi di Geomatica*, AIT Associazione Italiana di Telerilevamento, 2004

B.K.C. Tso and P.M. Mather, *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. London: Taylor & Francis Ltd. 2001

P.A. Brivio, G.M. Lechi, E. Zilioli, *Il telerilevamento da aereo e da satellite*. Carlo Delfino Editore, 1992

### ***Telerilevamento attivo***

C. Oliver, S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, Artech House, Norwood, 1998

### ***Applicazioni***

A. Skidmore, H. Prins, *Environmental Modelling with Gis and Remote Sensing*, Taylor and Francis, 2002

## **Sitografia**

### ***Tutorial***

ESA

<http://www.eduspace.esa.int/eduspace/main.asp?ulang=itEduspace>

Canada Centre for Remote Sensing

[http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/index\\_e.php#tutor](http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/index_e.php#tutor)

Planetek

<http://www.planetek.it/corsotlr/>

Politecnico di Milano- Laboratorio di Geomatica

<http://geomatica.como.polimi.it/corsi/fotogrammetria/>

Università di Pisa- Dipartimento di Scienze della Terra

[http://www.dst.unipi.it/scienze\\_geologiche/telerilevamento/](http://www.dst.unipi.it/scienze_geologiche/telerilevamento/)

### **Data base**

ITC's (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation)  
database of satellites and sensors

<http://www.itc.nl/research/products/sensordb/searchsat.aspx>

CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) Data Base

<http://alto-stratus.wmo.ch/sat/stations/SatSystem.html>,

### **Glossari:**

ESA

<http://envisat.esa.int/helpandmail/glossary.html>

IREA- CNR, Milano

<http://milano.irea.cnr.it/3gloss/glossario.htm>

Glossario TLR Italiano/Inglese/tedesco

<http://dude.uibk.ac.at/Publications/zachl.html#Indice%20Italiano-Inglese>

Planetek

<http://www.planetek.it/corsotlr/>

Canada Centre for Remote Sensing

[http://ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index\\_e.php](http://ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_e.php)

Centre national d'études spatiales (CNES)

[http://www.cnes.fr/html/\\_109\\_.php](http://www.cnes.fr/html/_109_.php)

Association for Geographic Information (AGI)

[http://www.agi.org.uk/bfora/systems/xmlviewer/default.asp?arg=DS\\_AGI\\_TRA](http://www.agi.org.uk/bfora/systems/xmlviewer/default.asp?arg=DS_AGI_TRA)

[INART\\_67/\\_firsttitle.xml/87](http://www.agi.org.uk/bfora/systems/xmlviewer/default.asp?arg=DS_AGI_TRA_INART_67/_firsttitle.xml/87)

### **Thesaurus**

<http://uta.iaa.cnr.it/earth.htm>

### **Portali per la ricerca e l'acquisto di immagini e prodotti**

NASA Earth Science Data Sources and Archives

[http://www-v0ims.gsfc.nasa.gov/v0ims/RELSITES/other\\_source.html](http://www-v0ims.gsfc.nasa.gov/v0ims/RELSITES/other_source.html)

U.S. Geological Survey USGS EarthExplorer

<http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

EOLI Web client dell'Agenzia Spaziale Europea

<http://eoli.esa.int/servlets/template/welcome/entryPage.vm>

***Altri siti interessanti***

Missioni della NASA

<http://www.nasa.gov/missions/current/index.html>

Sensori iperspettrali

<http://www.eoc.csiro.au/hswww/Overview.htm>