

Telerilevamento

Attraverso il corso sarete in grado di comprendere come il **telerilevamento** può essere utilizzato per lo studio del nostro pianeta. Non solo vedrete quale utilizzo è stato fatto in passato delle foto aeree e delle **immagini** dallo spazio come registrazioni della geografia della Terra, ma anche i futuri programmi per la realizzazione di sistemi di monitoraggio avanzati. Inoltre svilupperete esperienza nell'interpretazione di questi dati sia attraverso interpretazione visiva delle immagini sia attraverso elaborazioni al computer.

Nel **telerilevamento** viene fatto uso di strumenti o **sensori** in grado di "catturare" le relazioni spaziali e spettrali di oggetti ed elementi osservabili a distanza, tipicamente dall'alto. In genere siamo abituati a guardare il nostro pianeta da un punto di vista più o meno orizzontale vivendo sulla sua superficie. In queste condizioni ovviamente la nostra vista è limitata a piccole aree anche a causa di ostacoli come edifici, alberi e rilievi topografici. Il nostro campo di vista è largamente ampliato se guardiamo dall'alto di un edificio elevato o dalla cima di una montagna e cresce ulteriormente se guardiamo da un aereo che viaggia alla quota di 10.000 metri. Da una prospettiva verticale o alta obliqua, la superficie al di sotto ci appare notevolmente differente rispetto a quando la guardiamo dalla superficie stessa. In questo modo vediamo l'insieme degli elementi della superficie come apparirebbero su una mappa tematica nelle loro relazioni spaziali.

Per dirla in breve, questo è il motivo per il quale il **telerilevamento** utilizza più spesso **piattaforme** come quelle aeree e satellitari con sensori a bordo in grado di rilevare e analizzare aree estese. E' questa la maniera pratica, sistematica ed economica di mantenere ed aggiornare le informazioni sul mondo che ci circonda.

Anzichè fornire un corso formale sull'argomento con capitoli sui principi, le tecniche e le applicazioni in maniera pedagogica e sistematica, intendiamo condurvi semplicemente attraverso una serie di sezioni ognuna delle quali focalizza una o più tematiche.

Poichè la maggior parte dei dati telerilevati possono essere visualizzati, procederemo fornendo illustrazioni come immagini spaziali, classificazioni, mappe e grafici piuttosto che dati numerici, sebbene questi ultimi siano la fondamentale conoscenza di base per coloro che devono trasferire queste informazioni nelle proprie applicazioni scientifiche. (Molto materiale è stato direttamente prelevato dalla rete Internet; siamo grati verso tutte le organizzazioni e i privati che non possiamo citare per evitare l'interruzione del testo). Le illustrazioni saranno accompagnate da descrizioni e discussioni che aiutino l'interpretazione di ciò che esse rappresentano.

N.B. Per visualizzare correttamente il corso occorre predisporre un monitor a 17 pollici risoluzione video 800 x 600 ed almeno 256 colori.

Ci sono poi anche numerosi links ad altre sorgenti di informazioni sul telerilevamento e a vari programmi in svolgimento o pianificati. Questi a loro volta possiedono altri links che vi permetteranno di allargare le vostre conoscenze sui vari temi del telerilevamento e delle sue applicazioni più popolari.

Le immagini possono variare in qualità - nei toni, bilanciamento dei colori e risoluzione - in base alla vostra scheda grafica e ad altri fattori combinati. Ciò che è scritto nel testo quindi potrebbe non essere reso a pieno dallo schermo.

Breve storia del telerilevamento

Il telerilevamento si può dire che ha inizio nel 1840 quando le mongolfiere acquisirono le prime immagini del territorio con la macchina fotografica appena inventata. Probabilmente alla fine dell'ultimo secolo la piattaforma più nuova era la rinomata flotta di piccioni che operava come novità in Europa.



La fotografia aerea diventò uno strumento riconosciuto durante la Prima Guerra Mondiale e lo fu a pieno durante la Seconda. L'entrata ufficiale dei sensori nello spazio cominciò con l'inclusione di una macchina fotografica automatica a bordo dei missili tedeschi V-2 lanciati dalle White Sands, NM. L'avvento dello Sputnik nel 1957 rese possibile il montaggio di macchine da ripresa su navicelle in orbita. I primi cosmonauti e astronauti documentavano con riprese dallo spazio la circumnavigazione del globo. I sensori che acquisivano immagini in Bianco e Nero sulla Terra vennero montati su satelliti meteorologici a partire dal 1960. Altri sensori sugli stessi satelliti potevano poi eseguire sondaggi o misure atmosferiche su una catena di rilievi.

Il telerilevamento raggiunse una successiva maturità, con sistemi operativi per l'acquisizione di immagini sulla Terra con una certa periodicità, nel 1970 con strumenti a bordo dello Skylab (e più tardi dello Space Shuttle) e su Landsat, il primo satellite espressamente dedicato al monitoraggio di terre e oceani allo scopo di mappare risorse culturali e naturali. Un sistema radar per l'acquisizione di immagini è stato il primo sensore a bordo di Seasat e negli anni '80 una varietà di sensori specializzati, CZCS, HCMM, e AVHRR tra questi, vennero messi in orbita come progetti di ricerca o fattibilità.

Il primo sistema radar non-militare fu lo Shuttle Imaging Radar (SIR-A) montato dal JPL a bordo dello Space Shuttle nel 1982. Altre nazioni realizzarono poi altri sensori simili o con distinte capacità. A partire dal 1980 il Landsat è stato privatizzato ed in diverse nazioni, tra cui Francia, Stati Uniti, Russia e Giappone, ha avuto inizio un utilizzo più vasto e commerciale del telerilevamento.

Per stimolare la vostra curiosità vi mostreremo ora una delle prime immagini Landsat che scaturì il forte interesse nell'utilizzo dei satelliti per il monitoraggio della Terra. La scena qui sotto viene dal Landsat 1 e raffigura il centro Nord dello Utah ripreso 15 giorni dopo il lancio (7 Agosto 1972).

Il lato destro dell' immagine è in rosso brillante - il colore tipico di foreste fitte e terreni erbosi in una composizione in falsi colori in cui al rosso viene associata la vegetazione sana che riflette molto nel vicino infrarosso (guarda le sezioni successive per comprendere l'assegnazione dei colori in base alle risposte). L'area rossa sulla destra coincide con le alte montagne del Wasatch che si ergono ad Est dei deserti (nei toni di grigio) dello Utah occidentale.



Altre piccole chiazze rosse indicano le terre agricole delle pianure del deserto. Il *Grande Lago Salato* occupa parte della scena in alto (guardando attentamente potrete vedere una leggera differenza di tono lungo un bordo dritto e netto; ciò è dovuto ad

un'interruzione di circolazione dell'acqua dalle rete ferroviaria dell'Unione Pacifica). Il Lago Utah (più blu a causa del silt) si trova a sud di questo. L'area metropolitana della città di Salt Lake si distingue nell'immagine (vi sfidiamo a trovarla). Questa immagine ovviamente è una ripresa verticale.

Per rendervi familiare questo tipo di vista sulla Terra, vi aggiungiamo una veduta quasi orizzontale della città e del Fronte Wasatch ad Est: provate a mettere in relazione questa prospettiva obliqua con il suo aspetto ripreso dal Landsat.



Elenchiamo qui i principali satelliti messi in orbita da diverse nazioni (specificate tra parentesi) insieme alle date in cui il primo (e alcune volte l'unico) venne lanciato.

Gruppo 1 - **Osservazione della terra** : Landsat (1-6) (1973); Seasat (1978); HCMM (1978); SPOT (Francia) (1-3) (1986); RESURS (Russia) (1985); IRS (1A-1D) (India) (1986); ERS (1-2) (1991); JERS (1-2) (Giappone) (1992); Radarsat (Canada) (1995); ADEOS (Giappone) (1996) (Note: SIR-A (1981), SIR-B (1984), e SIR-C (1994) sono sistemi radar a bordo dello Space Shuttles).

Gruppo 2 - **Osservazione Meteo**: TIROS (1-9) (1960); Nimbus (1-7) (1964); ESSA (1-9) (1966); ATS(g) (1-3) (1966); DMSP serie I (1966); la serie Russa Kosmos (1968) e Meteor (1969); serie ITOS (1970); SMS(g) (1975); serie GOES(g) (1975); NOAA (1-5) (1976); serie DMSP 2 (1976); serie GMS (Giappone) 9 (1977); serie Meteosat(g) (Europa) (1978); serie TIROS-N (1978); Bhaskara (India) (1979); NOAA (6-14) (1982); Insat (1983); ERBS (1984); MOS (Giappone) (1987); UARS (1991); TRMM (U.S./Giappone) (1997) (Nota 1: g = geostazionario).

Gruppo 3 -Di maggiore utilizzo in **Oceanografia**: Seasat (1978); Nimbus 7 (1978) incluso il CZCS, Coastal Zone Color Scanner che misura la concentrazione di clorofilla in acque marine; Topex-Poseidon (1992); SeaWiFS (1997).

Questa lunga lista ci convince del fatto che il Telerilevamento è diventato uno strumento scientifico e tecnologico fondamentale utilizzato per monitorare le superfici del pianeta e atmosferiche. Infatti considerate che le spese sostenute per

l'osservazione della Terra e di altri pianeti dai primi programmi spaziali ha superato i 150 miliardi di dollari. La maggior parte di questo denaro è stato utilizzato nelle applicazioni pratiche imperniate sulla gestione delle risorse naturali e ambientali. Questa tabella in basso riassume i principali utilizzi in 6 discipline.

Agriculture, Forestry and Range Resources	Land Use and Mapping	Geology	Water Resources	Oceanography and Marine Resources	Environment
Discrimination of vegetative types: Crop types Timber types Range vegetation	Classification land uses Cartographic mapping and map updating	Recognition of rock types Mapping of major geologic units	Determination of water boundaries and surface water area and volume Mapping of floods and flood plains	Detection of living marine organisms Determination of turbidity patterns and circulation	Monitoring surface mining and reclamation Mapping and monitoring of water pollution
Measurement of crop acreage by species Measurement of timber acreage and volume by species	Categorization of land capability Separation of urban and rural categories	Revising geologic maps Delineation of unconsolidated rock and soils	Determination of areal extent of snow and snow boundaries Measurement of glacial features	Mapping shoreline changes Mapping of shoals and shallow areas	Detection of air pollution and its effects Determination of effects of natural disasters
Determination of range readiness and biomass Determination of vegetation vigor	Regional planning Mapping of transportation networks	Mapping igneous intrusions Mapping recent volcanic surface deposits	Measurement of sediment and turbidity patterns Determination of water depth	Mapping of ice for shipping Study of eddies and waves	Monitoring environmental effects of man's activities (lake eutrophication, defoliation, etc.)
Determination of soil stress Determination of soil conditions Determination of soil associations	Mapping of land-water boundaries Mapping of (fractures)	Search for surface guides to mineralization Determination of regional structures	Delineation of irrigated fields Inventory of lakes		
Assessment of grass and forest fire damage		Mapping linears			

La letteratura sulla teoria del telerilevamento, gli strumenti e le applicazioni è attualmente vasta, comprese riviste e atti di numerose conferenze e meetings. I grandi progressi nell'elaborazione di immagini al computer, e specie adesso la capacità dei personal computers di elaborare e gestire grosse quantità di dati, hanno reso possibile l'accesso di queste osservazioni satellitari alle università, agenzie gestionali, piccole compagnie di carattere ambientale, e anche privati.

Lo sviluppo concorrente e la crescita dei Sistemi Informativi Geografici ha fornito un significativo aiuto all'integrazione dei dati telerilevati con altri tipi di dati spaziali. L'approccio GIS è adatto alla raccolta, integrazione ed analisi di informazioni che hanno valore pratico in molti settori di supporto alle decisioni nella gestione risorse, e nel controllo ambientale.

La necessità di sviluppare sistemi di monitoraggio per l'osservazione dei cambiamenti nell'uso del suolo, la ricerca e la protezione delle risorse naturali e di tracciare le interazioni tra biosfera, atmosfera, idrosfera e geosfera sono diventate di prioritaria importanza per i manager, politici e le popolazioni nelle nazioni sviluppate e in via di sviluppo.

Principi di base

La maggior parte dei testi di telerilevamento incominciano introducendo il lettore ai principi basilari necessari alla costruzione del background teorico (principalmente relativi alla fisica della radiazione). E' essenziale possedere queste conoscenze qualora si intendano approfondire molti aspetti del telerilevamento, ma in questo corso introduttivo non entreremo nei dettagli di queste tematiche che potranno essere studiate su testi specifici. Offriremo, piuttosto, un quadro generale dei concetti fondamentali dell'elettromagnetismo.

Cos'è il telerilevamento



Hai certamente già sentito parlare di telerilevamento. Ma cosa significa? E' un'espressione di fantasia associata ad un concetto piuttosto semplice e senza dubbio anche familiare. Ogni qualvolta osservi lo schermo del tuo computer sei a tutti gli effetti coinvolto in un'operazione di telerilevamento.

Qualcosa di fisico (la luce) viene emesso da quello schermo (una sorgente di radiazioni) e attraversa lo spazio (quindi è in qualche modo "a distanza") fino a quando non incontra ed è catturato da un sensore (i tuoi occhi) che invia un segnale ad un processore (il tuo cervello). Gli organi di senso dell'uomo prendono coscienza del mondo esterno quasi

esclusivamente attraverso la ricezione di una grande varietà di segnali emessi o riflessi, attivamente o passivamente, da oggetti che trasmettono informazioni sotto forma di onde o impulsi. Si percepiscono dunque come suoni quelle perturbazioni dell'atmosfera che si propagano con moto ondoso, si sperimentano sensazioni quali il calore (sia attraverso il contatto diretto che a mezzo di energia irradiata), si reagisce ai segnali chimici provenienti dal cibo con il gusto e l'olfatto, si è consapevoli delle proprietà di certi materiali quale la ruvidezza grazie al tatto, e si è in grado di riconoscere forme, colori, posizioni relative di oggetti esterni e tipologie di materiali attraverso il campionamento della luce visibile che da essi proviene. Tutte le sensazioni incluse nella lista precedente che non sono indotte da contatto diretto sono frutto di un rilevamento a distanza (telerilevamento).

In pratica però non pensiamo ai nostri sensi corporei come a sensori a distanza nella loro rigorosa definizione tecnica. Tale definizione formale e completa del telerilevamento è riportata di seguito:

L'acquisizione e la misura di dati/informazioni relativi a proprietà di un fenomeno, oggetto, o materia attraverso uno strumento di registrazione non in stretto contatto fisico con l'oggetto di analisi; la tecnica comprende la maturazione di conoscenze sui diversi ambienti attraverso la misura di campi di forza, di radiazione elettromagnetica, o di energia acustica utilizzando macchine fotografiche, sistemi laser, ricevitori a radio frequenza, sistemi radar, sonar, dispositivi termici, sismografi, magnetometri, gravimetri, scintillatori e altri strumenti.

Si tratta di una definizione piuttosto lunga e generale. Probabilmente una definizione più semplice sarebbe: il telerilevamento è una tecnologia basata sul campionamento della radiazione e dei campi di forza volta ad acquisire ed interpretare *dati geospaziali* per derivare informazioni su attributi, natura degli oggetti e tipologie presenti sulla superficie terrestre, negli oceani e nell'atmosfera (e, quando possibile, sulla superficie di altri pianeti).

O ancora si potrebbe dire: il telerilevamento implica la rivelazione e la misura di fotoni di diverse energie provenienti da materiali situati a distanza dal rivelatore, giungendo in tal modo ad identificarli e categorizzarli per tipologia, composizione e distribuzione spaziale.

Tutte queste definizioni sono valide e, considerate nell'insieme, dovrebbero fornire un'idea ragionevole del significato e dell'utilizzo del termine "telerilevamento".

I principi della radiazione elettromagnetica

L'unità fondamentale utilizzata nei fenomeni elettromagnetici è il *fotone* (un tipo di "quanto", come definito nella teoria quantistica). Si tratta della particella subatomica che corrisponde alla radiazione emessa dalla materia eccitata termicamente, o da processi nucleari (fusione, fissione), o da altra radiazione. I fotoni, privi di massa, si muovono alla velocità della luce: 300,000 km/sec. Queste particelle hanno una natura "duale" per cui sono anche caratterizzate da una propagazione ondosa. Tali onde sono rappresentabili analiticamente attraverso funzioni trigonometriche, come illustrato nella figura sottostante.

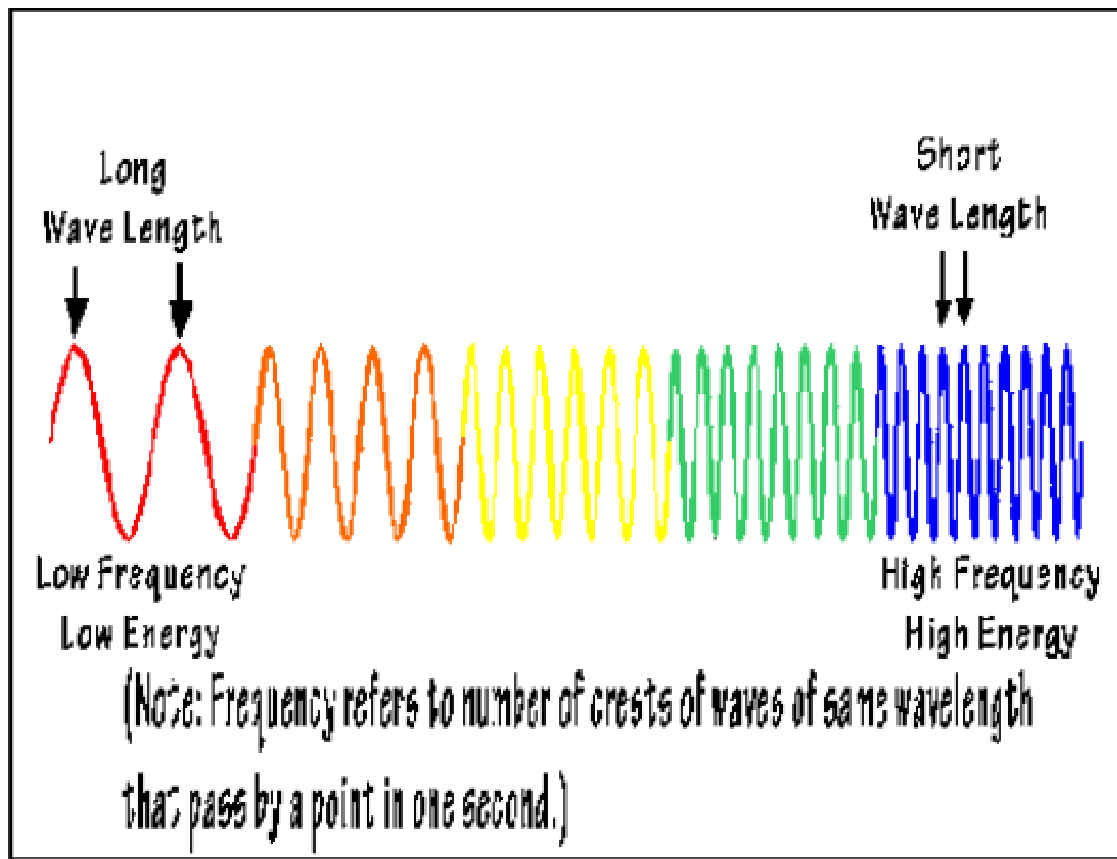


Diagram of sine waves at different frequencies.

La distanza fra punti equivalenti (corrispondenti a stesse ampiezze dell'onda) su un treno d'onda è la lunghezza d'onda. Il numero di punti equivalenti che attraversano una posizione di riferimento in un secondo è indicato dalla frequenza dell'onda (espressa in cicli/sec o hertz). Un fotone è caratterizzato da una certa quantità di energia determinabile (in erg) dalla equazione generale di Planck:

$$E = h\nu$$

dove h è la costante di Planck ($6.6260... \times 10^{-34}$ Joule-sec)* e ν indica la frequenza. I fotoni di frequenza più alta sono dunque più energetici. Se un materiale eccitato sperimenta un passaggio da un livello energetico più alto E_2 ad un livello inferiore E_1 , la formula precedente diventa:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

laddove il valore di ν è dato da $(\nu_2 - \nu_1)$; in altri termini, una particolare transizione energetica è caratterizzata dall'emissione di radiazione (fotoni) con una precisa frequenza e una corrispondente lunghezza d'onda λ .

La lunghezza d'onda è l'inverso della frequenza (frequenze più alte sono associate a lunghezze d'onda più piccole e viceversa), secondo la relazione:

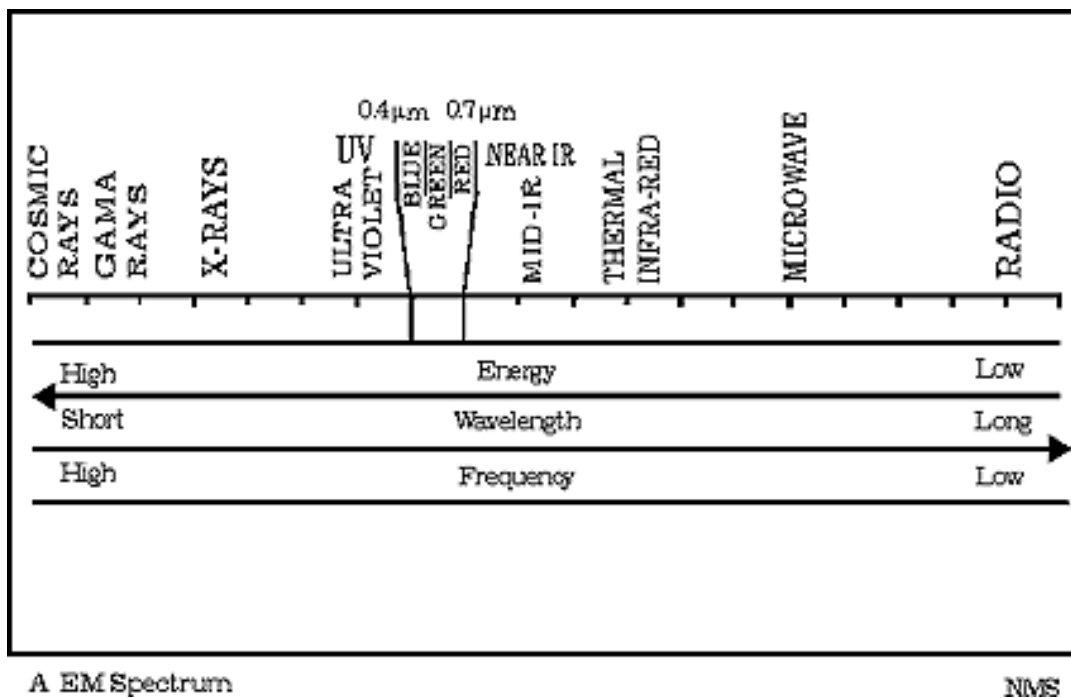
$$c = \lambda\nu \text{ (trasposable to } \nu = c/\lambda)$$

dove c è la costante che indica la velocità della luce, così che l'equazione di Planck può essere riscritta come $E = hc/\lambda$.

* I numeri 10^{-34} (incredibilmente piccolo) o 10^{12} (migliaia di miliardi, estremamente grande) sono in una notazione specifica che consente di esprimere numeri molto grandi o molto piccoli evitando di riportare tutte le cifre. Consente di semplificare un numero scomponendolo in due parti: la prima esprime il valore del numero come quantità reale compresa fra .9999... e 10; la seconda parte indica il numero di posti di cui spostare il punto decimale verso destra o verso sinistra. Si moltiplica la prima parte del numero per la potenza di dieci riportata nella seconda parte del numero per ottenere il suo valore. Si consideri la seconda parte del numero, del tipo 10^n , dove n può essere un intero negativo o positivo. Un n positivo indica il numero di zeri che seguono il numero 10, quindi, per $n=3$, il valore di 10^3 è 1 seguito da tre zeri, o 1.000 (dieci al cubo); 10^6 è 1.000.000, ovvero 1 seguito da sei zeri alla sua destra (Nota: $10^0 = 1$). E così 10^{60} indica 1.000.000.000.000.000... fino a 60 zeri. Analogamente, 10^{-3} (con $n = -3$) corrisponde a 0,001, equivalente alla frazione $1/1000$, in cui ci sono due zeri (tre posti) prima del punto decimale; 10^{-6} è 0,000001. Qualsiasi numero può essere rappresentato come il prodotto della sua espressione decimale (compresa fra .9999... e 10) e l'appropriata potenza di 10 (10^n). Quindi, 8.345 si riscrive $8,345 \times 10^3$; 0,00469 è dato da 4.69×10^{-3} .

Lo spettro elettromagnetico

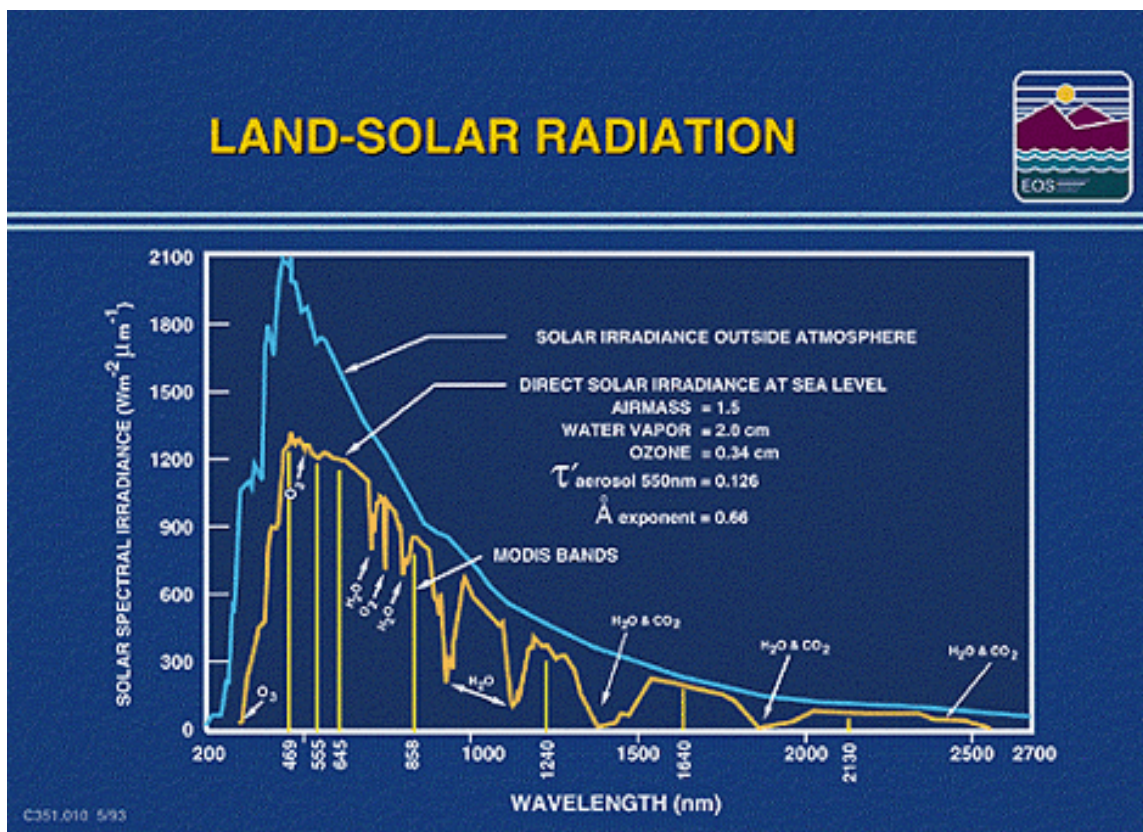
La distribuzione delle energie di radiazione può essere rappresentata sia in funzione della lunghezza d'onda che della frequenza in un grafico noto come spettro elettromagnetico (EM)



Lo spettro EM è stato arbitrariamente suddiviso in regioni o intervalli cui sono stati attribuiti nomi descrittivi. All'estremo più energetico (alte frequenze, piccole lunghezze d'onda) ci sono i raggi gamma e i raggi x (le cui lunghezze d'onda sono usualmente misurate in angstroms [Å], ovvero in unità di 10^{-8} cm). La radiazione ultravioletta si estende da circa 300 Å a circa 4000 Å. Per le regioni centrali dello spettro è opportuno utilizzare una fra le due seguenti unità di misura: micron (μm), ovvero multipli di 10^{-6} m o nanometri (nm), di base 10^{-9} m. La regione visibile occupa l'intervallo fra 0.4 e 0.7 μm , o quello equivalente da 4000 a 7000 Å o ancora da 400 a 700 nm. La regione infrarossa, compresa fra 0.7 e 100 μm , ha quattro sottointervalli di particolare interesse: (1) l'IR riflesso (0.7 - 3.0 μm) e (2) l'IR fotografico (0.7 - 0.9 μm), ovvero il range di sensibilità delle pellicole; (3) e (4) le bande termiche a (3 - 5 μm) e (8 - 14 μm). Per gli intervalli di lunghezze d'onda maggiori si passa dai mm ai cm ai metri. La regione delle microonde va da 0.1 a 100 cm; include i range di frequenze di tutti i sistemi radar costruiti dall'uomo che producono la radiazione a microonde che "illumina" gli oggetti e viene da questi riflessa. La regione di lunghezze d'onda maggiori (frequenze più basse) oltre i 100 cm corrisponde alle bande radio.

La propagazione dell'energia

La principale sorgente di eccitazione energetica utilizzata per illuminare i bersagli naturali è la radiazione solare. Il suo spettro è determinato dalla temperatura della fotosfera solare (caratterizzata da un picco in prossimità di 5600 °C). La radiazione solare incidente è prevalentemente concentrata nell'intervallo di lunghezze d'onda fra 200 e 3400 nm (0.2 e 3.4 μm), con un massimo di potenza a circa 480 nm (0.48 μm) (nel verde). Quando la radiazione solare attraversa l'atmosfera terrestre una frazione dell'energia irraggiata viene assorbita o riflessa, e il resto è trasmesso.



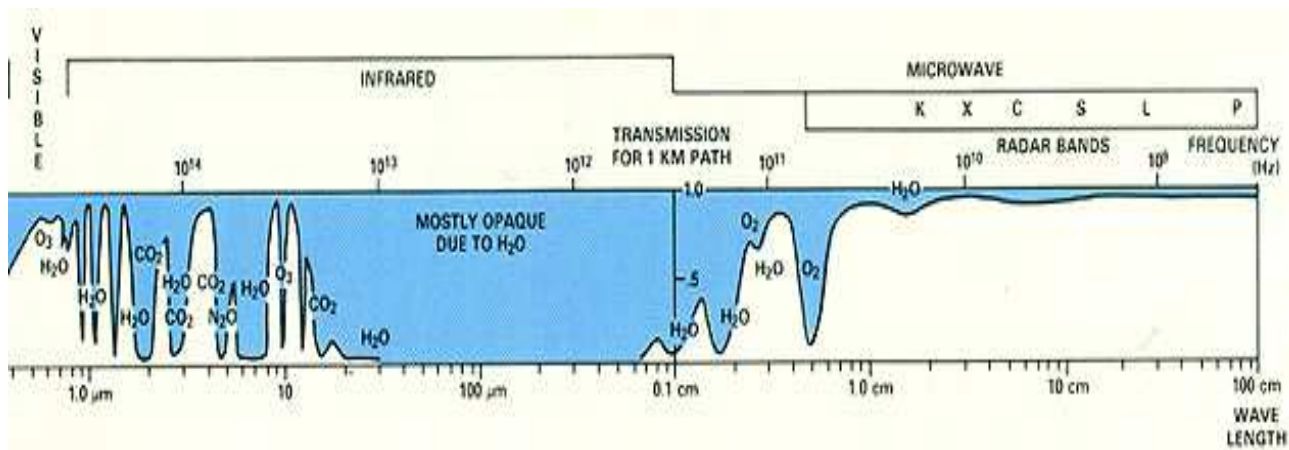
La radiazione incidente (tecnicamente, radianza sulla superficie terrestre o oceanica è caratterizzata da tre diversi modi di propagazione successiva:

- (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; in seguito potrà 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 è effettivamente riflessa (e diffusa) dal bersaglio a diversi angoli (in funzione della "rugosità" della superficie e dell'orientazione relativa della direzione di incidenza della radiazione solare rispetto all'inclinazione della superficie), inclusa la direzione del sensore che effettua

l'osservazione. Un gran numero di sistemi di telerilevamento sono designati alla misura della radiazione riflessa.

Interazione energia - atmosfera

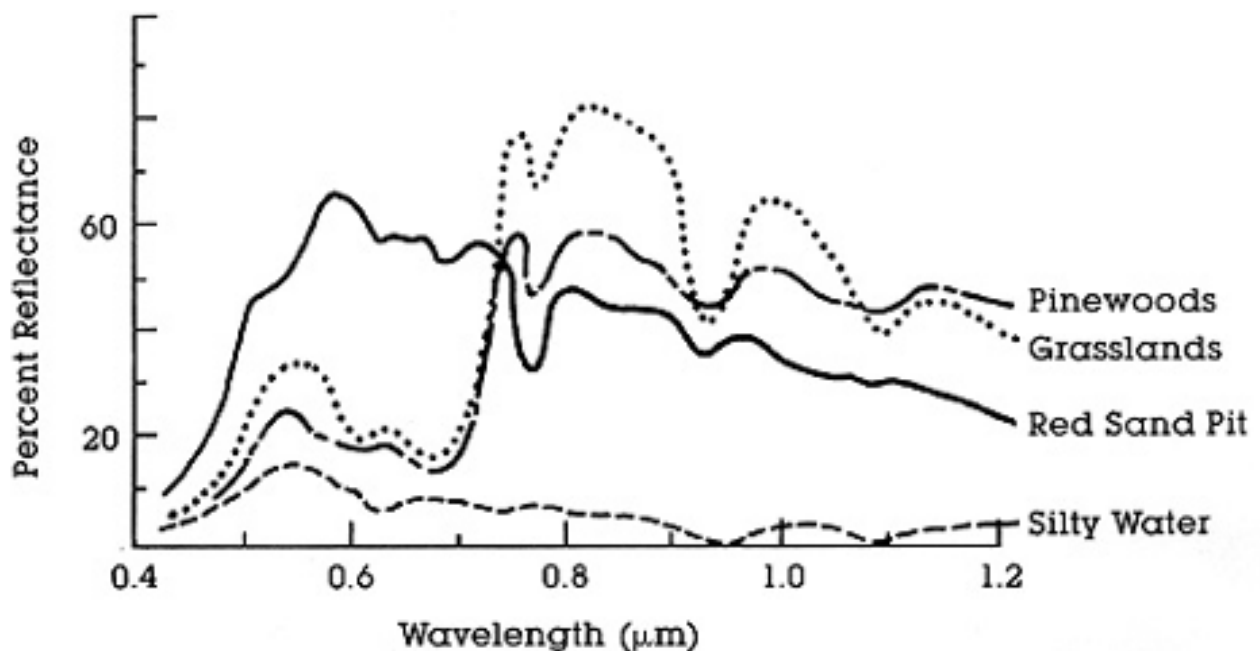
Di seguito è riportato un diagramma generalizzato che illustra la trasmissione atmosferica della radiazione incidente per diverse lunghezze d'onda.



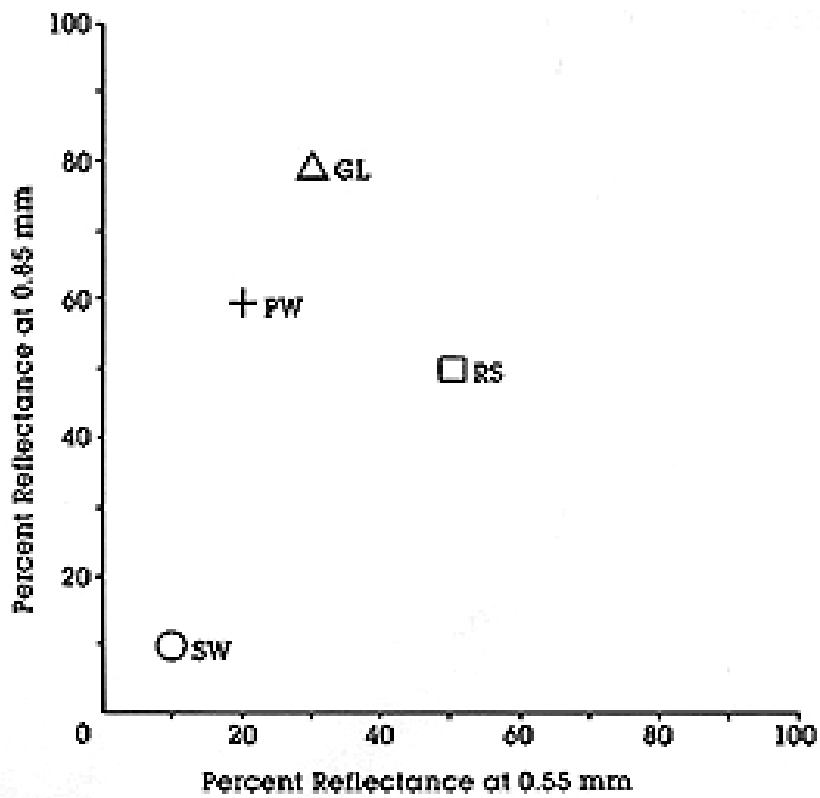
Il blu evidenzia le zone di minima radiazione incidente e/o riflessa mentre in bianco sono riportate le aree note come "finestre atmosferiche" in cui la radiazione ha una quantità ridotta di interazioni con le diverse specie molecolari, e può quindi attraversare l'aria con perdite minime o nulle dovute all'assorbimento. La maggior parte dei sensori per il telerilevamento in aria o sulle piattaforme spaziali sono stati costruiti per operare in una o più di una di tali finestre e effettuano le misure utilizzando rivelatori "sintonizzati" su certe frequenze (lunghezze d'onda) specifiche che attraversano l'atmosfera. Nondimeno alcuni sensori, in particolar modo quelli a bordo dei satelliti meteorologici, mirano a misurare direttamente fenomeni di assorbimento, quali quelli dovuti al CO_2 e ad altre molecole gassose. Si osservi come l'atmosfera sia praticamente opaca alla radiazione EM in parte dell' infrarosso medio e in tutto l' infrarosso lontano. Nella regione delle microonde invece la maggior parte della radiazione attraversa l'atmosfera non ostacolata per cui i segnali radar di tutte le bande comunemente utilizzate raggiungeranno la superficie (sebbene le goccioline di pioggia producano riflessioni che consentono di rivelare le precipitazioni).

Interazione radiazione - materia

La quantità di radiazione EM riflessa (assorbita, trasmessa) da un qualsiasi oggetto varia al variare della lunghezza d'onda. Questa importante proprietà della materia consente l'identificazione e la separazione di diverse sostanze o classi attraverso la loro firma spettrale (curve spettrali) come mostrato in figura.



Dunque la sabbia può riflettere più luce della vegetazione a certe lunghezze d'onda ma assorbirne di più ad altre. In linea di principio, vari tipi di superfici possono essere riconosciute e distinte fra loro grazie a tali differenze nelle riflettività relative, supposto che ci sia un metodo 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). A scopo esemplificativo si osservino, nella figura che segue, le posizioni dei punti che indicano le percentuali di riflettività in corrispondenza di due lunghezze d'onda per quattro tipi comuni di superfici (GL = terreni erbosi; PW = pinete; RS = sabbia rossa; SW = acqua fangosa).

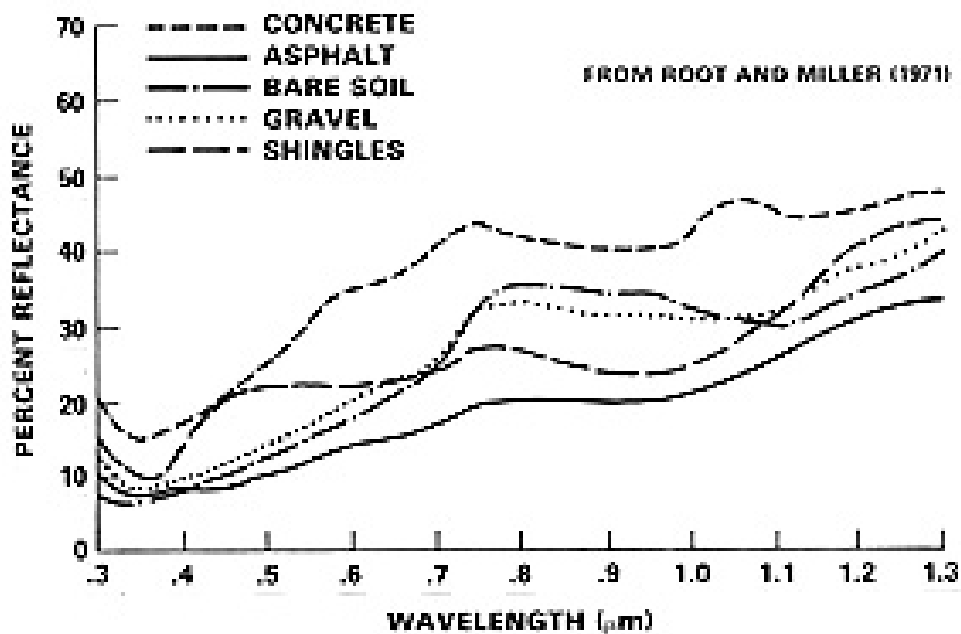


Qualora si considerino più di due lunghezze d'onda, i grafici in spazi multidimensionali tendono ad aumentare la separabilità di materiali diversi; questa è la base del telerilevamento multispettrale.

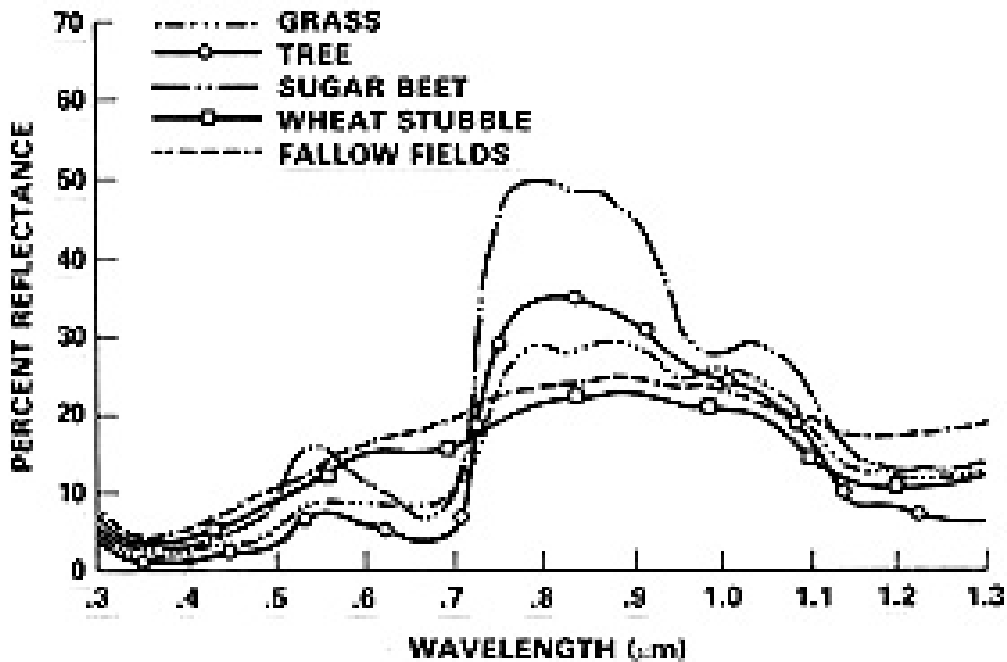
Caratteristiche spettrali degli elementi della superficie terrestre

Nella coppia di curve spettrali mostrate sotto (misurate in campo con uno spettrometro portatile) è evidente che la risposta spettrale della vegetazione è distinta da quella della materia inorganica grazie alla improvvisa crescita della riflettività a circa $0.7 \mu\text{m}$ seguita da una graduale diminuzione fino al raggiungimento dell'intervallo a $1.1 \mu\text{m}$. Le prime curve (a sinistra o in alto) indicano una crescita graduale della riflettività all'aumentare della lunghezza d'onda per materiali prodotti dall'uomo. Il calcestruzzo, caratterizzato da una colorazione tenue, ha una risposta media più elevata dell'asfalto scuro; gli altri materiali si collocano nel mezzo (la ghiaia è probabilmente più blu come suggerito dalla crescita della riflettanza fra 0.4 to $0.5 \mu\text{m}$ e dalla risposta piatta nel resto della regione visibile [$0.4 - 0.7 \mu\text{m}$]). Le altre curve (a destra o in basso) indicano che gran parte dei tipi di vegetazione hanno una risposta molto simile fra 0.3 e $0.5 \mu\text{m}$; mostrano variazioni modeste nell'intervallo $0.5 - 0.6 \mu\text{m}$; e la loro massima variabilità (e quindi la discriminazione ottimale) è fra 0.7 e $0.9 \mu\text{m}$.

(A) NONVEGETATED LAND AREAS



(B) VEGETATED LAND AREAS



In senso stretto, dunque, le misure spettrali coinvolgono l'interazione fra la radiazione che illumina e la struttura atomica/molecolare di qualsiasi mezzo, determinando un segnale riflesso modificato in seguito all'attraversamento dell'atmosfera e in funzione della natura della risposta del sistema di rivelazione del sensore. Comunque, in pratica, oggetti e proprietà della superficie terrestre sono descritti piuttosto in termini di classi che di materia. Si consideri, per esempio, il calcestruzzo. Lo si può trovare in strade, parcheggi, piscine, edifici e altre strutture, ciascuna delle quali può essere trattata come classe distinta. La vegetazione può essere distinta in: alberi, coltivazioni, prati, alghe lacustri, ecc.; si può ricorrere anche a suddivisioni ulteriori, classificando gli alberi come decidui o sempreverdi, o ancora gli alberi decidui come querce, aceri, pioppi, ecc.

Le varie classi sono distinte attraverso due proprietà aggiuntive agli attributi spettrali, ovvero la forma (caratteristiche geometriche) e l'uso o il contesto (in certi casi la dislocazione geografica). Quindi una struttura di calcestruzzo può far parte della classe delle "strade" e dei "parcheggi" a seconda che sia lineare o più o meno estesa. Due oggetti con caratteristiche spettrali pressoché identiche di vegetazione potrebbero essere assegnate alle classi "foresta" e "area coltivata" in funzione della regolarità dei contorni (rettilinei, spesso con strutture rettangolari o irregolari). Un'applicazione fondamentale del telerilevamento è nella classificazione della miriade di tipologie presenti in una scena (generalmente presentata come immagine) in categorie significative o classi che possono essere convertite in mappa tematica.

Obiettivo di un qualsiasi sistema di telerilevamento è semplicemente la rivelazione di segnali di radiazione, la determinazione del loro carattere spettrale, la derivazione di adeguate firme, e la correlazione delle distribuzioni geografiche delle classi che rappresentano. Tutto ciò ha come risultato la visualizzazione di un prodotto interpretabile, che può essere una mappa o un insieme di dati numerici, che rispecchia le caratteristiche di una superficie (o di una proprietà dell'atmosfera) attraverso indicazioni sulla natura e sulla distribuzione degli oggetti presenti nel campo di vista.

Analisi di un sistema di telerilevamento

Nel capitolo precedente abbiamo appreso alcuni dei concetti fondamentali richiesti per meglio comprendere i fenomeni fisici che sono alla base del telerilevamento. Abbiamo trattato con un certo dettaglio tre componenti: la sorgente di energia, le interazioni dell'energia con l'atmosfera, le interazioni dell'energia con la superficie. Non abbiamo ancora esaminato una quarta componente; come l'energia viene registrata dal sensore. In questo capitolo prenderemo in considerazione quest'ultima componente del "sistema telerilevamento" per avere una migliore conoscenza delle caratteristiche delle piattaforme per il telerilevamento, dei sensori e dei dati che vi vengono acquisiti. Tratteremo anche del modo in cui questi dati vengono processati e registrati dal sensore stesso.

Segmento spaziale

Le componenti principali di un sistema satellitare sono:

1. Il Bus (o piattaforma)
2. Il Payload (che comprende i sensori)

Importante nella caratterizzazione di un sistema di Osservazione della Terra è l'orbita selezionata.

Il Bus

Il Bus o piattaforma è la parte principale del satellite, infatti tutti i satelliti hanno bisogno di una piattaforma per sopravvivere o operare nello spazio.

Una piattaforma è normalmente composta da una serie di sottosistemi che svolgono diverse funzioni e supportano il carico specifico.

I principali sottosistemi sono:

TTC: (Telecommunication, Tracking and Control Subsystem): fornisce il collegamento radio tra il satellite e la stazione a terra. Questa componente è vitale per scaricare i dati acquisiti dal satellite e anche per trasmettere i comandi alle altre componenti del satellite e controllare parametri come temperature, tensione, carburante, stato del carico, ecc.

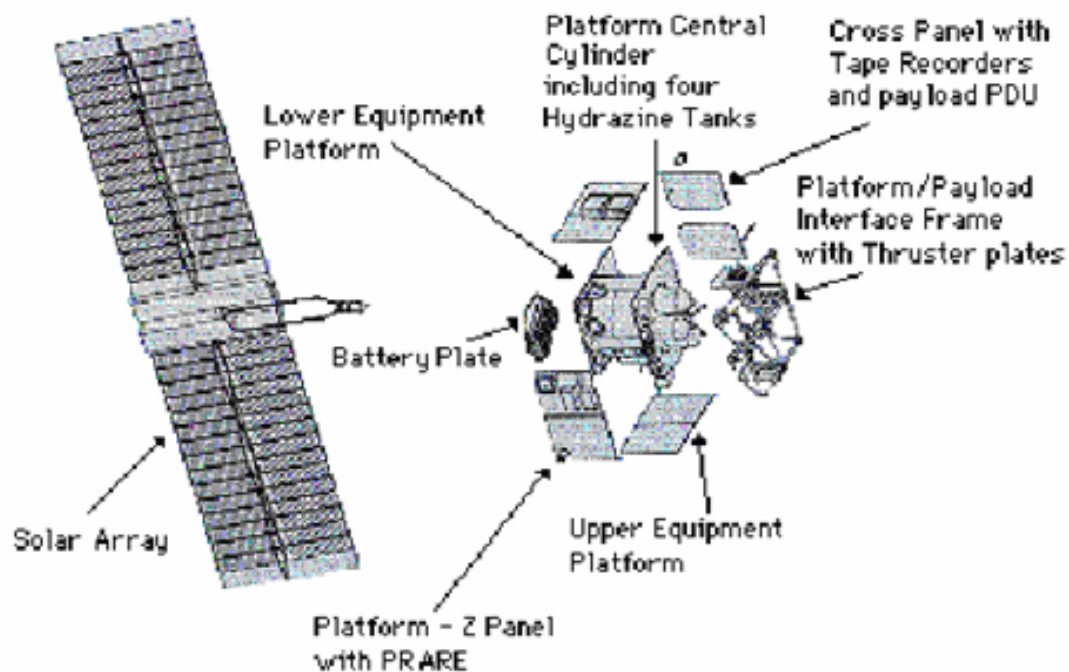
OBDAH: (On Board Data Handling): è l'unità di calcolo di bordo principale. L'importanza del sottosistema dipende dai requisiti di design del sistema e dalla strategia di missione e può essere semplicemente ridotta ad un sottosistema TTC con funzioni sofisticate come navigazione autonoma ed elaborazione a bordo dei dati

AACS: (Attitude Overall Control System): è l'insieme di dispositivi che assicurano stabilità e puntamento al satellite. E' composto da componenti per la messa in moto,

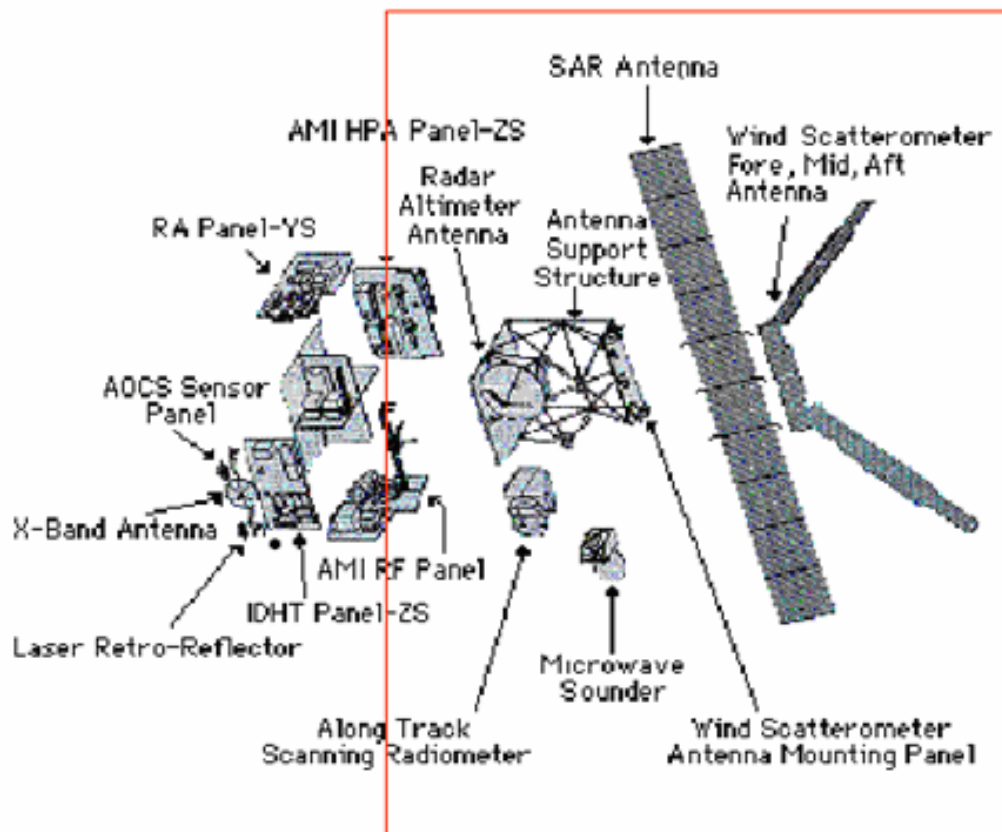
ossia ruote inerziali, e sensori, come sensori stellari e GPS. Questo sottosistema è critico per la missione poiché il corretto puntamento determina una corretta geometria dei dati.

POWER ASSEMBLY: fornisce l'energia elettrica alla piattaforma e al carico, in genere, è costituito da un set di pannelli solari, supportati da batterie che forniscono energia elettrica durante il lato in ombra dell'orbita.

BUS (PIATTAFORMA)



PAYLOAD



Sensori attivi e passivi

La radiazione riflessa viene registrata a distanza da un sensore. In realtà la radiazione effettiva misurata risente anche degli effetti di **assorbimento** e **diffusione** cui va soggetto il segnale durante la sua propagazione attraverso l'atmosfera. Più del 50% dello spettro elettromagnetico è inutilizzabile perché la radiazione corrispondente è totalmente bloccata dall'atmosfera. In definitiva, ciò che viene quindi registrato dal sensore ed espresso con un valore di intensità relativa, non è soltanto la radiazione proveniente dalla superficie, ma anche il risultato di tutti questi processi fisici di interazione con le particelle atmosferiche.

Un sensore non è altro che uno strumento capace di acquisire informazioni attraverso la misura e la registrazione di energia elettromagnetica.

Perché un sensore possa raccogliere e registrare l'energia riflessa o emessa dalla superficie, deve essere posto su una piattaforma stabile lontana dalla superficie che deve essere osservata. Le piattaforme per sensori remoti possono essere situati sul terreno, su un aereo o su una navicella o un satellite al di fuori dell'atmosfera terrestre.

Sensori a terra sono spesso usati per registrare le informazioni della superficie da confrontare con le informazioni raccolte dai sensori montati su aereo o su satellite. In alcuni casi possono essere usati per meglio caratterizzare il target osservato che è stato visualizzato da questi altri sensori, rendendo possibile una migliore comprensione delle informazioni nelle immagini. Le piattaforme aeree sono spesso usate per ottenere immagini di dettaglio. Nello spazio il rilevamento a distanza è, a volte, effettuato da uno shuttle o, più comunemente, da satellite.

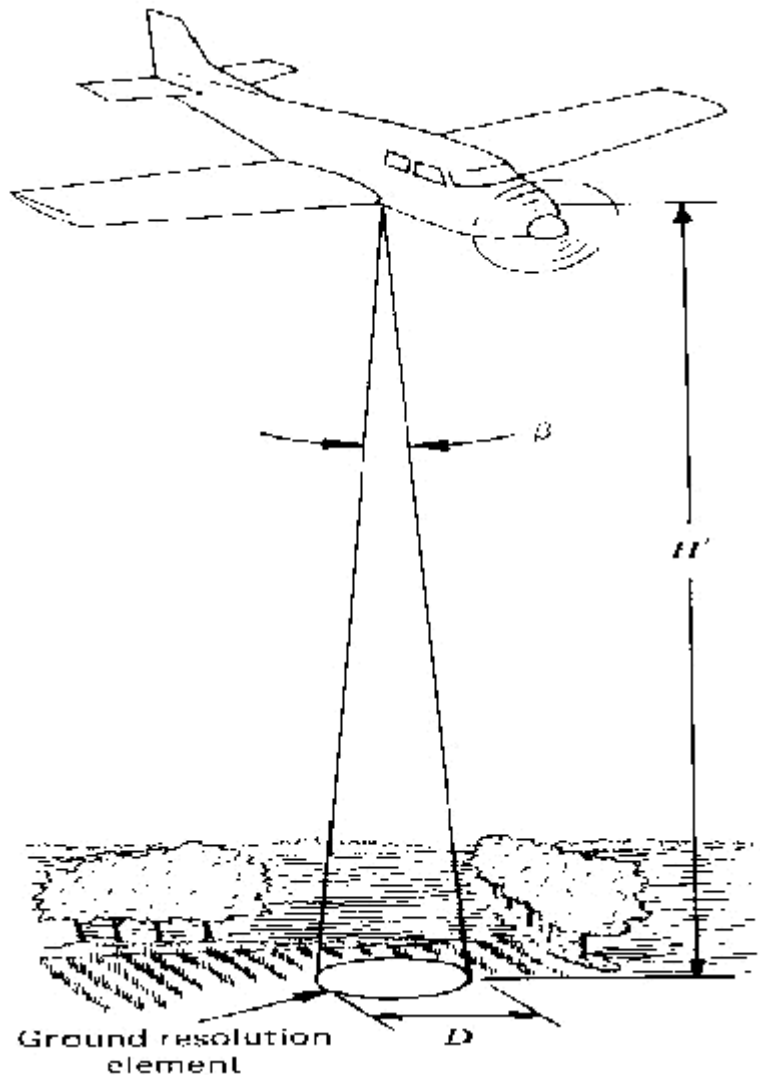
I sensori possono essere **attivi** o **passivi**: questi ultimi misurano la radiazione naturalmente disponibile (emessa o riflessa dagli oggetti), i sensori attivi generano invece un segnale che "illumina" l'oggetto e ne registrano l'eco di ritorno. I sensori passivi possono solo essere usati per registrare l'energia che è disponibile naturalmente. Per tutte le energie riflesse, questo può avvenire solo quando il sole illumina la Terra, per cui la notte non c'è energia riflessa disponibile. L'energia che viene naturalmente emessa (come quella dell'infrarosso termico) può essere registrata sia di giorno che di notte, purché la quantità di energia sia tale da essere registrata. I sensori attivi, invece, forniscono la sorgente di energia per l'illuminazione. Il sensore emette la radiazione che è diretta verso l'oggetto che deve essere osservato. La radiazione riflessa dall'oggetto è registrata e misurata dal sensore. I vantaggi dei sensori attivi comprendono la capacità di ottenere misure in ogni momento senza problemi legati al momento del giorno o della stagione. Comunque i sistemi attivi richiedono la generazione di una enorme quantità di energia per illuminare adeguatamente l'oggetto. Un esempio di sensore attivo è il Radar ad Apertura Sintetica (SAR).

Ogni sensore è caratterizzato da quattro proprietà:

- la **risoluzione spaziale**;
- la **risoluzione radiometrica**;
- la **risoluzione spettrale**;
- la risoluzione temporale.

La **risoluzione spaziale** è l'area minima sul terreno vista dallo strumento da una data altezza ad un dato istante e viene rappresentata dalla dimensione dell'elemento

di superficie riconoscibile in una **immagine** registrata da un sistema di telerilevamento o, ancora, dalla distanza minima entro la quale due oggetti appaiono distinti nell'immagine. Per alcuni strumenti di telerilevamento, la distanza tra gli oggetti che devono essere visualizzati e la piattaforma gioca un ruolo importante nel determinare il dettaglio delle informazioni ottenute e l'area totale visualizzata dal sensore. Sensori a bordo di piattaforme molto lontane dagli oggetti da osservare normalmente osservano un'area più grande ma non possono ottenere un grande dettaglio. Il dettaglio in una immagine dipende dalla risoluzione spaziale del sensore. La risoluzione spaziale dei sensori passivi dipende prima di tutto dal loro Istantaneo Campo di Vista (Instantaneous Field of View o IFOV).



L'IFOV è il cono angolare di visibilità del sensore e determina l'area della superficie terrestre che è "vista" ad una data altezza in un particolare momento. La dimensione dell'area osservata è determinata moltiplicando l'IFOV per la distanza dal terreno al sensore. Quest'area sul terreno è detta cella di risoluzione e determina la risoluzione spaziale massima del sensore. Perché un oggetto omogeneo sia osservabile, la sua dimensione generalmente deve essere uguale o più grande della cella di risoluzione. Se l'oggetto è più piccolo di questa, non può essere identificato per cui sarà registrata la luminosità media di tutti gli oggetti in quella cella di risoluzione. I satelliti commerciali forniscono immagini con risoluzioni che variano da pochi metri a diversi chilometri.



30 metri

10 metri

3 metri

La **risoluzione radiometrica** rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia radiante. Le caratteristiche radiometriche descrivono il contenuto informativo in un'immagine. Ogni volta che una immagine è acquisita su un film o da un sensore, la sua sensibilità alla grandezza dell'energia elettromagnetica determina la risoluzione radiometrica. 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. I dati in una immagine sono rappresentati da numeri digitali positivi che variano da 0 a (uno meno di) una potenza di 2. Questo range corrisponde al numero di bits usati per codificare i numeri nel formato binario. Ciascun bit registra un esponente della potenza di due (per esempio 1 bit = $2^1 = 2$). Il massimo numero di livelli di luminosità disponibili dipende dal numero di bits usati per rappresentare l'energia registrata. Quindi se un sensore usa 8 bits per registrare i dati, i valori digitali disponibili sono $2^8 = 256$, variando da 0 a 255. Se sono usati solo 4 bits i valori disponibili saranno $2^4 = 16$ variando da 0 a 15 con una risoluzione radiometrica minore.

I dati in una immagine sono generalmente visualizzati in un intervallo di toni di grigio con il nero che rappresenta il numero digitale 0 e il bianco che rappresenta il valore massimo (per esempio 255 in dati a 8 bit). Confrontando una immagine a 2 bit con una a 8 bit possiamo vedere che c'è una grande differenza nel livello di dettaglio individuabile in funzione della risoluzione radiometrica. Più alto è il numero di livelli di grigio, migliore è la risoluzione radiometrica.

La **risoluzione spettrale** è l'ampiezza delle bande spettrali risolte dal sensore cioè il minimo intervallo tra le lunghezze d'onda medie di due bande spettrali che un sensore può separare. Migliore è la risoluzione spettrale, più sottile è l'intervallo di lunghezze d'onda per una particolare banda. Le pellicole in bianco e nero registrano le lunghezze d'onda che si estendono su tutta la porzione del visibile dello spettro elettromagnetico. La sua risoluzione spettrale è piuttosto bassa dal momento che diverse lunghezze d'onda dello spettro del visibile non sono distinte singolarmente, ma viene registrata la riflettanza globale nell'intera porzione del visibile. Anche le pellicole a colori sono sensibili all'energia riflessa dalla porzione visibile dello spettro, ma hanno una risoluzione spettrale più alta per cui sono sensibili all'energia riflessa singolarmente nel blu, nel verde e nel rosso. Quindi possono rappresentare oggetti di diversi colori in funzione della loro riflettanza in ciascuno di questi intervalli di lunghezza d'onda. Molti sistemi di telerilevamento registrano l'energia di intervalli separati di lunghezza d'onda a diverse risoluzioni spettrali. Questi sono detti sensori multispettrali. Sensori multispettrali avanzati, chiamati iperspettrali, registrano centinaia di ristrette bande spettrali nella porzione dello spettro elettromagnetico del visibile, dell'infrarosso vicino e del medio infrarosso. La loro risoluzione spettrale molto alta rende possibile la

discriminazione tra differenti oggetti sulla base della loro risposta spettrale in ciascuna delle bande.

La **risoluzione temporale** è il tempo che intercorre tra acquisizioni successive della stessa area. Il periodo di rivisitazione di un sensore satellitare è normalmente di diversi giorni. Quindi la risoluzione temporale assoluta di un sistema di telerilevamento per riprendere una seconda volta la stessa area con lo stesso angolo di vista è uguale a questo periodo. Comunque, a causa del fatto che c'è una certa sovrapposizione dell'ampiezza di ripresa di orbite adiacenti per la maggior parte dei satelliti, e che questa sovrapposizione aumenta all'aumentare della latitudine, alcune aree della Terra possono essere riprese più frequentemente. Inoltre, alcuni satelliti hanno la capacità di orientare i loro sensori per riprendere la stessa area in passaggi differenti con intervalli temporali più ristretti. Quindi la risoluzione temporale di un sensore dipende da una varietà di fattori fra cui le caratteristiche del satellite e del sensore, la sovrapposizione dell'ampiezza di ripresa e la latitudine.

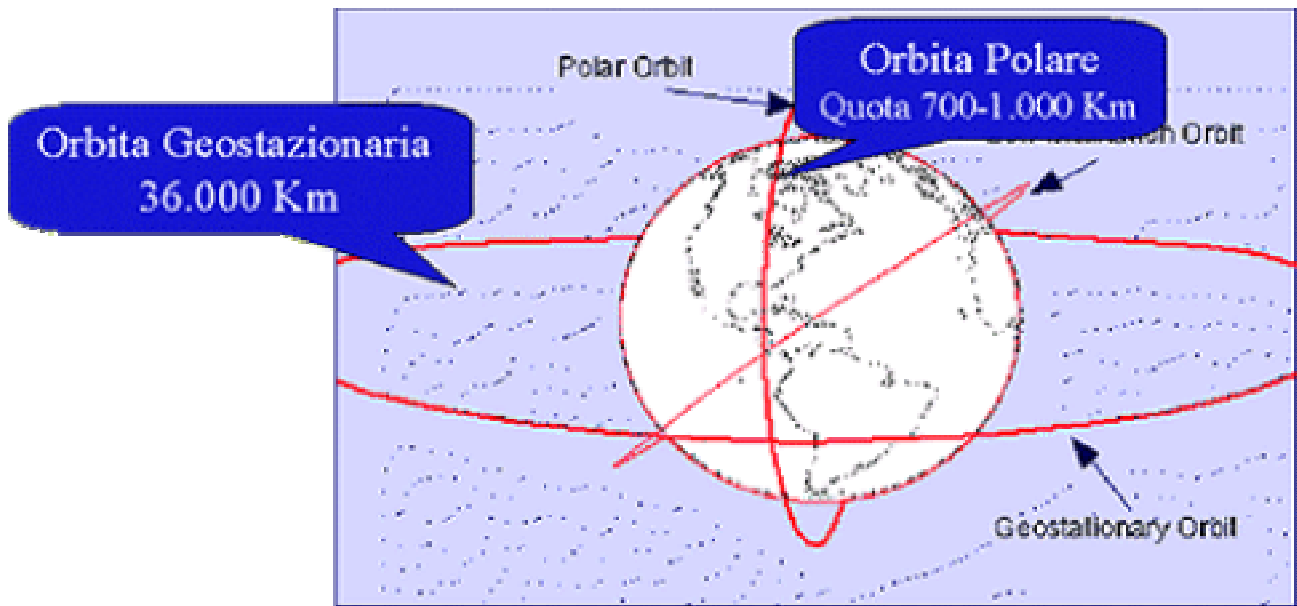
Le Orbite

L'orbita selezionata dipende sia dall'applicazione richiesta che da speculazioni tecnologiche.

I requisiti della missione che determinano la selezione dell'orbita sono il tempo di rivisita e la distanza terra-satellite. Normalmente per missioni ad alta risoluzione l'orbita preferenziale è la Low Earth Orbit (LEO) con una altezza nominale tra 300 km e 1000 km. La selezione di questi parametri rappresenta sempre un compromesso tra la necessità di vedere la Terra da vicino e la durata della missione, poiché un'orbita troppo bassa produce effetti indesiderati come il trascinarsi atmosferico e maggiori perturbazioni gravitazionali sul satellite.

Un altro parametro rilevante per la caratterizzazione dell'orbita è l'inclinazione dell'orbita sul piano dell'eclittica. Orbite con grande inclinazione (come le Orbite Polari) privilegiano la copertura totale della Terra, con una piccolissima perdita di dati sui Poli, mentre piccole inclinazioni sono preferite nel caso di studi specifici (per esempio sulla fascia equatoriale).

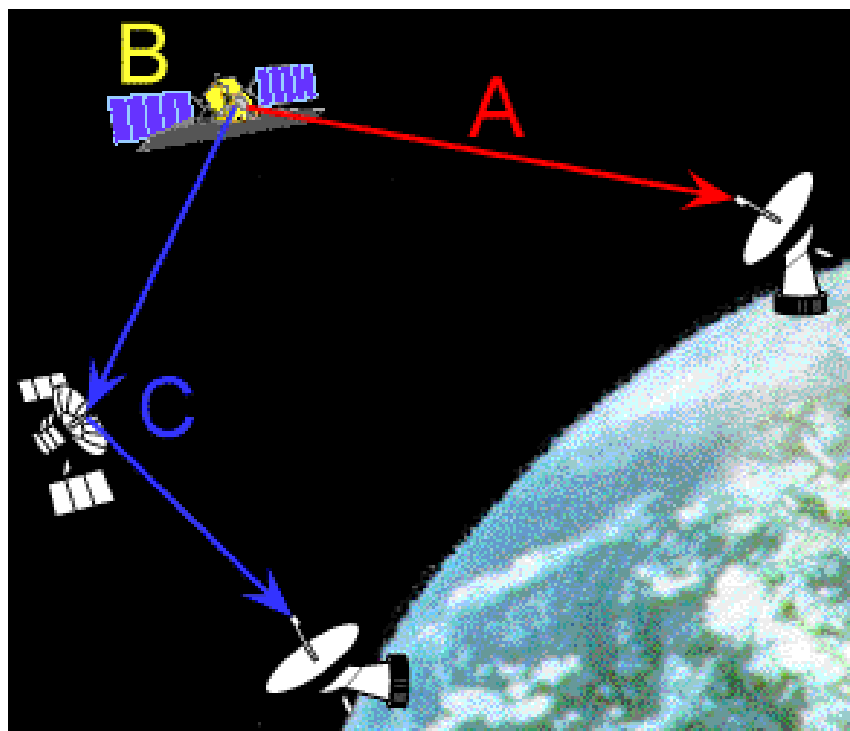
L'orbita Geostazionaria è un'ottima soluzione quando occorre un'acquisizione del sensore ogni 24 ore. Il vantaggio principale di quest'orbita è che il satellite vede un'area fissa della Terra e può acquisire e trasmettere in tempo reale i dati del carico. Lo svantaggio principale di quest'orbita è la distanza dalla Terra, 36.000 km, che rappresenta una sfida per la **risoluzione** del sensore e richiede lanci più complessi con costi aggiuntivi per la missione. Attualmente l'orbita GEO è usata per le missioni meteorologiche come **METEOSAT** e Eumetsat una missione per la difesa.



Segmento terrestre

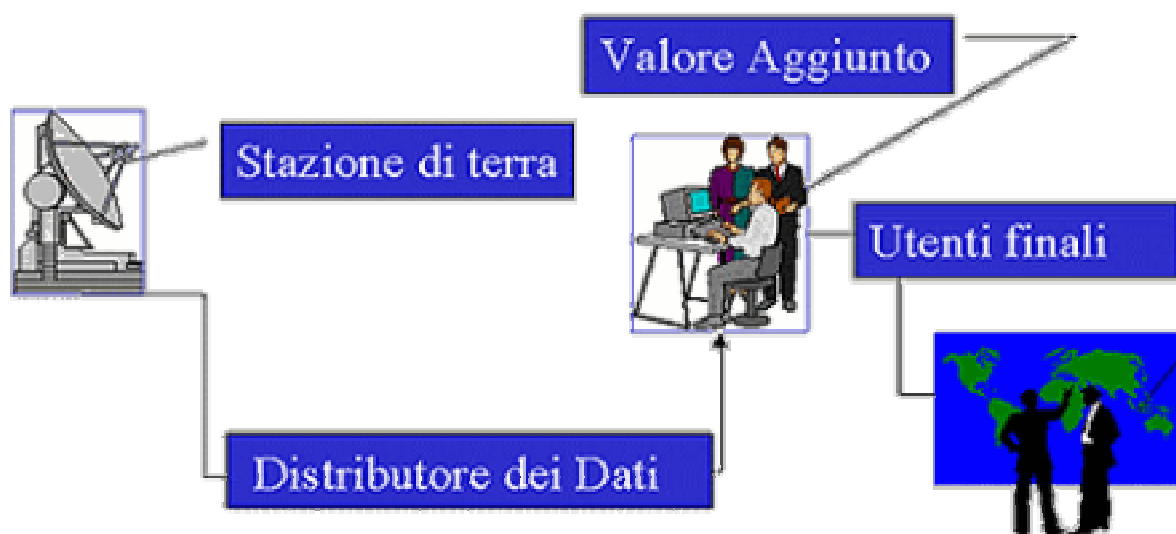
I dati ottenuti dalle missioni spaziali devono essere trasmessi alla Terra dal momento che il satellite continua a stare in orbita e ad acquisire dati. Anche da una piattaforma aerea possono essere usate queste tecnologie se è necessario che i dati siano trasmessi con urgenza.

Ci sono fondamentalmente tre maniere per trasmettere i dati acquisiti dal satellite a terra. I dati possono essere trasmessi direttamente alla Terra se esiste una stazione ricevente (Ground Receiving Station - GRS) nella direzione di vista del satellite. Se ciò non è possibile, i dati possono essere registrati a bordo del satellite e trasmessi al GRS in un momento successivo. I dati possono essere anche trasmessi al GRS attraverso i Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) che consistono di una serie di satelliti per le telecomunicazioni in orbita geosincrona. I dati sono trasmessi da un satellite ad un altro fino a che non raggiungono il giusto GRS.



I dati sono ricevuti dalla stazione ricevente in formato digitale grezzo, non elaborato. Su richiesta, possono essere poi processati per correggere tutte le distorsioni sistematiche, geometriche ed atmosferiche e convertiti in un formato standard. I dati sono poi registrati su diversi media come nastri, dischi o CD Rom. Tipicamente i dati sono archiviati nelle stazioni di ricezione e processamento e gli archivi completi di dati sono gestiti dalle agenzie governative, ma anche dalle compagnie commerciali responsabili degli archivi dei diversi sensori.

Immagini "**quick-look**" a bassa risoluzione sono usate per visionare le immagini archiviate prima che vengano acquistate. La qualità spaziale e **radiometrica** di questi tipi di dati è degradata, ma risultano comunque molto utili per verificare se la qualità dell'immagine e la eventuale copertura nuvolosa è appropriata ai fini della applicazione.



Elaborazione delle immagini ed interpretazione

Perché i dati telerilevati siano utili, dobbiamo essere in grado di estrarre informazioni significative dalle immagini. Questo ci porta all'argomento di questo capitolo, l'elaborazione e l'interpretazione delle immagini. L'interpretazione e l'analisi delle immagini telerilevate implica l'identificazione e quindi l'estrazione di utili informazioni sui diversi elementi presenti sull'immagine. Molte delle interpretazioni e identificazioni di elementi presenti nelle immagini telerilevate sono effettuate manualmente o visivamente da un interprete umano. In molti casi questo è fatto usando immagini visualizzate in un formato fotografico. In questo caso noi diciamo che i dati sono in formato analogico. Le immagini telerilevate possono anche essere rappresentate in un computer come una griglia di pixel, con ciascun pixel corrispondente ad un numero digitale che rappresenta il livello di luminosità di quel pixel nella immagine. In questo caso i dati sono in formato digitale. L'interpretazione visiva può anche essere effettuata esaminando le immagini digitali visualizzate sullo schermo di un computer. Le immagini, sia analogiche che digitali, possono essere visualizzate in bianco e nero

(anche dette monocromatiche) o come immagini a colori combinando differenti canali o bande che rappresentano differenti lunghezze d'onda. Ma che cosa è una "immagine a colori"? Dobbiamo adesso analizzare il concetto di colore.

Noi vediamo i colori perché i nostri occhi percepiscono l'intero intervallo di lunghezze d'onda del visibile e il nostro cervello elabora le informazioni in colori separati. Puoi immaginare come ci apparirebbe il mondo se noi potessimo vedere solo degli intervalli molto limitati di lunghezze d'onda o colori? Questo è il modo in cui molti sensori funzionano. Le informazioni derivanti da un intervallo ristretto di lunghezze d'onda sono raccolte e conservate in un canale, talvolta definito come una banda. Possiamo combinare e visualizzare in maniera digitale i diversi canali usando i tre colori primari (blu, verde e rosso). I dati da ciascun canale o banda sono rappresentati come uno dei colori primari e, in funzione della relativa luminosità (il numero digitale) di ciascun pixel in ogni banda, i colori primari si combinano in diverse proporzioni per rappresentare diversi colori. Quando usiamo questo metodo per visualizzare una singola banda, visualizziamo quella banda attraverso tutti e tre i colori primari. Poiché il livello di luminosità di ciascun pixel è lo stesso per ciascun colore primario (è sempre la stessa banda visualizzata nel blu, nel verde e nel rosso) i colori si combineranno a formare una immagine in bianco e nero che mostrerà diversi toni di grigio dal nero al bianco. Quando visualizziamo più di una banda ciascuna come un diverso colore primario, i livelli di luminosità potranno essere differenti per ciascuna banda/colore primario e quindi i colori si combineranno a formare una immagine a colori.

Quando i dati telerilevati sono disponibili in formato digitale, l'analisi e l'elaborazione digitale possono essere effettuati usando un computer. L'elaborazione digitale può essere usata per migliorare i dati come preparazione ad una interpretazione visiva. L'analisi e l'elaborazione digitale per identificare gli elementi nella immagine ed estrarre informazioni possono anche essere effettuati in maniera automatica senza nessun intervento da parte di un interprete. Spesso tale analisi è fatta come ausilio a quella effettuata dall'interprete.

Sia le tecniche manuali che quelle digitali per l'interpretazione di dati telerilevati hanno i loro vantaggi e svantaggi. L'interpretazione manuale è spesso limitata ad analizzare una singola banda o una singola immagine alla volta a causa della difficoltà nell'effettuare l'interpretazione visiva con immagini multiple. L'analisi digitale è utile per analisi simultanee di molte bande spettrali e, inoltre, è possibile elaborare set di dati voluminosi molto più velocemente di un interprete umano. Inoltre l'interpretazione manuale è un processo soggettivo, ciò significa che i risultati varieranno con differenti interpreti, mentre l'analisi digitale è basata sulla manipolazione di numeri digitali in un computer e quindi è più obiettiva, dando generalmente risultati più consistenti. In ogni caso la determinazione della validità e della accuratezza dei risultati dall'elaborazione digitale può essere difficoltosa.

E' importante comprendere che l'analisi visiva delle immagini telerilevate non esclude l'analisi digitale e viceversa. Entrambe le metodologie hanno i loro meriti. Nella maggior parte dei casi, un mix di entrambi i metodi è utilizzato nell'analizzare le immagini.

Al fine di mettere in pratica alcune delle regole fondamentali che gli specialisti dell'interpretazione applicano per l'esame e l'analisi di un'immagine telerilevata dallo spazio, ci concentreremo quasi completamente sull'analisi di una singola immagine Landsat. Saranno dimostrate e valutate diverse tecniche comuni di analisi, utilizzate

nell'elaborazione computerizzata di dati telerilevati da satellite. Dotatevi di un atlante geografico prima di iniziare, seguire le lezioni sarà più facile!

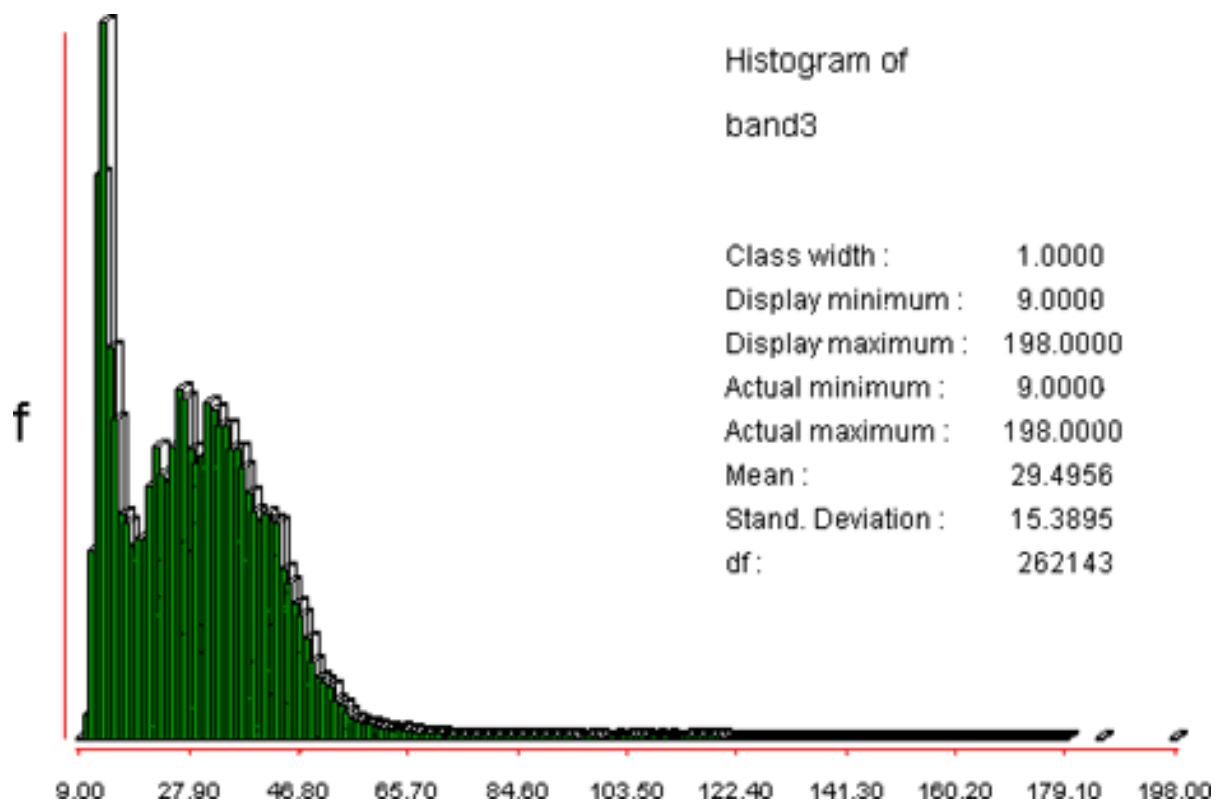
Banda 3 TM di Morro Bay, California

La scena scelta rappresenta una regione della costa della California centrale a circa metà strada tra San Francisco e Los Angeles, nella contea di San Luis Obispo. Questa immagine è stata estratta dalla scena del Thematic Mapper **Landsat** 5 (scena 5026-31810) acquisita il 19 Novembre del 1984. Questi dati rappresentano una parte dei campioni offerti ad uso formativo dall' Earth Observation Satellite (Eosat) Corp., attualmente conosciuta come Space Imaging-Eosat. Per familiarizzare con l'immagine scelta, guardatela nella banda 3 del TM in bianco e nero.



ZOOM

Il dato visualizzato è costituito da una griglia di 512 x 512 pixel (ogni pixel rappresenta un quadrato di 30 metri di lato, e ciascun lato dell'immagine supera appena i 16 chilometri di lunghezza). Al di sotto dell'immagine appare un **istogramma** che rappresenta la distribuzione di frequenza dei valori di luminosità nella banda 3. Il picco vicino al valore 9 di DN corrisponde alle tonalità scure associate all'oceano; il secondo picco, prossimo al valore 28, fa riferimento alle tonalità medie di grigio.



La città più grande nell'immagine è Morro Bay. Questa sorge a circa 21 chilometri a nord ovest della cittadina di San Luis Obispo, raggiungibile per mezzo della strada, chiaramente visibile nella scena, la nota Autostrada costiera 1 che corre lungo buona parte della linea di costa californiana, anche se questa scena si estende verso l'entroterra orientale. La seconda strada principale, l'Autostrada californiana 41, è visibile poichè attraversa una valle tra due colline in direzione Ascadero, a 27,5 Km verso nord-est. Cayucos è una piccola città residenziale che sorge lungo la costa a nord di Morro Bay. Nella parte bassa dell'immagine è presente un altro grande insediamento, la città di Los Osos.

Identificazione delle caratteristiche della scena

Nella rassegna che segue, alcune specifiche caratteristiche e strutture che servono da riferimento per focalizzare la nostra attenzione saranno identificati da lettere, come una carta sovrapposta su un'immagine di sfondo in cui le tonalità di grigio sono state opacizzate. Date un'occhiata alla mappa. Questa mappa può essere richiamata in qualsiasi momento si voglia visualizzarla, cliccando sulla lettera sottolineata e colorata. Per comodità, vi suggeriamo di stampare questa mappa e di consultarla manualmente se non si desidera scaricare la mappa dalla lettera ogni volta che vi si fa riferimento.

Partiamo con la banda TM 1



Nella banda 1, gli oggetti e le superfici bluastre e verdastre dell'immagine saranno visualizzate generalmente come toni di grigio più luminosi di quelli che rappresentano gli altri colori. Alla prima occhiata si notano immediatamente: l'oceano sulla sinistra; la parte collinare, soprattutto nei due terzi superiori della scena; diverse zone con un disegno incrociato che dovrete quasi certamente riconoscere come il reticolo stradale nelle diverse cittadine; un elemento lineare, che è ovviamente un'autostrada maggiore, assieme a diversi elementi simili che sono le strade sussidiarie. Potete anche riconoscere alcune aree, sia naturali che antropizzate, che andremo ad illustrare a breve.

La componente acquatica, nella scena, è dominata dall'oceano. La tonalità per il mare aperto è sorprendentemente scura, mentre noi siamo abituati a pensare al colore verde-azzurrognolo dell'acqua. In tutte le bande l'acqua del mare aperto è rappresentato solitamente a livelli bassi di tonalità di grigio, dal momento che la radiazione solare è ampiamente assorbita. La riflettenza è maggiore nelle bande blu e verde, ma non è alta. Tuttavia essa aumenta alquanto se sono presenti limo

(sedimenti sabbiosi) o altri sedimenti. In questa banda si vede come i sedimenti siano largamente diffusi sia al largo che nella baia (le loro tonalità in questa banda sono le più luminose tra tutte le sette bande) ma alcune deviazioni all'interno dello schema delle tonalità come nel punto **a** lasciano intuire in realtà variazioni nei depositi di sedimento. Grandi variazioni in questi schemi, dalla costa al mare aperto, rappresentano lingue di sedimenti determinate dall'azione delle onde. Questo viene visualizzato meglio nelle bande 2 e 3, in cui queste lingue sono isolate dal contrasto più elevato. Notate la distribuzione variabile dei sedimenti all'interno della più protetta Morro Bay, specialmente in **b** che è situato proprio al di là del punto di ingresso di un piccolo fiume.

A destra della linea di costa stessa, due lunghe strisce di tonalità molto chiara (biancastra), molto simili ma in realtà distinte, si estendono dalla parte superiore fino al fondo della scena. Se esaminate le bande a lunghezze d'onda maggiori, la striscia sulla sinistra (verso ovest) cambierà di carattere (diventando di un grigio scuro chiazzato), mentre quello sulla destra rimane pressochè identico. La striscia sinistra corrisponde a forti frangenti. Queste barriere sono in realtà biancastre all'occhio se viste da terra, a causa della loro capacità di disperdere e riflettere la luce, in particolare alle lunghezze d'onda più corte, poichè l'acqua non è più una superficie piana quando è agitata e produce schiuma (la superficie di una birra versata è un buon esempio). Probabilmente adesso potete intuire che la striscia a destra si riferisce a della sabbia molto riflettente che si è depositata come una striscia di sabbia o di spiaggia (questo carattere costiero risulta comunemente da depositi di particelle sabbiose che sono trascinate da lunghe correnti marine che tagliano trasversalmente un'insenatura di acqua poco profonda (come nel caso di Morro Bay). Una lunga banchina protegge l'insenatura da queste correnti; notate che questa struttura stretta non può essere vista nell'immagine ma sono evidenti i suoi effetti sui frangenti. Le chiazze scure **c** che interrompono questa striscia sono vegetazioni costiere che tendono ad avere bassa riflettanza in tutte le bande, persino nella banda 4 che visualizza molti altri tipi di vegetazione come più luminosi.

Riuscite adesso ad individuare le zone occupate da colline e montagne basse grazie alla struttura chiaro-scuro che dà l'impressione di una superficie irregolare e della presenza di un rilievo. I produttori di mappe ottengono questo effetto attraverso sfumature in toni di grigio che ingannano la mente dando l'impressione di percepire una topografia ondulata. In questa immagine, così come nelle foto aeree, l'effetto è prodotto dalle variazioni di luminosità della superficie legate all'orientazione relativa dell'angolo di incidenza della luce solare e dell'inclinazione dei versanti. I versanti (come in **d**) orientati verso il sole per esempio formano più frequentemente angoli maggiori rispetto ai raggi solari e riflettono un'elevata percentuale di luce verso il sensore montato sul satellite (o verso la macchina fotografica su un aereo). Queste superfici appaiono quindi più luminose (toni più chiari). I versanti (**e**), che formano angoli minori con la radiazione solare incidente, riflettono la maggior parte della luce lontano dal sensore apparendo più o meno scure, dunque in ombra. Generalmente sono visibili come aree in tonalità medie di grigio all'interno delle quali appaiono, grazie ai contrasti tonali, altre strutture che rappresentano oggetti o tipologie specifiche (si osservi **f**). Se i versanti sono scoscesi e/o l'angolo con il sole è piccolo, essi appaiono sempre più scuri (tendono al nero).

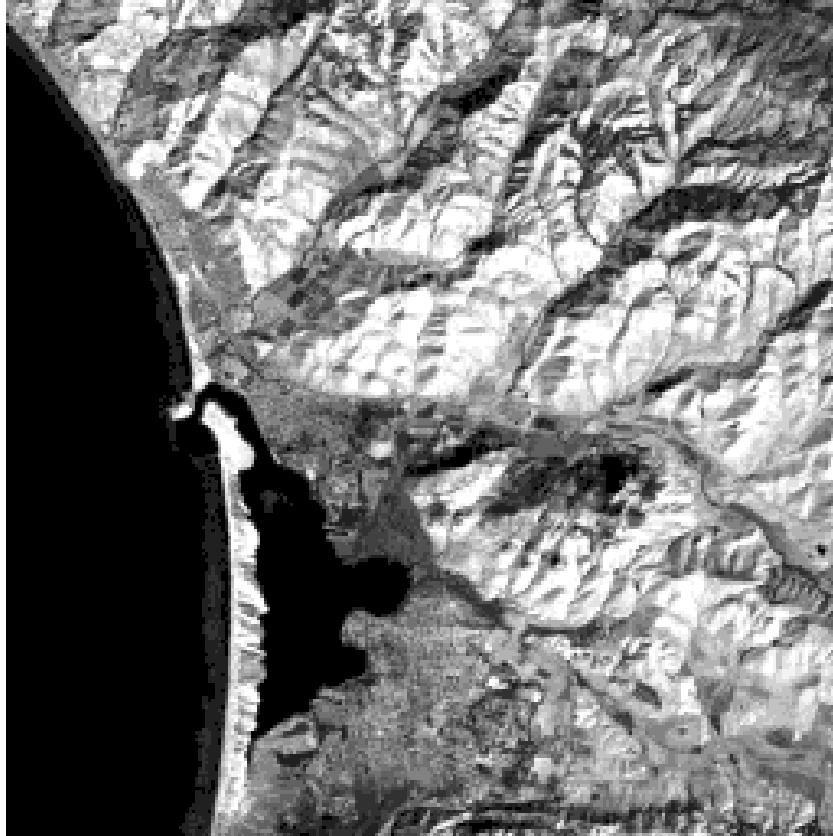
In questa scena gran parte dei versanti in questa e nelle altre bande sono piuttosto chiari. Ciò lascia supporre che è quasi assente vegetazione adulta (verde) e che sono

probabilmente superfici di roccia nuda. L'immagine è autunnale e le colline coperte di vegetazione secca hanno una bassa riflettività (scarsa influenza della clorofilla). A quote maggiori la vegetazione è più verde e più densa come in (g) essendoci più umidità (legata alla condensazione della nebbia e alla geologia e topografia locale). La vegetazione più densa appare in toni più scuri in banda 1 e banda 3 perchè la clorofilla assorbe le lunghezze d'onda blu e rosse. In banda 2 la vegetazione verde è solo appena più scura dell'erba secca nelle aree adiacenti dato che la clorofilla riflette maggiormente il verde in quella parte dello spettro visibile. Nella scena sono visibili alcuni blocchi di granito. L'esempio migliore, in (h), è la Morro Rock visibile nell'immagine come una macchia luminosa (superficie esposta al sole) al disotto di un punto scuro (la sua ombra).

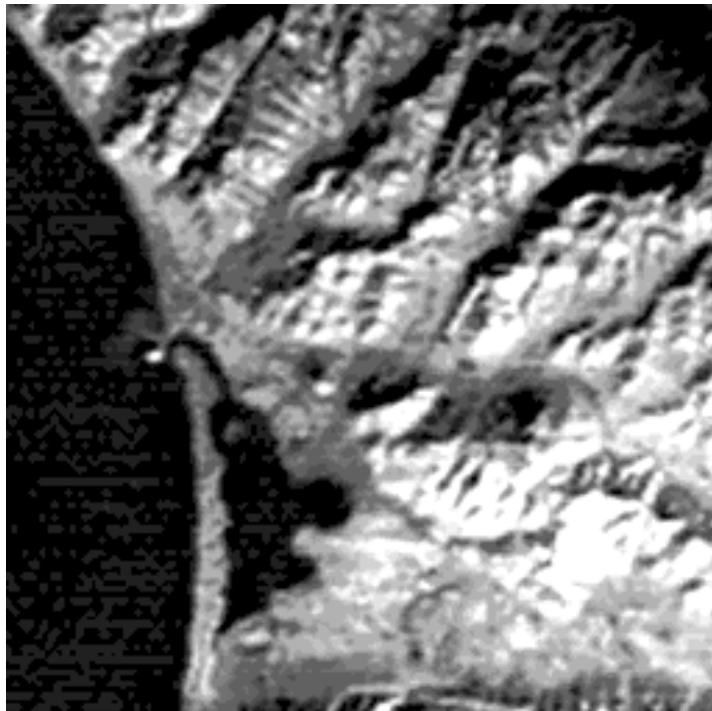
Due strutture (che appaiono in toni più scuri nelle prime tre bande TM, specialmente la 1 e la 3) possono essere correlate con la vegetazione in crescita. In (i), delle linee scure lunghe e sottili corrispondono alla vegetazione, prevalentemente arborea e arbustiva, che si concentra lungo le rive di stretti corsi d'acqua, probabilmente discontinui. Altre strutture più irregolari, in tonalità simili, (come in j), sono generalmente associate a raggruppamenti irregolari di arbusti ed alberi. In (k) e altrove, soprattutto nelle valli e nelle pianure, sono presenti strutture più o meno regolari (talvolta rettangolari) in toni scuri, espressioni dei campi coltivati che contengono colture in fase di crescita. Altre strutture irregolari della scena, come in (l), potrebbero essere aree di macchia (si osservi in primo piano in questa foto) o anche zone umide. Altre aree scure più estese, come in (m) e (n), sono probabilmente campi aperti incolti o secchi o pianure sporadicamente ricoperte da vegetazione naturale.

L'ampia area pressochè triangolare (o), su cui l'immagine è centrata, giace ad un'estremità del piccolo fiume (p) che attraversa la vallata tagliata dalla Autostrada 1. Perlomeno parte di quest'area è un delta scavato nella Morro Bay. La vegetazione che vi si trova, caratterizzata da toni moderatamente scuri in questa banda, è caratteristica delle zone umide che si sviluppano come acque salmastre paludose lungo la costa.

Osserviamo ora la banda 7 del TM, centrata sui 2.2 µm, nell'infrarosso. L'immagine ha elementi in comune sia con la banda 1 che con la 4 ma esistono numerose ovvie differenze. Tutta l'acqua è ora totalmente scura (non ci sono indizi di sedimenti riflettenti). Sopravvivono soltanto deboli tracce dei frangenti. La sabbia delle spiagge è più chiara che in banda 4. I versanti collinari esposti al sole appaiono moderatamente più chiari che nelle altre due bande. Dai versanti parzialmente in ombra emergono maggiori dettagli. Alcune aree, come i campi coltivati, che apparivano in toni chiari nella banda 4 sono nuovamente scuri come in banda 1. L'area misteriosa attorno a s mostra una struttura interna, con strisce allungate chiare e scure, che svela informazioni utili per capirne l'identità. I centri abitati hanno una rete viaria meno netta e sono nel complesso più scuri. Le cave estrattive, così evidenti in banda 1, sono quasi impossibili da individuare in banda 7.



Esaminiamo ora la banda 6 - quella dell'emissione termica (10.5- 12.5 μm). Si ricordi che la risoluzione spaziale di questa banda è di quattro volte inferiore a quella delle altre (120 m anzichè 30 m). L'effetto di questa risoluzione ridotta è immediatamente evidente osservando la scena: molti dettagli distinguibili nelle altre bande tendono ad essere "smussati" in questa. Ciò nonostante molti elementi individuati nelle altre bande studiate sono ancora riconoscibili.



In realtà la superficie collinare è più simile ad una rappresentazione 3-D grazie all'elevato contrasto fra i versanti soleggiati, più caldi, e quelli in ombra, abbastanza freddi da apparire ora come strutture scure alquanto uniformi. Ciò comporta una maggiore sensazione di rilievo topografico da questa parte della scena e evidenzia anche le valli. Alcuni toni medi, come in **v**, sono legati alla dispersione di calore in corrispondenza della copertura erbosa. Un punto estremamente luminoso, ma isolato, in **h**, coincide con la Morro Rock che, essendo una nuda roccia con versanti irti, assorbe la radiazione solare e si riscalda a tal punto da divenire una sorgente significativa di energia termica. I centri abitati etichettati in giallo sono in toni medi di grigio, dimostrandosi così più freddi dei versanti collinari naturali ma al loro interno ci sono molti toni più chiari in corrispondenza delle aree centrali, solitamente più calde di quelle residenziali (caratterizzate da più prati e più alberi).

L'acqua, che ha una capacità termica notevolmente maggiore di quella della maggior parte dei materiali "secchi" reperibili al suolo, tende comunque ad apparire, nelle immagini diurne dell'infrarosso termico, più fredda delle superfici sulla terra riscaldate in modo diretto. Questo è evidente nell'immagine, in cui oceano e baia sono entrambi in toni di grigio medi. Se la ripresa fosse notturna l'acqua apparirebbe molto più chiara del suolo circostante avendo trattenuto gran parte del calore interno, mentre la terra re-irradiava l'energia solare assorbita perdendo calore e raffreddandosi a temperature inferiori a quella dell'acqua. Una struttura irregolare di strisce in toni di grigio più chiari qui non è "reale" ma si tratta di un effetto di rumore nella risposta del sensore. C'è una struttura anomala e significativa allo stesso tempo. Nelle acque a nord ovest di Morro Rock è visibile un'area chiara che penetra nell'oceano dalla costa e che lascia pensare ad un'immissione di sedimenti. Ciò è esattamente quello che ci si può attendere dalla vicina centrale elettrica (in **t**) che scarica l'acqua calda di risulta in un'area di acque stagnanti nelle vicinanze.

Torniamo, per un momento, alle altre due bande nel visibile, Landsat TM 2 e 3, che rivelano la radiazione riflessa nel rosso e nel verde, rispettivamente. Osserviamo prima la banda 2 (in alto) e quindi la banda 3 (in basso)

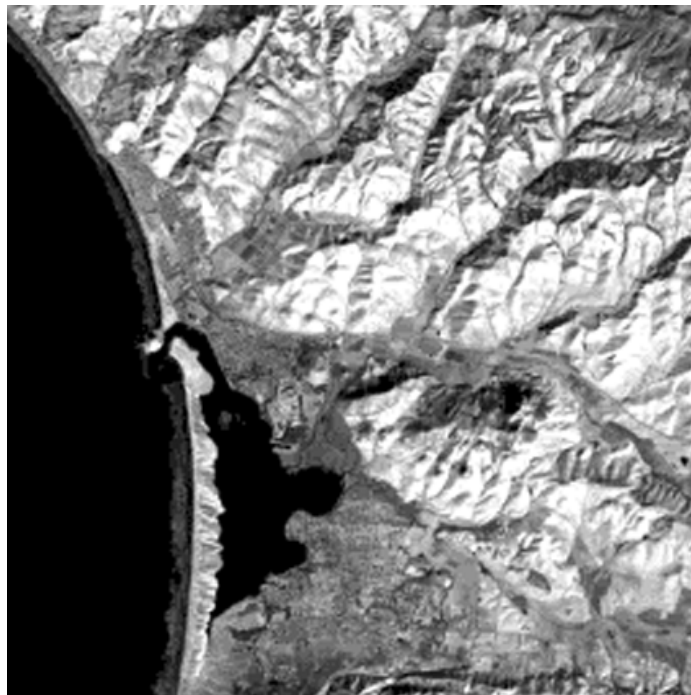


e confrontiamo ciascuna di tali bande con le bande 1 e 4. Nel complesso, ad uno sguardo superficiale, sembra esserci una differenza minima nelle variazioni tonali fra gli elementi presenti dalla banda 1 alla 3. La variazione più percepibile è la diminuzione delle strutture associate ai sedimenti oceanici nel passaggio dalla banda 1 alla 3. I versanti collinari esposti al sole appaiono un pò più luminosi in banda 3 che nelle altre due bande, probabilmente a causa della componente rossa riflessa da una superficie coperta da suolo ed erba scuri.

Per le apparenti similitudini di tono delle principali strutture viste nelle prime tre bande, ci si potrebbe domandare in che modo la loro combinazione in un color composite, che presto analizzeremo, possa risultare nelle nette differenze di colore che effettivamente ne risultano. La risposta è sottile e piuttosto complessa, ma la ragione fondamentale è questa: quando sono generate, le immagini relative alle singole bande sono elaborate al fine di ottenere dei contrasti opportuni. Le immagini prodotte hanno variazioni di tono simili per le classi al suolo poichè gran parte di

queste strutture hanno pressochè la stessa differenza relativa in riflettanza in ciascuna banda. Però, di fatto, i valori assoluti della riflettanza (parzialmente tradotti nei DN, Digital Numbers) variano molto da una banda alla successiva. Quindi un elemento che riflette nel verde potrebbe avere un valore medio di DN maggiore in banda 2 che in banda 1 o 3 e ciò contribuirebbe ad una maggiore intensità della componente verde in un color composite.

Concluderemo la nostra rassegna sulle rappresentazioni in bianco e nero delle singole bande visualizzando la banda 5. Questa, centrata sugli 1.65 μm , assomiglia soprattutto alla banda 7, ma osservando i dettagli della 7 e della 5 si dovrebbero evidenziare numerose piccole differenze. Lungo la striscia di spiaggia (c), la banda 5 mostra toni un pò più scuri, con delle strutture nella sabbia diverse da quelle dovute alla vegetazione. Come in banda 7, i frangenti hanno perso gran parte della loro riflettanza e appaiono in toni medi di grigio con zone più chiare. La misteriosa struttura (s) ha un buon contrasto interno che mette in risalto le geometrie distintive che rivelano la sua identità. La struttura delle aree urbane, definita dalla rete viaria che la attraversa (i centri abitati sono etichettati in giallo nella mappa) è più confusa in banda 5. Le due righe di punti bianchi che rappresentano i serbatoi in prossimità della centrale elettrica (t) scompaiono quasi del tutto in banda 5 (e in banda 7).



Prima di interrompere questa descrizione della banda 7, vogliamo accennare ad un tema secondario che però mette in luce un tipico uso improprio cui sono soggette le immagini da satellite. Si osservi una qualsiasi delle bande di riflettanza (ma in particolare la 5 e la 7) nei punti chiamati w. Sono visibili due linee scure e sottili quasi rette. Si tratta di fenomeni comuni nelle immagini satellitari e nelle fotografie effettuate da aereo. Esaminando il resto dell'immagine scelta se ne trovano altre (sebbene talvolta si abbia a che fare con reali contorni netti che separano due diverse strutture o classi). Ai primordi delle applicazioni Landsat molti geologi riferivano che il sensore MSS (e in seguito il TM) era particolarmente indicato all'estrazione di queste linee. Buona parte di queste furono identificate come strutture geologiche naturali, faglie o sistemi di fratture. Furono prodotte e spesso rese pubbliche mappe in cui erano presenti numerose presunte faglie/fratture senza adeguati controlli sul campo.

Quando studi accurati discreditarono questa interpretazione per molte di queste strutture (anche se per un numero rilevante di queste ne fu confermata la correttezza) questo utilizzo del Landsat condusse a scetticismo diffuso e a critiche negative. Attualmente "cautela" è la parola d'ordine e si procede attraverso analisi molto accurate in questo campo. Per inciso, la natura di due delle linee discusse in **w** non è stata ancora determinata all'epoca della scrittura di questa sezione, ma una delle due è molto probabilmente vegetazione che costeggia uno stretto rigagnolo. Il fatto che le due linee convergano potrebbe essere una coincidenza e non prova alcuna comunanza di identità.





Rappresentazione in falsi colori

Siamo ora nelle condizioni di perfezionare la nostra elaborazione d'immagini anzitutto generando la prima composizione a colori (color composite).

Cominciamo con il produrre la rappresentazione in falsi colori convenzionale, che si ottiene assegnando la banda TM 2 (verde) al canale blu del monitor, la 3 (rosso) al canale verde, e 4 (infrarosso vicino o fotografico) al rosso.



- TM Band 4 = rosso
- TM Band 3 = verde
- TM Band 2 = blu

Due gruppi di colori dominano le classi al suolo: i rossi, che rappresentano la vegetazione, e i grigio-marroni medi, posti soprattutto in corrispondenza dei versanti luminosi con esposizione al sole. Oceano e baia sono visualizzati in profondi toni blu che, in prossimità della costa (**a**), diventano più chiari per via degli strati più spessi di sedimenti che aumentano la riflettanza. I frangenti sono visibili in forma di strutture bianche e blu.

Le diverse tipologie di vegetazione possono essere collocate in specifiche categorie in base al tipo di rosso e in molti casi anche alla loro geometria spaziale. Il rosso continuo e piuttosto intenso in **g** rappresenta una frazione delle foreste nella Los Padres National Forest in prossimità della cresta del gruppo montuoso delle Santa Lucia Mtns. Altrove, come in **i**, sottili striscie rosse o macchie rosse irregolari (**i**) possono essere quasi sempre associate ad alberi e/o vegetazione arbustiva (**l**) che costeggia i corsi d'acqua o sparsa sui versanti collinari. Aree in rosso chiaro nelle valli,

alcune rettangolari e altre meno regolari, in **k** e in altri punti, sono esempi di aree coltivate e prati di fieno. Le zone ritenute aride a vari livelli, come **m** e **o**, sono in toni grigio-marrone più scuri ma talvolta hanno deboli sfumature rosa che lasciano supporre una limitata copertura di vegetazione. Dove la vegetazione è rara e sparsa sulle colline, in particolare quando ben illuminate dal sole, la prevalenza di tonalità brune nei colori grigio-marroni è legata al contributo del suolo sottostante combinato con le riflettanze delle erbe marroni (con un segnale molto più debole in banda 4).

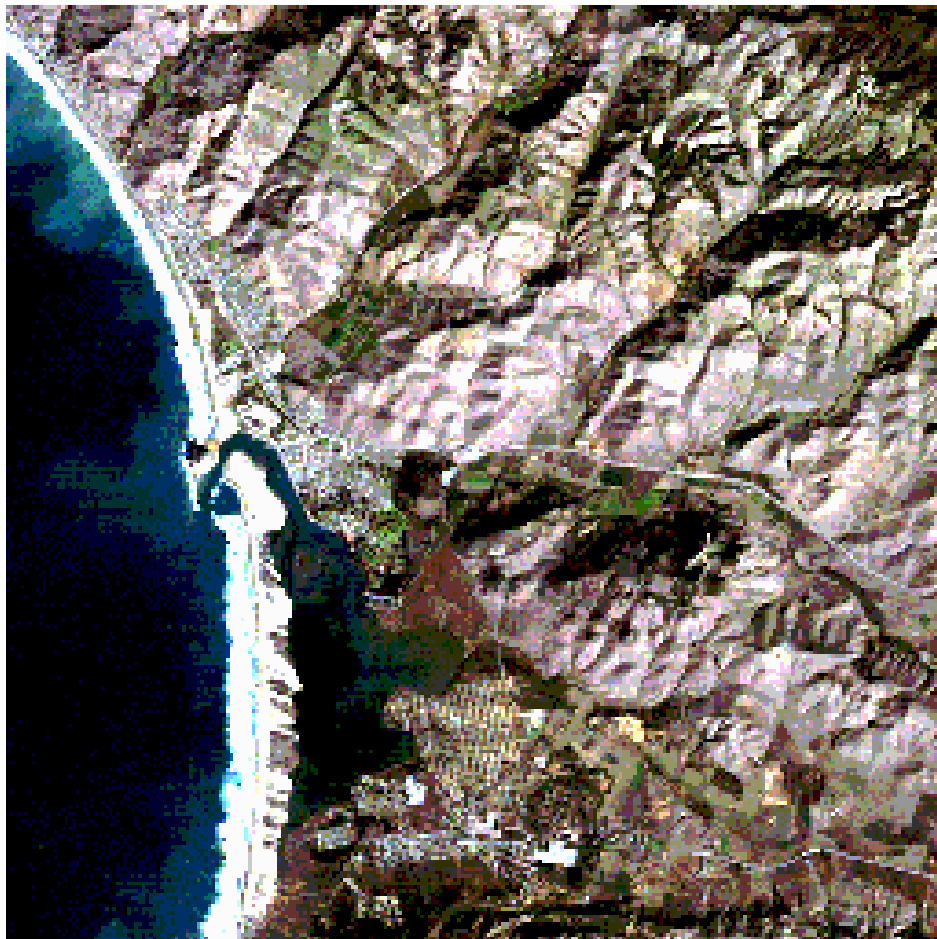
Le aree in cui si ritiene vi sia erba a crescita più rapida, come **v**, hanno un tono rosso-arancio definito. La vegetazione nelle zone umide costiere (**o**) assume un tono arancio chiaro distintivo, che suggerisce la colorazione rossa di alcune delle piante (si ricordi che l'arancio può risultare da un'intensità maggiore di luce filtrata nel verde, associata alla banda rossa nel color composite. L'area misteriosa **s** in prossimità della zona umida, ingrandita a sinistra, è di un rosso luminoso che rivela la presenza di vegetazione molto riflettente nell'IR reperibile in località dove le piante sono lussureggianti (se non hai ancora indovinato l'identità di questa struttura questo potrebbe essere un indizio decisivo).



Le aree urbane sono delineate ancora una volta attraverso le strade. Queste, come la Autostrada 1 e altre arterie principali, sono in toni blu, prevedibili a causa della loro grande luminosità nelle bande 1 e 2 (associate al blu in questo contesto). La mescolanza di tonalità in Los Osos, con del giallo-bruno qua e là, fornisce alla zona una impronta di colore diversa da quella di Morro Bay; ciò sarà più evidente esaminando il color composite successivo. Entrambe le aree urbane contengono dei segmenti con tratti rossi che corrispondono a zone residenziali, parchi o altri luoghi dove crescono alberi o erba. Le cave estrattive (**u**) sono estremamente luminose, con sfumature blu.

Rappresentazione in colori reali

La scena riportata mostra la regione della Morro Bay in colori quasi naturali, ottenuti assegnando alla banda 1 il blu, alla 2 il verde, e alla 3 il rosso.



In pratica, sono utilizzati diversi algoritmi di rappresentazione a colori per facilitare l'interpretazione dell'immagine, mentre un trattamento analitico è generalmente applicato ai DN originali dei pixel. Questi contengono tutta l'informazione presente nella scena e, sebbene l'intervallo di valori assunti potrebbe rendere necessaria una conversione ad altro range per una migliore visualizzazione, non viene aggiunta

alcuna informazione. In realtà, sebbene l'interpretazione visuale sia semplificata nell'immagine elaborata, c'è stata una perdita di informazione e una distorsione, per cui nei processi analitici si utilizzano i valori DN originali o questi tradotti in termini di radianze calibrate.

Con questa elaborazione il risultato è un'immagine piacevole e soddisfacente che mostra il mondo visto dall'alto nei colori a cui siamo solitamente familiari. Cerca di immaginare come ti apparirebbe questa scena se vi stessi volando sopra con un aeroplano.

Probabilmente osserveresti che l'oceano appare troppo scuro nella composizione a colori del TM. Ciò è legato ai toni generalmente scuri di tutte le bande, conseguenza dell'abilità dell'acqua di assorbire la luce in quasi tutto l'intervallo di frequenze nel visibile. L'unica eccezione è, naturalmente, legata ai frangenti (qui con una limitata struttura interna) che sono molto efficienti nella diffusione della luce. Le strutture associate ai sedimenti che abbiamo visto variare passando dalla banda 1 alla 3 sono nettamente distinguibili in questa rappresentazione a colori in cui le aree di maggior densità introducono toni verdi (la banda 3 [rosso] mostra soltanto le aree con maggiore densità di sedimenti). Nota in particolare i toni scuri bruno-verdi ai confini del delta dove nasce la zona umida costiera, interpretabili come l'espressione di un carico pesante rilasciato alla foce del piccolo fiume (**p**) che vi scorre sopra.

Probabilmente il colore meno realistico di questa scena in colori reali è quello associato ai luminosi versanti collinari. In questa rappresentazione, il colore di base è bruno con sfumature violette ma vi sono piccole zone caratterizzate da un marrone più scuro che, osservato al livello del suolo, mostrerebbe elementi verdi. Il color composite mostra queste superfici in maniera ingannevole. Da un aeroplano le si potrebbe descrivere come di un colore bruno-dorato chiaro (per via dell'erba secca, uno dei motivi per cui la California è spesso chiamata "Golden State" - "Stato d'Oro"), il che meglio si accorda con la visualizzazione nella prima versione della rappresentazione a colori. La ragione per la colorazione rosso-bruno-violacea è che la luce proveniente dalle superfici orientate in particolari direzioni contribuisce a gran parte del rosso in banda 3, a parte del blu (quindi viola) in banda 1 e ad una piccola quantità di verde in banda 2.

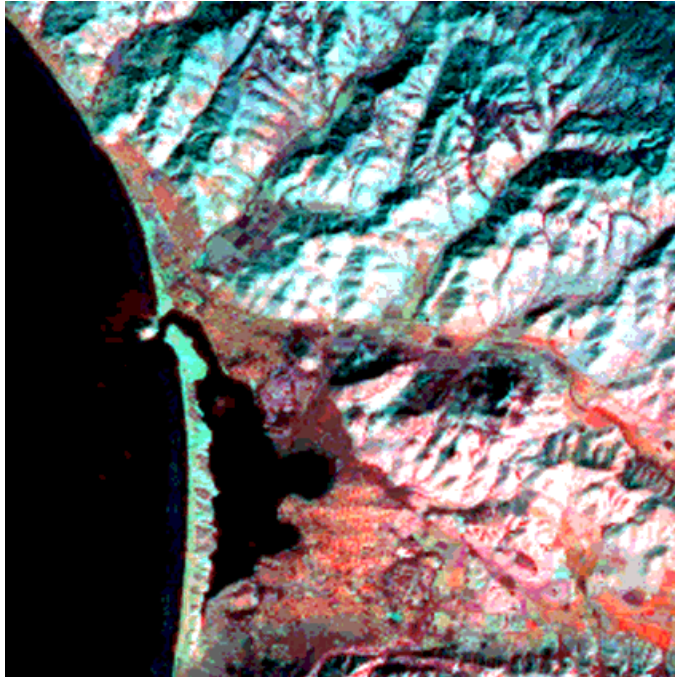
Le aree che abbiamo ipotizzato essere prati in fase di crescita (**v**) appaiono nell'immagine a "colori reali" in un bruno rossastro. Aree associate ai campi e ai prati sono di un bruno medio. La maggior parte delle zone associate alla gamma di rossi medio-scuro nella composizione in falsi colori sono molto scure nella versione a colori naturali. Questo è particolarmente vero per la National Forest cresciuta attorno a (**u**), la vegetazione che borda il corso d'acqua (**i**) e le zone alberate (**l**) sparse nella scena. La riduzione della quantità di verde può essere spiegata in questo modo: la vegetazione è composta in gran parte da querce della California, che hanno foglie verde scuro, oppure da qualche altro sempreverde che tende ad essere meno riflettente delle piante decidue, da cui la scura tonalità bruna. Queste foglie, o aghi, hanno generalmente una riflettanza bassa nelle bande 1-3 ma sono riflettori efficienti (dalle membrane cellulari) in banda 4.

La zona umida costiera (**o**) è visibile in bruno rossastro nella visualizzazione a colori reali. In questa versione in colori naturali, la struttura misteriosa a **s** è al massimo della sua nitidezza e appare come un mosaico di strisce allungate in toni di verde chiaro. Se non l'hai già identificata, ti risulterà ora chiaro che si tratta di un campo da golf a 18 buche.

Ci sono diverse parti dell'immagine che contengono toni distintivi arancio-bruni, come in x. Questa è apparentemente una peculiarità dei terreni che hanno un colore bruno più ricco. L'effetto è visibile anche nelle valli a nord e ad est di Los Osos e in parte della stessa città. Questa valle sembra avere il suo piccolo corso d'acqua (non facilmente risolvibile) o forse un tempo aveva un fiume più grande ora scomparso. Molto probabilmente questo tipo di valle è sommersa da depositi alluvionali che sono tipicamente più scuri (evidenziati da ossidi di ferro simili alla ruggine in formazione).

Altre combinazioni di colori

Con una certa riluttanza abbandoneremo questo color composite così attraente per esaminarne altri realizzati con le bande 5, 6, e 7 in diverse combinazioni. La prima associa il blu alla 5, il verde alla 7 e il rosso alla 6.



- TM Band 6 = rosso
- TM Band 7 = verde
- TM Band 5 = blu

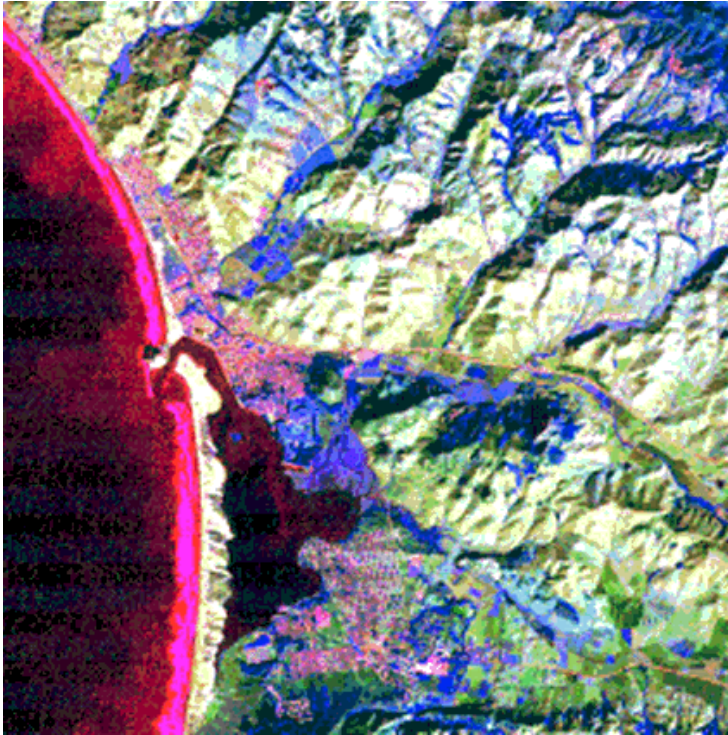
Questa combinazione sovrappone la banda termica, sensibile alla radiazione emessa, (con i suoi pixel a bassa risoluzione a 120 m) con due bande infarosse, 5 e 7 (con pixel di 30 m). In questo color composite la banda termica (si osservi nuovamente la banda 6) ha un ruolo dominante. I due colori, rosso e blu, superano abbondantemente la quantità di verde introdotta dai toni chiari in banda 7. I rossi generalmente rappresentano le superfici più calde, e i blu le più fredde, registrate in banda 6. Si osservi che i blu si estendono su una superficie maggiore dei versanti collinari rispetto a quanto ci si potrebbe attendere dalle ombre osservate nelle altre bande; in altri termini, la maggior parte dei versanti che ricevono meno luce solare diretta emettono una quantità inferiore di radiazione termica. In ogni caso, alcune aree blu che si trovano sui versanti esposti al sole sono occupate da vegetazione di alta quota in g e da praterie in v che compensano l'effetto di riscaldamento diretto con il raffreddamento associato all'evapotraspirazione. Altre zone coperte da vegetazione, come in y, e lungo corsi d'acqua sono in toni di rosso più scuri, non perchè siano più caldi ma a causa dei loro toni più scuri (sono quasi assenti le componenti blu o verdi) nelle bande 5 e 7.

Entrambe le comunità urbane sono caratterizzate da diverse sfumature di rosso, con la struttura delle strade ben visibile grazie alla loro maggiore definizione nelle bande 5 e 7. Ciò è in parte dovuto all'effetto termico dell' "isola urbana", la tendenza delle aree popolate a riscaldarsi per la presenza di materiali che assorbono il calore (strade più strette, tetti coperti di catrame, ecc.), per la riduzione delle superfici coperte da vegetazione, il calore emesso dalle fornaci, i condizionatori d'aria, e altre attività umane. E' nettamente percepibile il flusso termico proveniente dalla centrale elettrica (t) ma i sedimenti oceanici non introducono effetti degni di nota.

Alcune aree in verde nel color composite includono la striscia di spiaggia e molte delle cave estrattive (u). Queste superfici sono molto riflettenti nella maggior parte delle bande quindi i loro toni chiari nelle bande 5 e 7 combinano i blu e i verdi assegnati a

queste bande mentre la loro ridotta risposta in banda 6 (i materiali riflettenti non si riscaldano molto) elimina i toni rossi.

Proviamo brevemente a combinare una delle bande IR più riflettenti (la 7, assegnata al verde) con la banda della vegetazione TM 4 (blu) e quella dei sedimenti e delle acque oceanici (TM 1, in rosso). Il risultato è una rappresentazione a colori che evidenzia al meglio certe strutture.



- TM Band 1 = rosso
- TM Band 7 = verde
- TM Band 4 = blu

Ancora, i blu e i rossi sono i colori prevalenti, mentre i verdi sono in secondo piano. I blu sono quasi totalmente correlati con la vegetazione, e garantiscono un buon contrasto con le aree carenti di tale copertura o rivestite di erbe non in fase di crescita (si osservi come le aree di praterie in crescita siano in blu più chiaro). I rossi sono associati a tre principali classi di superficie: le onde (al cui interno sono visibili toni blu-violetti che rappresentano il contributo della banda 4); i sedimenti; e i centri abitati, con le strade rosse punteggiate di blu (la vegetazione locale). I verdi sono principalmente confinati a tipologie specifiche più luminose in banda 7 e più scure nella 1 e nella 4, incluse le aree sulle colline che circondano Los Osos e alcune aree incolte (**m**) nelle vallate. Si osservino i verdi sparsi lungo i versanti altrimenti molto chiari.

Tecniche di Enfattizzazione

Ora che abbiamo acquistato familiarità con le singole bande del TM e con i colori composte attraverso l'immagine di esempio, dobbiamo analizzare le potenzialità di alcuni fra gli algoritmi più comuni utilizzati per migliorare la qualità di una immagine. Questi rientrano nel gruppo di tecniche dette di enfattizzazione delle immagini (Image Enhancement). L'obiettivo delle funzioni di processamento delle immagini raggruppate sotto il termine di enfattizzazione delle immagini è unicamente di migliorare una immagine per facilitarne l'interpretazione visiva e l'analisi. Esempi di funzioni di enfattizzazione includono lo stretching del contrasto, utilizzato per aumentare le differenze di tono tra i diversi elementi in una scena, il filtraggio spaziale, per esaltare (o sopprimere) specifiche strutture in una immagine, ma anche le operazioni aritmetiche (come sottrazione, addizione, moltiplicazione e divisione) per combinare e trasformare le bande originali in nuove immagini che meglio visualizzano o evidenziano certe caratteristiche nella scena. Lo stretching è già stato utilizzato su tutte le immagini TM analizzate fino ad ora per ottenere una migliore visualizzazione.

Adesso analizzeremo alcune di queste operazioni inclusa una procedura chiamata "Analisi delle Componenti Principali" che è usata per rappresentare in maniera più efficiente le informazioni in una immagine multispettrale.

Contrast Stretching

Il contrast stretching implica l'utilizzo di una diversa distribuzione e un diverso intervallo di valori dei DN. Sia un osservatore casuale che un esperto concluderebbero, in seguito all'osservazione diretta, che la modifica dell'intervallo dei toni chiari e scuri (livelli di grigio) in una foto o in una visualizzazione con il computer, è spesso l'operazione più efficace per estrarre importanti informazioni dalla scena.

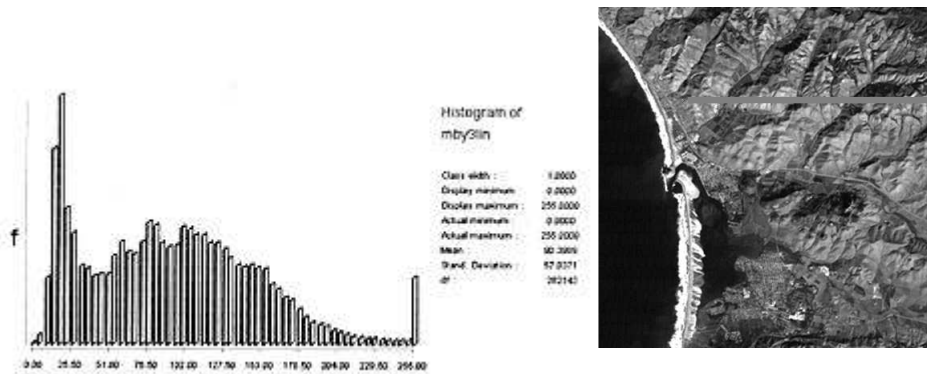
Il contrast stretching nell'elaborazione di dati digitali con un computer è un'operazione di routine, sebbene sia necessaria una certa abilità nella selezione delle specifiche tecniche e dei parametri (estremi dell'intervallo considerato). Per i dati Landsat, il range dei DN per ciascuna banda, per l'intera scena o per una sottoscena abbastanza grande, è calcolato e visualizzato in forma di istogramma (si osservi l'istogramma per la TM 3 di Morro Bay, vista in precedenza). Generalmente la distribuzione dei DN (livelli di grigio) è unimodale e Gaussiana, sebbene sia anche probabile una certa asimmetria. Le distribuzioni multimodali (più frequentemente bimodali, ma talvolta polimodali) si ottengono quando una scena contiene due o più classi dominanti con intervalli di riflettanza distinti (in genere piuttosto stretti). I limiti superiore ed inferiore di luminosità tipicamente abbracciano solo parte (dal 30 al 60%) dell'intervallo totale disponibile. I pochi valori che si trovano a più di 1 o 2 deviazioni standard possono in genere essere trascurati (taglio dell'istogramma) senza perdite significative del contenuto dei dati iniziali.

Questo taglio consente l'espansione dei nuovi limiti, più ravvicinati, all'intera scala (0-

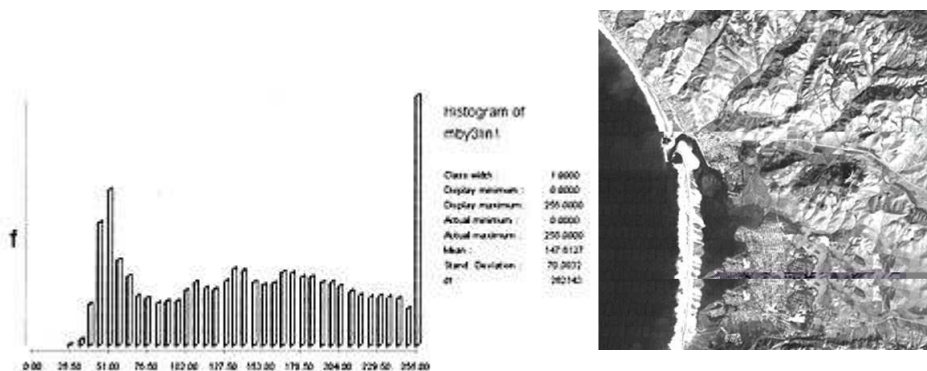
255 per i dati Landsat). L'espansione lineare di DN in questa scala completa è un'opzione diffusa.

Per illustrare il contrast stretching (noto anche come autoscaling) applicheremo la funzione di stretching alla banda 3. Si ricordi che l'istogramma di valori TM non elaborati ha una distribuzione stretta con un picco in corrispondenza di bassi valori di DN. In base a questa considerazione si può presumere un'immagine scura e piatta. In effetti lo si vede chiaramente sotto:

La maggior parte dei valori, in ogni caso, si trova nell'intervallo di DN fra 9 e 65 (ci sono valori fino a 255 nella scena originale ma sono in numero ridotto). Possiamo applicare un semplice stretching lineare in modo che il 9 divenga un 5 e il 65 un 255, con tutti i valori compresi redistribuiti in proporzione. Ecco l'istogramma risultante, e, accanto, la nuova immagine.

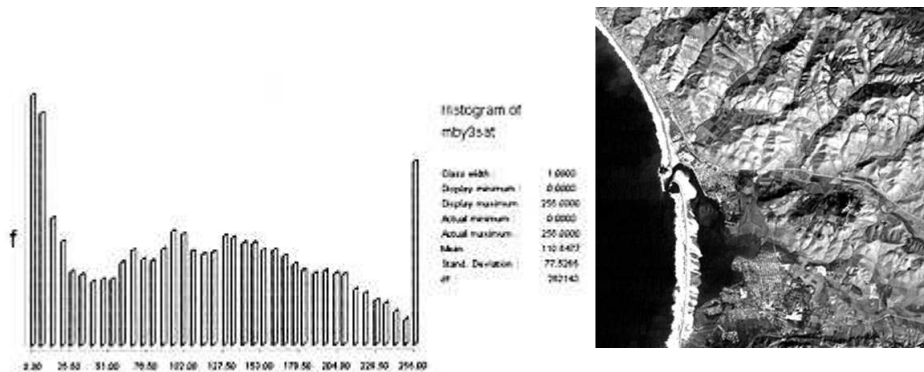


Ora molte delle strutture presenti nella scena sono distinguibili. Ma l'immagine è ancora piuttosto scura. Proviamo a scegliere nuovi limiti, espandendo l'intervallo di DN 5-45 in 0-255. L'immagine che ne consegue è questa:



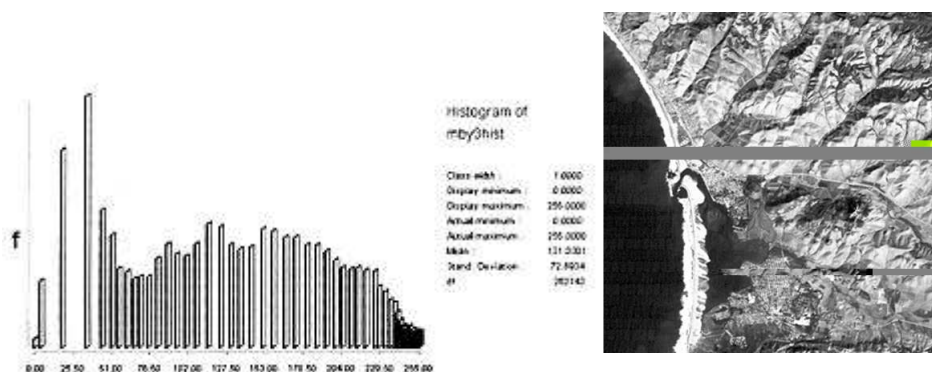
L'istogramma per questa immagine, elaborata in modo diverso, è polimodale, con il limite inferiore prossimo a 25 e un gran numero di DN attorno a 255. Questo spiega la maggiore luminosità dell'immagine (toni chiari).

Come passo successivo applichiamo uno stretching lineare con saturazione. Assegneremo al 5% dei pixel agli estremi (sulle code) dell'istogramma dei singoli valori. L'istogramma e l'immagine che ne derivano sono:



L'immagine appare non molto diversa dalle precedenti. Ma il confronto con una delle immagini cui si è applicato uno stretching lineare evidenzia la presenza di differenze effettive e significative.

Infine applichiamo uno stretching con equalizzazione dell'istogramma, con questi risultati:



L'immagine è simile alla versione con saturazione. Nota che le frequenze dei pixel sono sparse in corrispondenza di bassi DN e densamente raggruppate per valori alti.

Ribadiamo in conclusione che nessun'altra procedura o funzione di elaborazione può fornire altrettante informazioni o ausili all'interpretazione visiva quanto lo stretching. E' il primo passo, e la funzione più utile, da applicare ai dati grezzi.

Filtri spaziali

Un'altra tecnica di elaborazione, che spesso fornisce preziose informazioni di diversa natura, è il filtraggio spaziale. Si tratta di una tecnica per esplorare la distribuzione su un'immagine di pixel di luminosità variabile e soprattutto per individuare ed evidenziare le discontinuità di contorno. Queste variazioni nell'illuminazione della scena, tipicamente graduali anziché improvvise, producono qualcosa che può essere espressa quantitativamente in termini di "frequenze spaziali". La frequenza spaziale è definita come il numero di cicli di variazioni nell'immagine dei valori DN per unità di distanza (per es. 10 cicli/mm) lungo una particolare direzione. Un'immagine con una sola frequenza spaziale consiste di strisce equispaziate (linee raster); per esempio, uno schermo TV "vuoto" con

l'apparecchio acceso mostra delle strisce orizzontali - ciò corrisponde ad una frequenza zero in direzione orizzontale e ad un'alta frequenza spaziale in direzione verticale.

In generale, le immagini di interesse pratico consistono di numerose frequenze spaziali dominanti. Dettagli fini in un'immagine corrispondono ad un maggior numero di variazioni per unità di distanza che in un'immagine più grossolana. La tecnica matematica per estrarre da un'immagine tutte le varie componenti di frequenze spaziali è l'analisi di Fourier. Dopo che un'immagine è stata scomposta nelle sue componenti (risultato che si ottiene attraverso una trasformazione di Fourier), è possibile mettere in risalto alcuni gruppi (o "bande") di frequenze rispetto ad altri e ricombinare le frequenze spaziali in un'immagine enfaticizzata. Gli algoritmi utilizzati a questo scopo sono chiamati "filtri" poiché sopprimono (de-enfatizzano) alcune frequenze e ne lasciano passare (enfaticizzano) altre. I filtri che lasciano passare le alte frequenze e, quindi, mettono in rilievo i dettagli fini e i contorni, sono noti come filtri passa-alto. I passa-basso, che sopprimono le alte frequenze, risultano utili per smussare un'immagine, e possono ridurre o eliminare il rumore tipo "sale e pepe".

I filtri convolutivi sono comuni tecniche matematiche utilizzate per l'implementazione dei filtri spaziali. In questi, il valore di ciascun pixel è sostituito dalla media dei valori dei pixel all'interno di un quadrato centrato sul pixel iniziale. Tipiche dimensioni di tali quadrati sono 3 x 3, 5 x 5, o 9 x 9 pixel ma sono possibili anche altri valori. Come accade nel filtro passa-basso, il risultato di queste operazioni è quello di ridurre le variazioni rispetto alle medie locali e quindi di ridurre il contrasto nell'immagine. La differenza fra l'immagine iniziale e la stessa dopo l'applicazione di un passa-basso coincide con il risultato di un'operazione di passa-alto. In genere alle immagini filtrate spazialmente dev'essere applicato uno stretching per aumentare il contrasto utilizzando l'intero intervallo dei valori a disposizione per la visualizzazione. Nonostante questo, le immagini filtrate tendono ad apparire piatte.

Applicheremo tre tipi di filtri alla banda TM 2 relativa alla Morro Bay. La prima immagine si riferisce ad un prodotto a cui è stato applicato un passa-basso, che tende a generalizzare l'immagine:

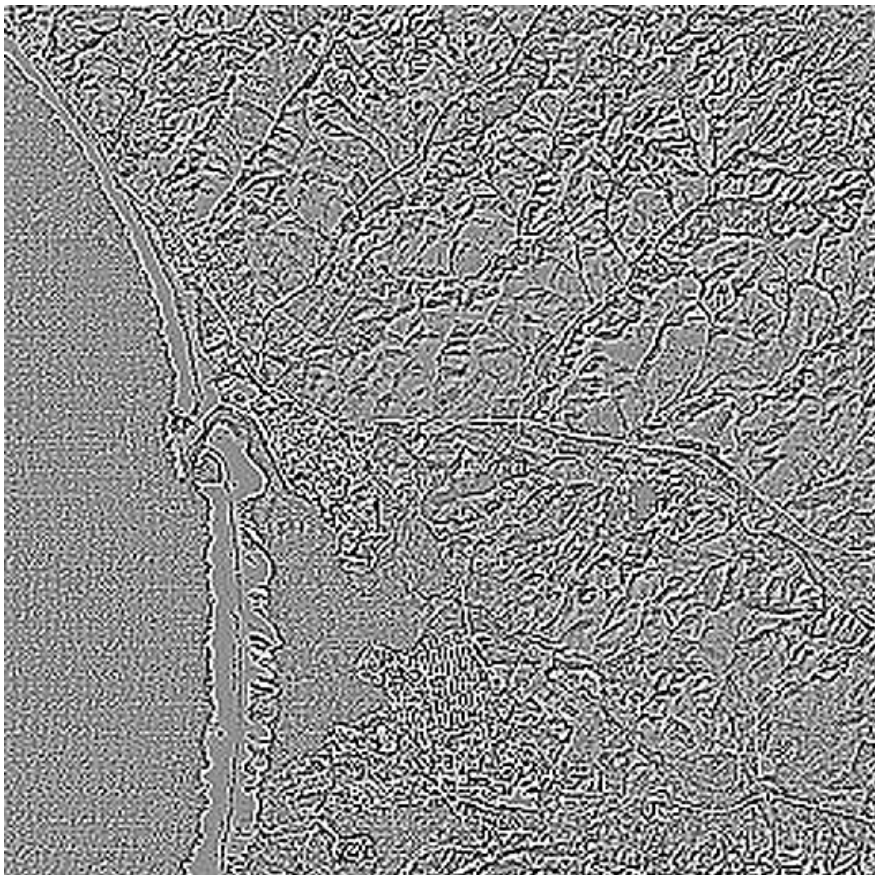


Un filtro di enfattizzazione dei contorni evidenzia le discontinuità improvvise, come le giunture rocciose e le faglie, i contorni dei campi e le strade:



In questo esempio la scena conserva in generale il suo aspetto iniziale ma sono estratte le strade e sono meglio definite alcune creste montuose. Sono anche più facilmente visibili i contorni delle zone con i sedimenti.

Anche il filtro passa-alto applicato all'immagine di Morro Bay estrae i contorni:



Qui le strade e le autostrade, e alcuni corsi d'acqua e creste montuose, sono decisamente enfatizzati. Segno distintivo di un'immagine cui è stato applicato un passa-alto sono le strutture lineari visibili come linee chiare con un contorno scuro. I dettagli in acqua sono in gran parte perduti. Buona parte dell'immagine appare piatta.

Analisi delle Componenti Principali

Siamo pronti ora ad un breve "tour" attraverso le immagini prodotte attraverso la PCA o Principal Components Analysis (analisi delle Componenti Principali). Per produrre tali immagini utilizzeremo tutte le 7 bande e genereremo tutte le 7 componenti (il numero di componenti è fissato, cioè è uguale, dal numero delle bande). La prima Componente Principale spiegherà la massima entità delle variazioni nello spazio a 7 dimensioni definito dalle 7 bande del Thematic Mapper. Tenendo presente che molte delle strutture tonali nelle singole componenti non sembrano essere associate a specifiche tipologie o classi identificate nelle bande TM e rappresentano invece combinazioni lineari dei valori originali, analizzeremo ciascuna di queste componenti ma commenteremo solo quelle strutture che si prestano ad una qualche interpretazione.

In realtà sono fra le caratteristiche ordinarie della prima componente la sua somiglianza ad una fotografia standard in bianco e nero e il fatto che essa contiene la maggior parte delle informazioni pertinenti alla scena. I rilievi sono visualizzati in modo più realistico grazie allo smussamento del netto contrasto chiaro-scuro evidente in quasi tutte le bande TM. Osserva la struttura interna delle onde e l'assenza di alcuna indicazione della presenza di sedimenti in mare. L'istogramma della prima PC ha due picchi. Il primo, sulla sinistra, è associato ai pixel oceanici e il secondo, a destra, ai pixel al suolo.

Analizzando l'istogramma della seconda PC si osserva come sebbene il range complessivo (valore massimo - valore minimo) sia più grande di quello per la prima PC, la maggior parte dei pixel si colloca in un piccolo intervallo attorno alla media (49). Quindi come accade di solito la seconda PC ha una varianza inferiore (varianza = deviazione standard al quadrato) della prima PC. A causa dell'assemblamento dei pixel in un piccolo intervallo la visualizzazione dell'immagine non è ottimale (a sinistra). Per rendere l'immagine più distinta (a destra),

ZOOM

ZOOM

la espanderemo (con uno "stretching" numerico) e equalizzeremo l'istogramma del risultato. Questo procedimento (equalizzazione dell'istogramma) produce un istogramma in cui la spaziatura fra i valori più frequenti è aumentata e i valori meno frequenti sono combinati e compressi. Se non avessimo effettuato questa trasformazione, l'immagine sarebbe apparsa piatta come sopra, con due unici livelli di grigio a rappresentare gran parte del suolo e addirittura uno per l'oceano. In ogni caso le distinzioni prima minime sono ora amplificate e di più immediata identificazione sul monitor del computer. I frangenti risaltano per la loro grande luminosità.

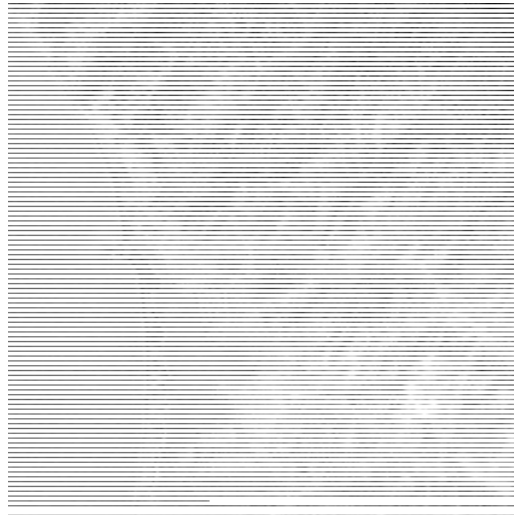
Molte delle strutture grigie nell'immagine della PC 3 in basso possono essere correlati con due classi combinate di vegetazione:



ZOOM

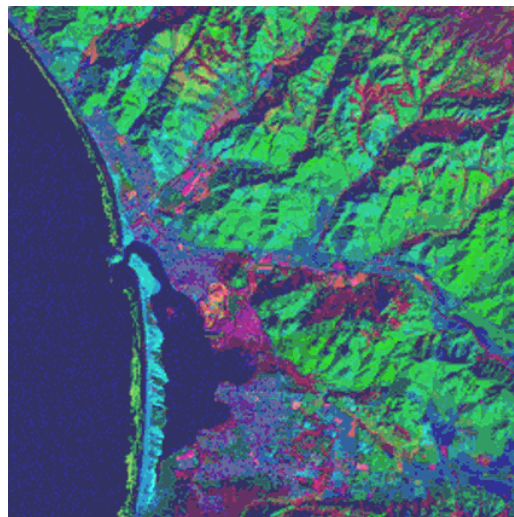
i toni più chiari sono associati ai canali nel campo da golf e a molti dei campi coltivati. I toni un po' più scuri coincidono con parte dei prati, delle foreste o delle zone alberate, e con le aree umide lungo la costa.

I frangenti scompaiono del tutto nell'immagine della PC 4 (riportata sotto) mentre il resto della scena tende ad appiattirsi con molte strutture visibili in toni medi di grigio.



ZOOM

Qualsiasi terna da queste quattro immagini di PC può dar luogo ad un color composite con diverse possibili associazioni di blu, verde e rosso; nel complesso sono possibili 24 diverse combinazioni. Fra quelle realizzate sperimentalmente per questa esercitazione l'immagine che segue



ZOOM

ottenuta da PC 4 = blu, PC 1 = verde, e PC 3 = rosso si è rivelata la più interessante. Il campo da golf ha assunto una singolare firma di colore, risulta rosso-arancio con una struttura interna. Il resto della vegetazione è in gran parte definita da toni che vanno dal rosso al rosso-violetto ma i prati (**v**) hanno un colore inusuale che si potrebbe descrivere come "arancio verdastro". I versanti più luminosi dei rilievi sono di un verde medio mentre alcune aree in ombra sono bluastre. Le aree urbane sono di un blu intenso. La striscia di spiaggia appare ora in turchese e i frangenti in prossimità di questa sono in verde oliva.

Rapporto tra bande

Un'altra tecnica di manipolazione delle immagini è nota come rapporto tra bande. Per ogni pixel, il valore del DN di ciascuna banda viene diviso per il corrispondente valore in un'altra banda. Questo quoziente fornisce un nuovo insieme di valori che possono variare da $0 = 0/1$ a $255 = (255/1)$ ma in gran parte saranno valori frazionari fra 0 e, tipicamente, 2 - 3 (per esempio $82/51 = 1.6078\dots$; $114/177 = 0.6440\dots$). Questi possono essere riscaldati in modo da ottenere un'immagine in toni di grigio a 16 o 256 livelli in funzione dei limiti della visualizzazione sul computer. Tre coppie di rapporti fra bande possono essere co-registrate e visualizzate come color composite. Alcune caratteristiche del suolo tendono ad essere evidenziate sia nei singoli rapporti tra bande che in queste composizioni in falsi colori a causa di valori dei rapporti anomali.



Mostreremo soltanto un rapporto tra bande ottenuto dividendo la banda 1 per la 4, per illustrare un prodotto caratteristico. Gran parte dell'immagine è moderatamente scura senza grandi variazioni dei livelli di grigio. Ciò implica forti affinità tra i DN di pixel corrispondenti nelle due bande. In ogni caso, i luminosi (alti DN) canali del campo da golf in **(s)** spiccano in gran contrasto rispetto ai dintorni; anche i campi coltivati risaltano in questo modo. Il terreno erboso in **(v)** ha contorni ben definiti ed è più chiaro.

Estrazione dell'informazione

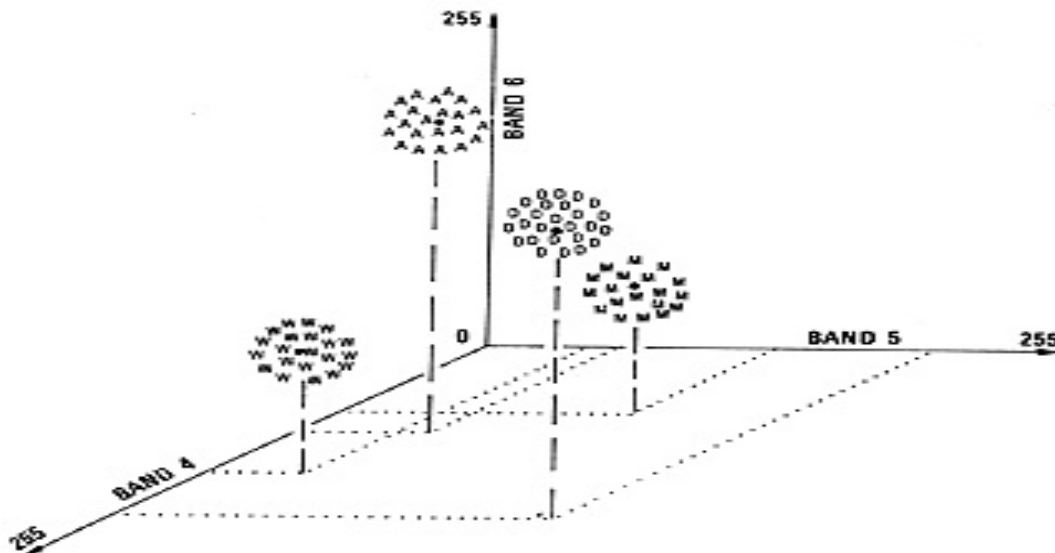
Siamo giunti alla parte conclusiva di questa sezione, in cui prenderai familiarità con i più diffusi metodi per identificare delle strutture e quindi classificare le immagini. Le operazioni di analisi e classificazione delle immagini sono usate per identificare e classificare i pixel nelle immagini. La classificazione è normalmente effettuata su set di dati multispettrali e questo tipo di processo permette di assegnare ciascun pixel di una immagine ad una particolare classe o tema sulla base di una analisi statistica dei valori di luminosità del pixel. Numerosi sono gli approcci per effettuare una

classificazione di dati digitali. Adesso descriveremo brevemente le due metodologie normalmente più utilizzate: la classificazione unsupervised e supervised o guidata.

Classificazione unsupervised

In una classificazione unsupervised (non guidata) l'obiettivo è il raggruppamento in clusters delle risposte spettrali multibanda che sono statisticamente distinguibili. Quindi, un piccolo insieme di DN per 3 bande, ad esempio, può delimitare un cluster separato, attraverso una specifica combinazione di range, da un altro cluster (e così via). La separazione dipenderà dai parametri scelti per la selezione.

Tutto ciò appare chiaro con l'aiuto del seguente diagramma per quattro classi: = Campi agricoli; D = Deserto; M = Montagne; W = Acqua. A



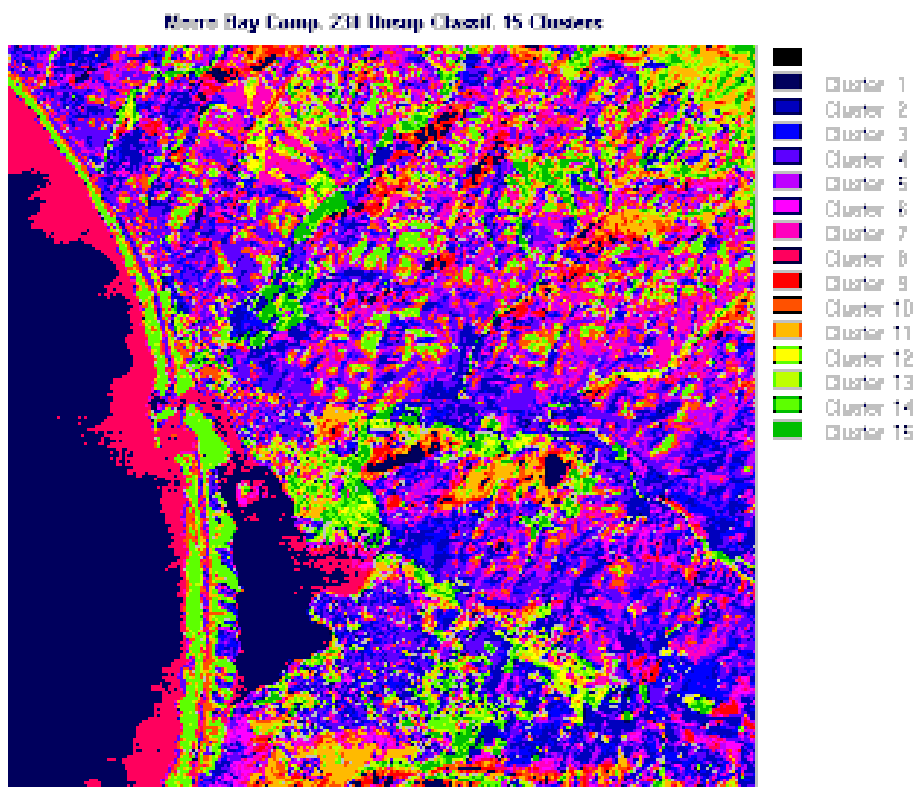
Da F.F. Sabins, Jr., Remote Sensing: Principles and Interpretation. 2nd Ed., © 1987. Riprodotto con il consenso di W.H. Freeman & Co., New York City.

Le classi possono essere modificate e corrispondentemente il numero di cluster varia in modo arbitrario. Quando le separazioni sono effettuate con l'ausilio di un computer, ciascun pixel dell'immagine sarà assegnato ad uno dei cluster in base alla collocazione delle combinazioni dei suoi DN. Generalmente, in un'area all'interno dell'immagine, l'appartenenza di un certo numero di pixel ad uno stesso cluster corrisponde ad una struttura o classe al suolo (inizialmente sconosciuta), per cui in una nuova immagine che visualizzi la distribuzione spaziale dei cluster compariranno strutture evidenziate dalla distribuzione dei livelli di grigio. A questi livelli possono essere assegnati dei colori per produrre una "mappa" dei cluster. Obiettivo successivo è quello di associare ai diversi cluster categorie sensate di oggetti al suolo. Questo deve essere fatto o sulla base di conoscenze a priori sulle classi principali attese nella scena in questione oppure, qualora sia possibile, visitando la zona ripresa, acquisendo le cosiddette "verità a terra", e correlando visivamente le strutture nella mappa con le corrispondenti a terra.

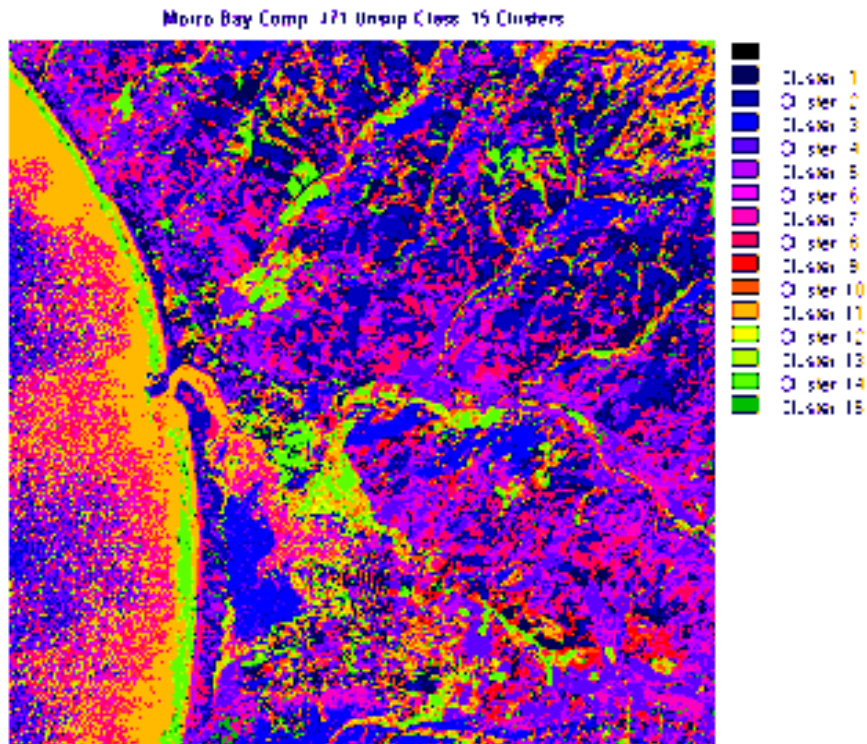
Non essendoci una selezione a priori delle classi, questo metodo è definito unsupervised.

I dati di input per una classificazione unsupervised sono i valori dei DN delle diverse bande. Gli algoritmi calcolano i valori dei cluster a partire da queste bande. Il massimo numero di cluster è determinato automaticamente attraverso i parametri selezionati nella fase di elaborazione. La tipica conseguenza di questa operazione è quella di produrre numerosissimi cluster, in numero tale che l'immagine classificata che ne risulta appare troppo intricata e difficile, quindi, da interpretare in termini delle classi assegnate.

La prima classificazione unsupervised opera sul color composite ottenuto dalle bande 2, 3, e 4. Esamina l'immagine risultante e cerca di dedurre informazioni dalle strutture di colore come indicatori delle classi al suolo, come appreso nei precedenti paragrafi.



Una conclusione probabile è: alcune delle strutture consentono di individuare agevolmente alcune delle tipologie presenti nella sottoscena della Morro Bay. Ma molte aree associate a cluster non sembrano molto ben correlate con quanto ci si attendeva di trovare in quelle zone. Sfortunatamente, ciò che ha luogo è una suddivisione alquanto artificiale delle risposte spettrali provenienti da piccoli segmenti sulla superficie, in alcuni casi si tratta semplicemente dell'effetto di piccole variazioni nell'orientazione della superficie che modificano le riflettanze o forse dell'influenza di "pixel misti". Quando consideriamo un altro composite, con le bande 4, 7 e 1, la nuova classificazione risultante ha pressochè gli stessi problemi incontrati con il primo composite.



Siamo costretti a concludere che la classificazione unsupervised costituisce un'eccessiva generalizzazione e che i cluster sono soltanto vagamente associati ad alcune delle classi effettivamente esistenti. Il risultato che ne deriva è principalmente una guida al contenuto spettrale di una scena e consente un'interpretazione preliminare, precedente all'utilizzo delle procedure, molto più potenti, della classificazione supervised (guidata).

La classificazione guidata (supervised)

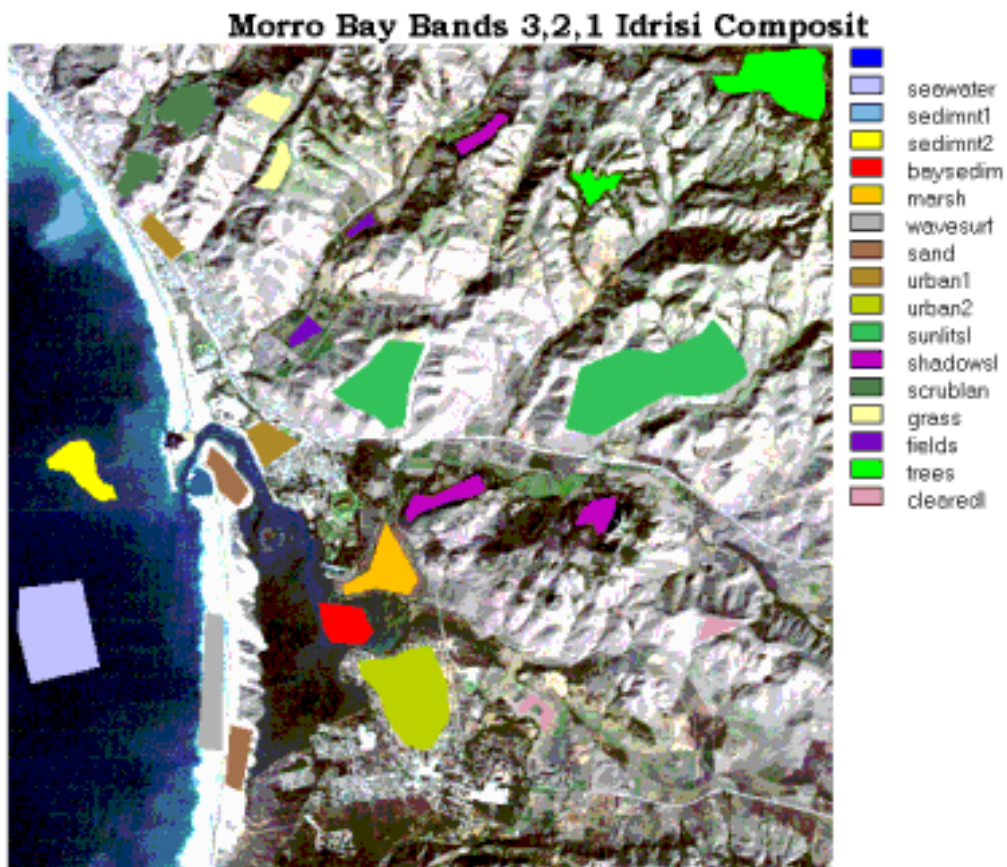
La classificazione guidata è molto più efficiente in termini di accuratezza nel caso in cui si debbano rappresentare classi la cui validità dipende enormemente dalle conoscenze e le esperienze dello specialista in elaborazione immagini. La strategia è semplice: classi convenzionali (reali e familiari) o significative (alcune volte artificiali) vengono individuate nella scena attraverso una conoscenza a priori che può essere una certa familiarità con la zona di interesse, o un riconoscimento attraverso mappe tematiche o dei sopralluoghi in campo. Ciò permette di definire classi discrete (da cui selezione "guidata") alle quali assegnare i nomi delle categorie identificate. Le **aree campione** rappresentate da ogni area conosciuta che appare abbastanza omogenea sull'immagine (in tono o colore insieme alla forma tipica della categoria) sono individuate e circoscritte in un poligono sull'immagine visualizzata aa monitor. Per ogni classe delineata vengono calcolati i valori medi e le varianze in DN per ogni banda usata nella classificazione e per tutti i pixels presenti nell'area (per ogni classe può essere definito più di un poligono).

I valori digitali vengono poi messi in grafico come funzione della sequenza di bande (in ordine di lunghezza d'onda): la curva risultante è la **firma spettrale** o la curva di risposta spettrale di quella classe (in realtà per la presenza di materiali differenti

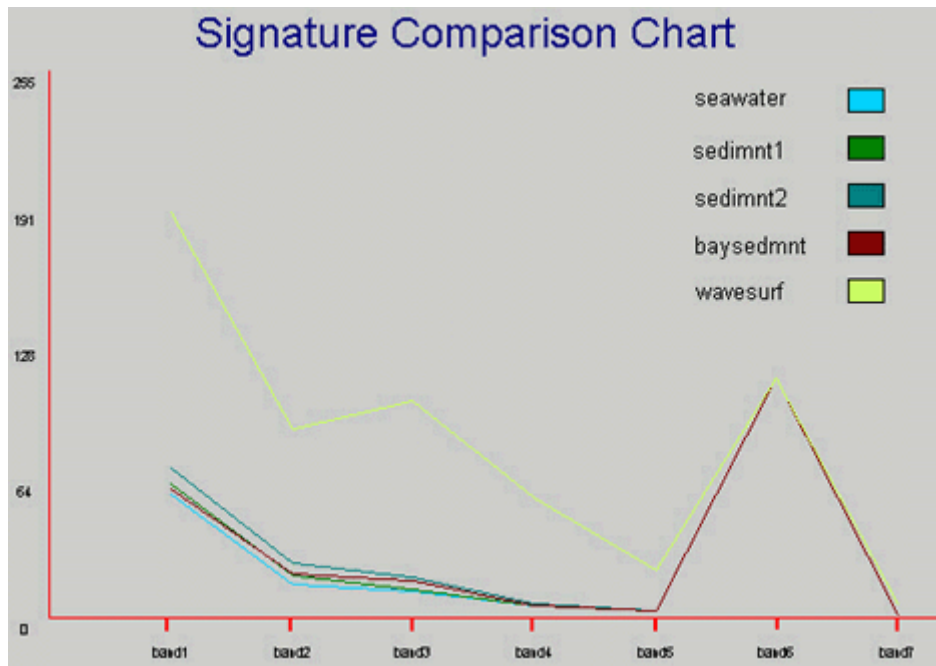
nell'area interagisce con la radiazione incidente). La classificazione procede quindi con l'elaborazione statistica in cui ogni pixel è confrontato con le varie firme e assegnato alla classe avente firma più simile (pochi pixels non riescono ad essere assegnati e rimangono non classificati; questi possono appartenere a classi non definite o non riconosciute).

La maggior parte delle classi da definire per la Morro Bay sono evidenti: acque oceaniche, onde, spiaggia, palude, ombre. In pratica potremmo anche discriminare ulteriormente le classi, per esempio acque oceaniche da acque di baia, ma la grossa somiglianza in risposta spettrale potrebbe creare delle difficoltà nel separarle. Altre classi che sono allo stesso modo differenti l'una dall'altra, come i pendii esposti al sole al passare del Landsat rispetto a pendii esposti in maniera opposta, potrebbero essere più giustificate.

Alcune classi sono ampiamente definite, essendo indicative di due o più elementi che ad alte risoluzioni potrebbero essere differenziate, ma che, in un'immagine TM sono indicate in maniera uguale: in questa categoria si possono includere alberi, foreste e aree molto vegetate (campi da golf; aziende agricole). Come prima prova di classificazione guidata sono state definite 13 classi discrete. Le linee di contorno delle aree campione sono tracciate sul color composite in colori reali (bande 1,2 ,3) come qui mostrato (i colori vengono qui scelti per convenienza di rappresentazione e non corrispondono poi ai colori con cui le relative classi vengono mostrate di seguito).



Molte classi prendono dati da più di un'area campione. Qui sono mostrati i grafici per le acque marine limpide (blu chiaro), le acque con tre differenti densità di sedimento sciolto (verde, marrone, blu-verde) e i frangenti (giallo-verde).



Possiamo vedere informazioni sui pixel di ogni firma, riconoscendo il numero di pixel che sono stati assegnati, il valor medio, massimo, minimo e deviazione standard nei valori digitali di ogni firma. Per darvi un aiuto a entrare meglio nel merito dei valori numerici implicati in questi calcoli, abbiamo riprodotto una versione semplificata di questi dati nella tabella che segue:

Tabella dei valor medi per ciascuna banda e delle grandezze di ciascun area campione in ogni classe								
BANDE:	1	2	3	4	5	6 (TH)	7	No. di Pixels
Classi								
1. Acque marine	57.4	16.0	12.0	5.6	3.4	112.0	1.5	2433
2. Sedimenti1	62.2	19.6	13.5	5.6	3.5	112.2	1.6	681
3. Sedimenti2	69.8	25.3	18.8	6.3	3.5	112.2	1.5	405
4. Sedimenti di Baia	59.6	20.2	16.9	6.0	3.4	111.9	1.6	598
5. Palude	61.6	22.8	27.2	42.0	37.3	117.9	14.9	861
6. Frangenti	189.5	88.0	100.9	56.3	22.3	111.9	6.4	1001
7. Sabbia	90.6	41.8	54.2	43.9	86.3	121.3	52.8	812
8. Urbano1	77.9	32.3	39.3	37.5	53.9	123.5	29.6	747
9. Urbano2	68.0	27.0	32.7	36.3	52.9	125.7	27.7	2256
10. Pendii	75.9	31.7	40.8	43.5	107.2	126.5	51.4	5476

al sole								
11. Pendii in ombra	51.8	15.6	13.8	15.6	14.0	109.8	5.6	976
12. Boschi	66.0	24.8	29.0	27.5	58.4	114.3	29.4	1085
13. Erba	67.9	27.6	32.0	49.9	89.2	117.4	39.3	590
14. Campi	59.9	22.7	22.6	54.5	46.6	115.8	18.3	259
15. Alberi	55.8	19.6	20.2	35.7	42.0	108.8	16.6	2048
16. Suoli nudi	73.7	30.5	39.2	37.1	88.4	127.9	45.2	309

Da questa tabella si può dedurre che in base alla deviazione standard (non mostrata), la maggior parte delle firme hanno delle combinazioni di valori digitali che sembrano aiutare le distinzioni tra classi. Due classi, Urbano 1 e Suoli nudi, sono abbastanza simili nelle prime 4 bande ma differenti nelle bande 5 e 7 in maniera da poterle supporte distinte.

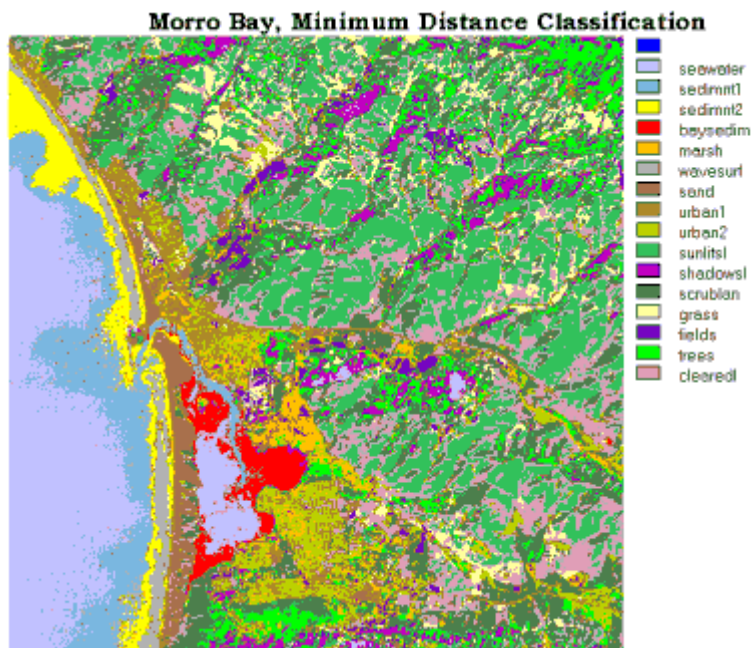
Nell'ambito della banda termica le differenze sono minime e ciò esclude questa banda dall'essere un efficiente discriminatore. Ad ogni modo come si vedrà in seguito, la sua aggiunta nella classificazione in Massima Verosimiglianza aumenta l'omogeneità spaziale di alcune classificazioni.

Classificazione "Minima Distanza"

Cominciamo l'esplorazione della classificazione guidata producendone una tramite il classificatore di **minima distanza**. Questa agisce sui valori digitali nello spazio multidimensionale delle bande organizzando i pixels nelle classi prescelte. Ogni pixel indefinito viene assegnato alla classe più vicina al vettore medio in questo spazio di banda.

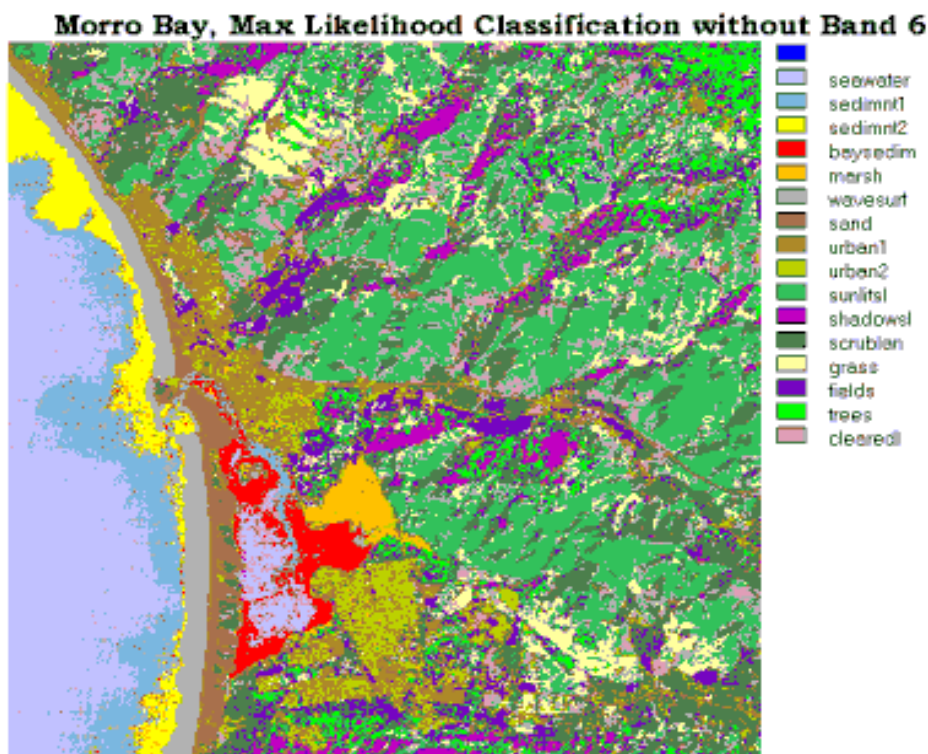
Nel caso della Morro Bay, l'immagine di classificazione consiste di 16 livelli di grigio, ciascuno rappresentativo di una classe, e a cui possono essere assegnati colori a piacere sul computer; in genere vengono scelti i colori che più si addicono ai temi e in maniera da separare con colori ben distinti le classi adiacenti cosicchè l'occhio possa meglio individuarne le differenze. Esaminate questa classificazione effettuata con la minima distanza in cui tutte le bande del TM compresa la termica sono state considerate.

Studiatela in relazione a ciò che avete precedentemente appreso su questa scena nelle pagine precedenti e confrontatela con la classificazione che vi mostreremo ora.

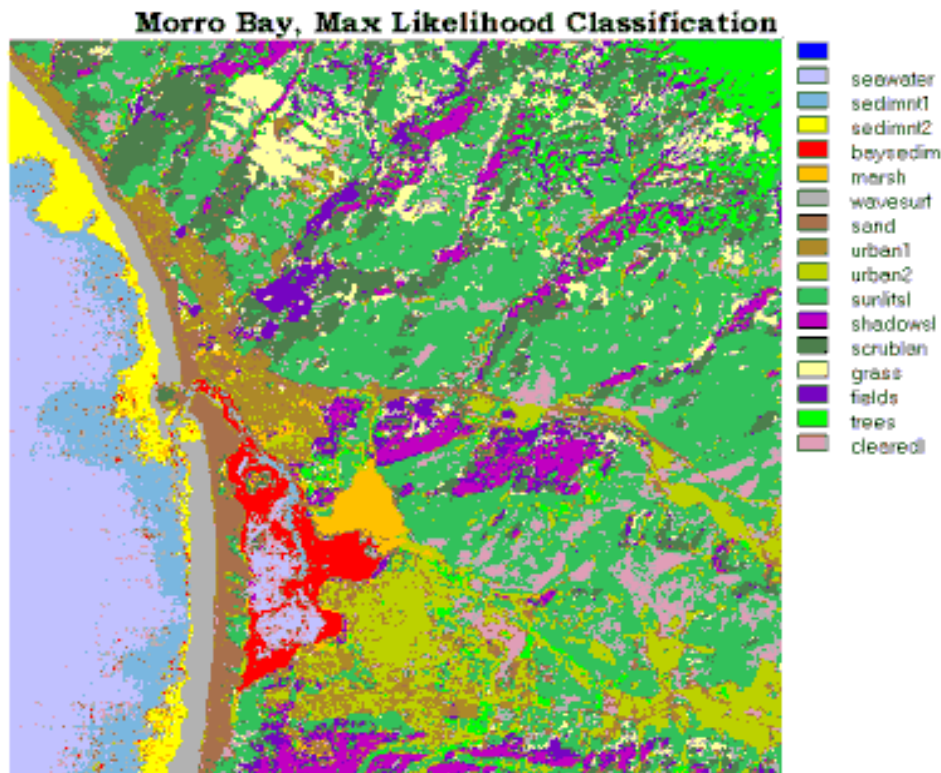


La classificazione in "Massima Verosimiglianza"

La seguente classificazione guidata è eseguita utilizzando un classificatore di massima verosimiglianza. Anche qui le classi multibanda sono derivate statisticamente ed ogni pixel sconosciuto viene analizzato affinché venga assegnato alla classe di appartenenza più verosimile. Nell'immagine che segue la banda termica è stata omessa e sono state definite 16 classi. Queste sono identiche alle precedenti ottenute con il metodo in "minima distanza". In entrambi i casi il terreno è suddiviso in tre livelli (I e II nell'oceano e un terzo nella Baia) e due classi urbane (I = Morro Bay; II = Los Osos) sono indicate per provare le differenze visive tra di loro (principalmente nel pattern delle strade). Guardate questa classificazione:



e giudicate voi stessi quanto il risultato sia credibile. Confrontate anche con l'immagine classificata in minima distanza; i colori assegnati alle stesse classi sono gli stessi per facilitare il confronto. Guardate ora una classificazione guidata:



utilizzando stavolta anche la banda 6 e ancora con 16 classi; si può notare come le aree urbane diventino più omogenee. Anche la vegetazione e della gran parte dei pendii guadagnano un notevole incremento in omogeneità aggiungendo la banda 6, ma in generale le differenze tra la classificazione con o senza la banda 6 sono piuttosto lievi.

La prima impressione è piuttosto sorprendente avendo molte classi ben classificate. Sia i frangenti che le barre sabbiose di spiaggia sembrano classificate uniformemente. La distribuzione dei sedimenti è credibile. Ci sono sufficienti differenze nei toni tra la baia Morro e Los Osos tali da giustificare le due diverse classi (Los Osos è diverso nel pattern delle strade e per la presenza di suoli marrone-arancio visibili nei composite 1, 2 e 3 ma gli elementi a colori di una classe urbana sono mischiati con l'altra in proporzioni differenti come ci si può aspettare. L'arancio chiaro assegnato all'area paludosa costiera occupa un'area abbastanza grande equivalente alla classificazione in minima distanza ed è anche distribuita a "macchie" lungo l'area costiera di Los Osos e lungo il fiume: probabilmente nella realtà un tipo di vegetazione simile dovrebbe essere più ampiamente diffusa. Senza dubbio i gruppi più anomali di classi sono distribuiti sulle colline. Le categorie "Versanti illuminati" e "Versanti in ombra" sono alle volte sintetiche poichè si riferiscono principalmente a condizioni di illuminazione dove le classi erba e alberi possono essere un insieme di effetti luminosi e di superfici più chiare o più scure.

La classe Suoli Nudi (Cleared Land) rappresenta un insieme di superfici che possono presentare una sottile vegetazione superficiale o essere parzialmente aride ma, in alcuni casi, possono essere anche effetto dell'ombra. La classe Grasslands è messa correttamente in quest'immagine ma appare distribuita su aree più vaste rispetto ad altre immagini, questo è senza dubbio un caso valido.

La categoria Vegetazione verde sostituisce bene l'effettiva distribuzione di materia organica riflettente (in banda 4), ma in questa scelta di assegnazione delle classi non vengono distinti i diversi tipi di terreni in crescita. In pratica un campo da golf e un bosco in cima alla montagna sono rappresentati ugualmente e non si distinguono nemmeno da i campi coltivati etc. Probabilmente potrebbero aver avuto una migliore correttezza di distinzione se per ogni classe fosse stata individuata in partenza un'area campione.

Un risultato finale preciso, estrapolando le classi dalle aree campione fino all'identificazione e distribuzione delle classi scelte, cioè la globale apparenza e accuratezza della classificazione, è influenzato dalle variabili implicate e dalle scelte fatte.

Il numero di classi definite, la validità degli spazi che rappresentano queste classi nelle aree campione (e il numero di pixels nei poligoni assegnati per ciascuna classe), la natura di una classe (la divisione dell'urbano è alle volte artificiale; le zone aride possono essere classi ed elementi diversi nella realtà), i colori assegnati alla mappa finale, e altre considerazioni influenzano l'accuratezza del risultato. Il rilievo sul campo sia prima che dopo la classificazione al computer, se logisticamente possibile, è la miglior maniera per assicurarsi un prodotto di qualità con le classi allocate correttamente. Se tali rilievi non sono possibili, una classificazione abbastanza accurata può essere sviluppata da un esperto interprete in relazione alla sua abilità nel riconoscere gli elementi sul terreno nella scena.

Applicazioni del telerilevamento

Il telerilevamento copre una vasta gamma di applicazioni. Nelle sezioni successive sono presentati solo alcuni esempi.

Come avrai modo di vedere, ciascuna applicazione ha le sue specifiche esigenze per quello che riguarda la risoluzione spaziale, la risoluzione spettrale e la risoluzione temporale. Ci sono applicazioni che richiedono dati ripetutamente, come le applicazioni sull'inquinamento da idrocarburi nel mare, sugli incendi e il monitoraggio del movimento dei ghiacci. Alcune applicazioni richiedono solamente immagini stagionali (identificazione delle colture, malattia delle foreste e monitoraggio delle aree umide), altre ancora hanno bisogno di acquisire l'immagine una sola volta (geologia strutturale). Spesso è necessario più di un sensore per rispondere adeguatamente a tutti i requisiti di una data applicazione. L'uso combinato di sorgenti multiple di informazione è chiamato integrazione. In molte applicazioni, l'uso di informazioni provenienti da differenti fonti garantisce che l'identificazione degli elementi dell'immagine sia la più accurata possibile. Dati addizionali che possono fornire un aiuto nell'analisi e nella interpretazione delle immagini sono detti "dati ancillari".

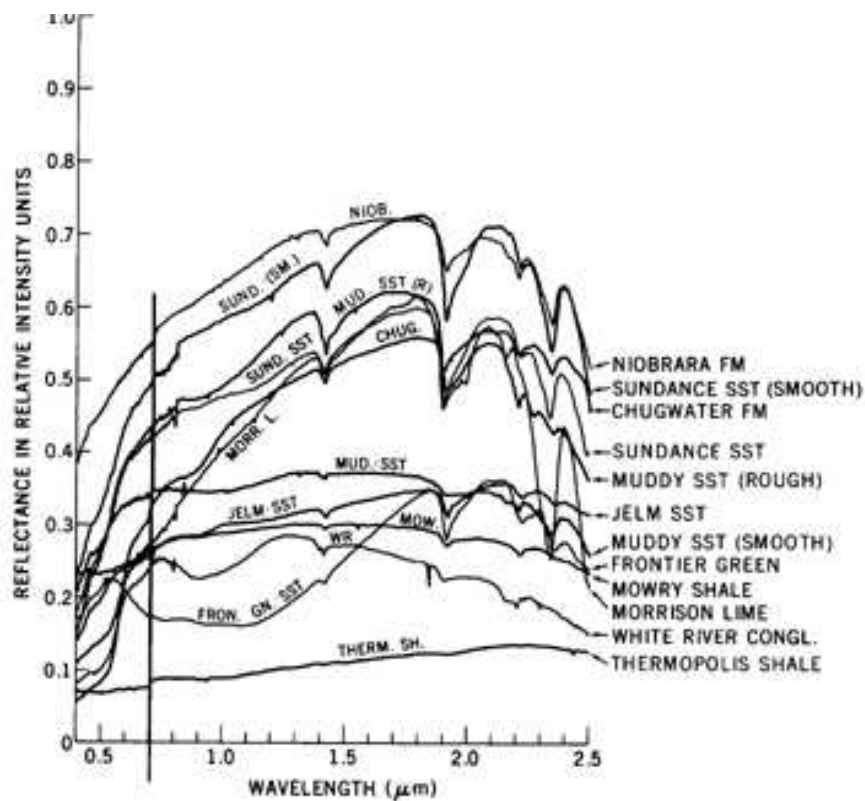
Le applicazioni del telerilevamento descritte in questo corso sono rappresentative, ma non sono esaustive.

Geologia

I geologi hanno usato per decenni le foto aeree come dati su cui mappare le unità rocciose (stratigrafia), studiare la forme della terra (geomorfologia), determinare le caratteristiche strutturali (pieghe e faglie), valutare i cambiamenti dinamici prodotti dagli eventi naturali (inondazioni, eruzioni vulcaniche), e determinare indicazioni superficiali (come alterazioni e altri segni di mineralizzazione) di depositi sottostanti di minerali, petrolio e gas, e acqua. Con l'avvento delle immagini spaziali i geologi possono ottenere tre importanti risultati: 1) il vantaggio di avere una visione sinottica di grandi aree consente di esaminare in un'unica scena o in un mosaico la struttura geologica della Terra su base regionale; 2) la possibilità di analizzare bande multispettrali quantitativamente in termini di numeri (Digital Numbers) consente di applicare tecniche di elaborazione per distinguere o esaltare determinate proprietà dei materiali; e 3) la possibilità di fondere differenti tipi di prodotti telerilevati (come immagini di riflettanza con immagini radar o termiche) o di combinarli con dati di quota e con altri tipi di informazione (come mappe tematiche, misure geofisiche, campionature chimiche) determina nuove soluzioni per correlare le diverse proprietà dei fenomeni terrestri. Questi nuovi metodi derivanti dallo spazio non hanno ancora rivoluzionato il modo in cui i geologi compiono i loro studi sul campo ma si sono rivelati indispensabili per migliorare i processi di mappatura geologica e di esplorazione di risorse minerarie ed energetiche su grande scala.

Molte mappe geologiche sono anche mappe stratigrafiche, ossia, registrano la posizione e l'identità delle sequenze dei tipi di rocce in base alla loro età relativa. L'unità di roccia fondamentale è la **formazione**, definita semplicemente come un insieme distinto e mappabile di rocce (nel caso di rocce sedimentarie, l'insieme è stratificato) con una specifica distribuzione geografica.

Le immagini telerilevate, siano foto aeree o immagini da satellite, mostrano la distribuzione superficiale di formazioni (secondo andamenti che dipendono dalla loro prossimità alla superficie, dall'estensione sull'area monitorata, dallo spessore relativo, dalle caratteristiche strutturali e dal grado di rimozione della parte superiore per erosione) e, in condizione appropriate, i tipi di rocce che li costituiscono. I geologi sono in grado di riconoscere alcuni tipi di rocce in base al loro aspetto sulla foto/immagine. Altre invece possono essere identificate in base alla loro firma spettrale. Nell'intervallo spettrale coperto dal Landsat TM, rocce di un dato tipo o una data età presentano differenze in base alla lunghezza d'onda. Questo è evidente nei seguenti andamenti spettrali che mostrano curve calcolate in laboratorio ottenute da uno spettrometro di riflettanza per un gruppo di diverse rocce sedimentarie del Wyoming:



Un modo comune di mappare la distribuzione delle formazioni è affidata a siti campione delle aree comprese nella foto/immagine. L'identità delle rocce viene confermata sia consultando mappe relative alla zona in esame che mediante indagini sul campo. L'aspetto fotografico o le proprietà spettrali sono quindi estrapolate dalla foto/immagine per localizzare altre unità presenti nell'area (questo metodo è chiamato classificazione supervisionata).

Agricoltura e foreste

Poiché molti dispositivi di telerilevamento operano nelle regioni del verde, del rosso e del vicino infrarosso dello spettro elettromagnetico, sono capaci di discriminare le variazioni nell'emissione di radiazione legate sia agli effetti di assorbimento che di riflettenza associati con la vegetazione. L'assorbimento corrispondente a $\sim 0.65 \mu\text{m}$ (nel rosso visibile) e nel blu del pigmento clorofilliano presente nei cloroplasti della foglia, rimuove questi colori dalla luce bianca, lasciando la riflettenza predominante nel visibile concentrata nel verde (è il motivo per cui la maggior parte della vegetazione è caratterizzata dal colore verde delle foglie). C'è anche una forte riflettenza tra 0.7 e $1.0 \mu\text{m}$ delle cellule del mesofillo delle foglie; l'intensità di questa riflettenza è comunemente maggiore rispetto alla maggior parte dei materiali inorganici, così che la vegetazione è descritta come "luminosa" nell'infrarosso vicino. Queste proprietà rispecchiano le tonalità della vegetazione sulle immagini

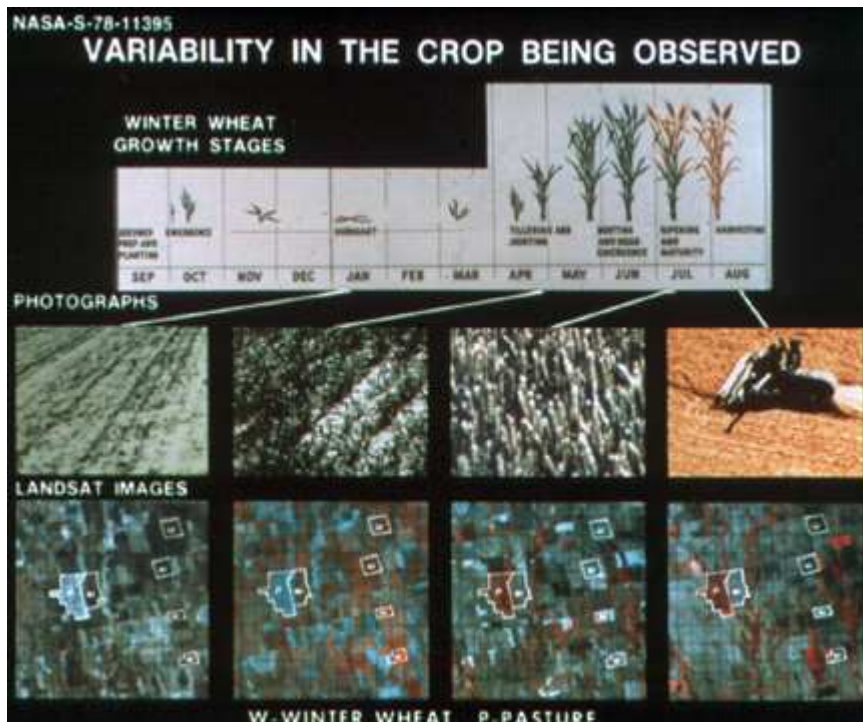
multispettrali: tonalità più scure nelle bande del blu e specialmente del rosso, un pò più luminose nella banda verde, e particolarmente luminose nelle diverse bande dell'infrarosso vicino (massimo nelle bande 6 e 7 MSS, e nella banda 4 TM).

Queste variazioni spettrali facilitano il riconoscimento preciso, l'identificazione ed il monitoraggio degli elementi vegetali sulla superficie terrestre e, in alcuni casi, all'interno degli oceani e di altri elementi acquatici. In questo modo i cambiamenti nelle foreste, nelle praterie e pascoli, dei campi coltivati e anche del plancton marino possono essere continuamente misurati spesso anche in maniera quantitativa. Poichè le sostanze organiche vegetali sono componenti dominanti nella maggior parte degli ecosistemi, informazioni necessarie per la caratterizzazione e gestione di tali sistemi sono adesso abitualmente fornite da sensori remoti operanti dallo spazio.

Una delle applicazioni di maggior successo delle immagini multispettrali da satellite risiede nella loro capacità di monitorare lo stato delle produzioni agricole mondiali. Questo include la capacità di identificare e distinguere la maggior parte dei principali tipi di coltivazioni: grano, orzo, miglio, avena, granturco, soia, riso, e altri, per valutare quantitativamente su scala globale la superficie totale destinata a queste e ad altre coltivazioni in un qualunque momento. E' possibile stimare con un'accuratezza del 90% o più i rendimenti attesi di ciascun raccolto, a livello sia locale o regionale che mondiale, conoscendo innanzitutto le aree relative dedicate a ciascuna coltivazione e poi correlando attendibili valutazioni di raccolto per area unitaria fornite dagli agronomi sulla base di dati rappresentativi di verità al suolo. Di solito le stime sui raccolti ottenute dai dati satellitari sono più esaurienti e più velocemente disponibili (spesso nel giro di alcune settimane) rispetto a quelle determinate convenzionalmente con gli approcci ai raccolti. Le informazioni sull'umidità del suolo, spesso critica ai fini di una buona produzione, può essere valutata qualitativamente (e in condizioni favorevoli anche quantitativamente) mediante determinate osservazioni satellitari. In circostanze adeguate, gli stress dei raccolti (generalmente dovuti a deficienze di umidità) o malattie possono essere riconosciute e a volte affrontate effettivamente prima che gli agricoltori stessi diventino consapevoli dei problemi. Alle osservazioni da satellite è sempre stato riconosciuto il successo in alcune circostanze nell'individuazione dei raccolti di erba per stupefacenti come papaveri e tabacco selvaggio (marijuana).

La discriminazione dei raccolti si basa su diverse caratteristiche delle piante interessate. Considerando la vegetazione in generale, le foglie decidue tendono a essere più riflettenti delle sempreverdi. Quindi nei color composit con l'infrarosso, il rosso associato con queste bande nell'intervallo 0.7 - 1.1 μm sarà normalmente più ricco in colore e più luminoso nelle foglie di alberi come l'acero che negli aghi di alberi come i pini. Tuttavia di maggiore importanza sono parametri come la dimensione e la forma totale del tipo di coltivazione, la forma e l'area superficiale della singola foglia, l'altezza della pianta e la quantità di ombra prodotta, e la spaziatura o altre geometrie delle piante dei filari coltivati. Lo stadio della crescita, il grado di maturità, è anche un fattore importante: durante la storia del suo sviluppo il frumento, per esempio, passa attraverso diverse distinte fasi nella sua dimensione e forma e colore, che va dal verde al marrone dorato.

Queste fasi possono essere seguite nella seguente illustrazione:



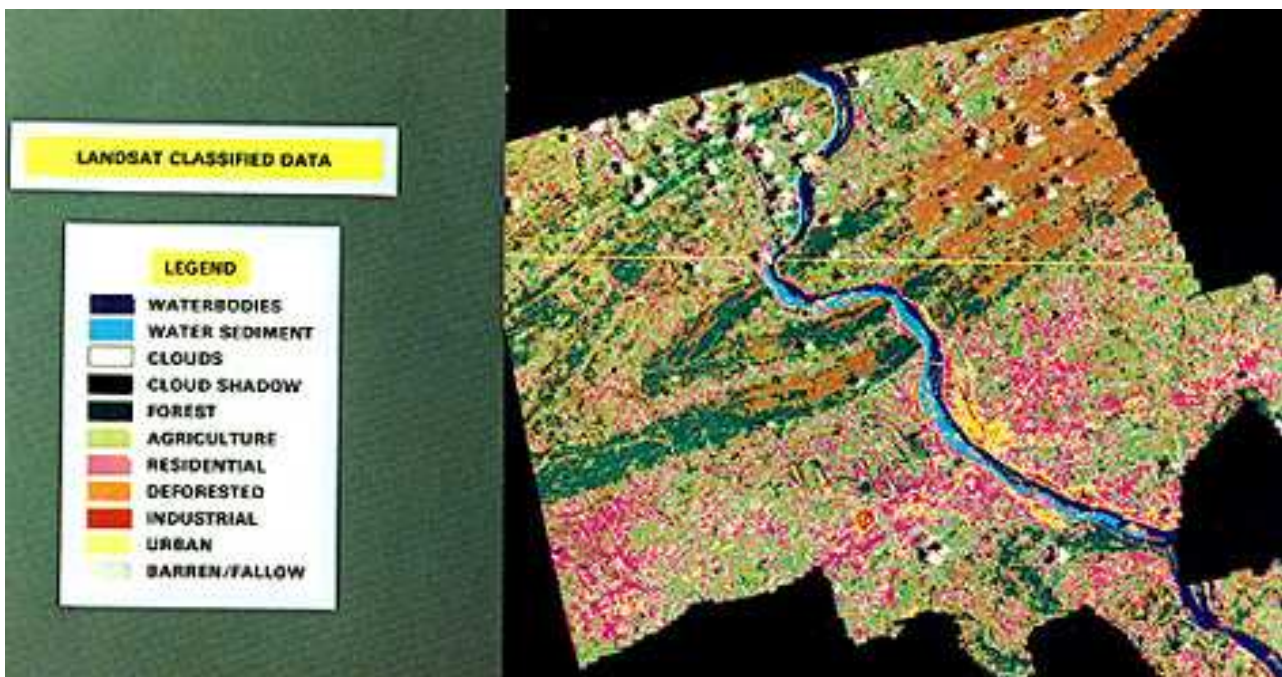
Notate che, nell' immagine Landsat, i campi di frumento mostrano la loro maggiore luminosità nell'infrarosso (d'ora in poi rosso) durante lo stadio emergente, ma diventa meno sensibile durante la fase di maturazione. I pascoli che forniscono i raccolti di foraggio maturano (diventano rossi) molto più tardi.

Inoltre, i suoli, in particolare i suoli da allevamento (che possono avere colori variegati ed altre caratteristiche) e la quantità di umidità che contengono, varierà da zona a zona col passare del tempo. Tutti questi fattori concorrono ad apportare da piccole a grandi differenze nella firma spettrale alla grande varietà di specie coltivate dall'uomo. Generalmente, la firma spettrale per coltivazioni differenti in una particolare regione deve essere determinata basandosi su campioni rappresentativi, sebbene alcuni tipi di coltivazioni abbiano una risposta spettrale universalmente simile a stadi di crescita equivalenti.

Uso del suolo

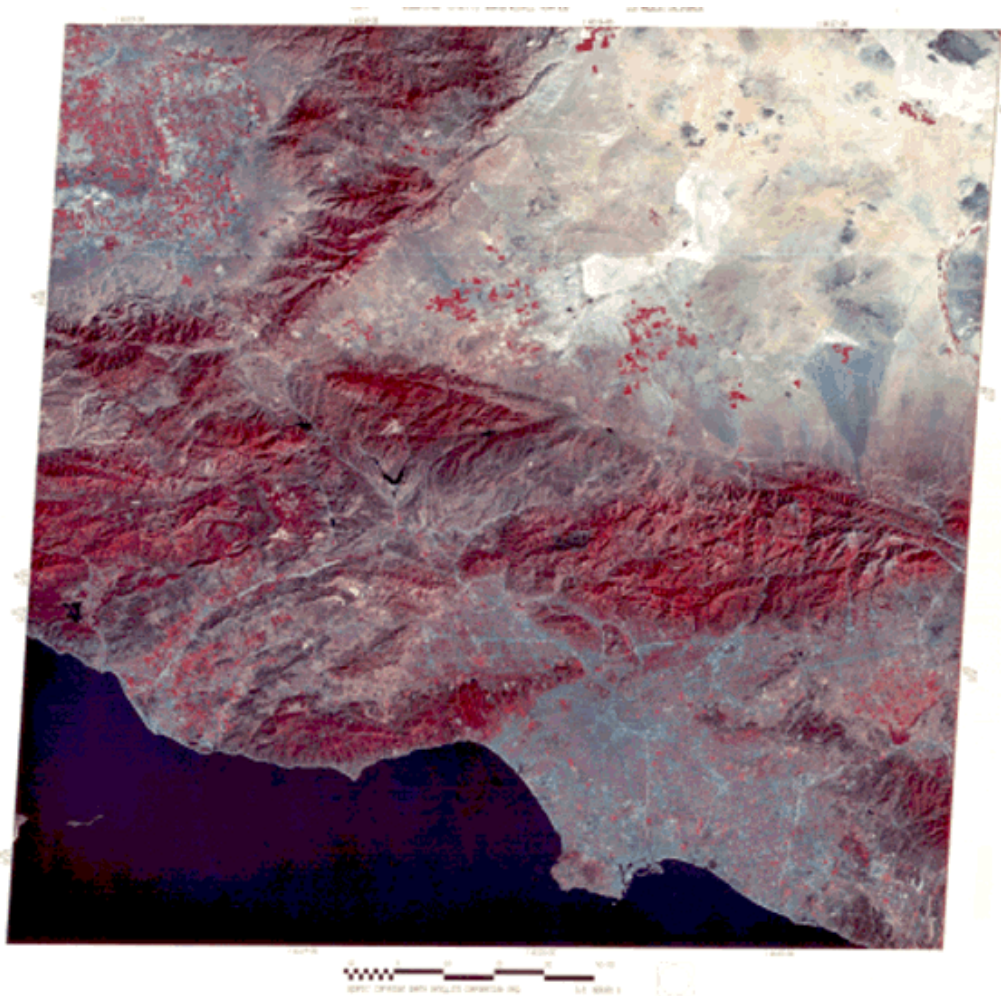
Come abbiamo già detto, le immagini da satellite e le foto aeree sono un potente mezzo per mappare la superficie della Terra. Le differenti caratteristiche naturali e artificiali possono essere identificate e catalogate in termini di copertura del suolo. Il termine uso del suolo è spesso un sinonimo, ma si riferisce più appropriatamente alle caratteristiche che descrivono come il suolo viene usato dall'uomo.

In figura, si vede un esempio di una tipica mappa di copertura/uso del suolo derivata da immagini Landsat mediante classificazione di un'area nei dintorni di Harrisburg, PA. La città è individuata dal colore giallo assegnato all'urbano. Le macchie gialle più piccole ad est e ovest indicano i centri urbani in posti come Carlisle, Hershey e Labanon. Quest'area metropolitana, con popolazione urbana superiore a 300.000 unità, è generalmente distribuita nei dintorni di Harrisburg.



Los Angeles, San Diego, e Tucson

La prossima immagine mostra una delle più grandi regioni urbane nel mondo - la metropoli di Los Angeles - in un'immagine MSS ricampionata (a più bassa risoluzione) che si estende aldilà della California del sud.



Los Angeles è situata in un bacino strutturale, formante un bassopiano che restringe la circolazione dell'aria ed è una trappola naturale per gli inquinanti (il famoso smog di Los Angeles). La traccia urbana in una immagine a falsi colori è evidente nel segmento di immagine contenente numerose città e sobborghi che fanno di Los Angeles la maggiore sfera regionale di influenza. Le aree a più elevata densità di popolazione sono caratterizzate da due temi dominanti di colore: uno sottile, generalmente di colore blu o quasi nero, per strutture lineari come strade e corsie, e aree che sono anche generalmente in alcune sfumature di blu, essendo l'espressione spettrale di edifici che tendono ad essere riflettivamente più brillanti nelle bande del blu e del verde. Sparse tra queste aree vi sono macchie di rosso che indicano parchi cittadini, cimiteri, campi di golf, e ritagli di campi agricoli urbani. Le aree residenziali hanno spesso colori dal marrone al rosa o rosso, dovuto al coesistere di prati e alberi da un lato e edifici e strade dall'altro. Nelle colline e montagne nei dintorni di Los Angeles, è molto difficile riconoscere gli abitati urbani e i sobborghi a causa della dominanza di alberi e boscaglia che rendono l'area completamente rossa; la sezione di Palos Verdes Estates sull'oceano è un buon esempio. Comunque, bande e macchie di blu nelle valli, come nella valle Santa Clara ad est di Ventura, indicano concentrazioni commerciali lungo le autostrade.

Le aree urbane sono anche riconoscibili in modo abbastanza distinto nelle immagini radar come è mostrato in questa immagine Seasat SAR del 1978 che copre la maggior parte dell'area metropolitana di Los Angeles. Per aiutare il riconoscimento dei punti

fondamentali dell'immagine, abbiamo inserito un segmento di una mappa che indica strade, città e altre infrastrutture urbane.





Molte delle linee scure in questa immagine radar corrispondono ad autostrade o altre strade principali. Le due strisce strette scure ad angolo retto sull'oceano nel mezzo della baia di Santa Monica indicano le piste dell'aeroporto internazionale di Los Angeles. Questi elementi scuri sono dovuti a superfici riflettenti che deflettono la maggior parte del fascio radar lontano dal ricevitore. In genere, gli edifici restituiscono la maggior parte del segnale radar, dando origine a caratteristiche di tonalità grigio media (in questo caso uniforme perché la maggior parte degli edifici isolati non vengono distinti). Caratteristiche molto chiare sono associate ad alti livelli di diffusione, in alcuni casi, legati alla presenza di vegetazione, come nel caso della penisola di Palos Verdes lungo la costa occidentale, una lussureggiante area residenziale. Comunque, la risposta molto luminosa dell'area squadrata ad est delle Montagne Santa Monica che si estende nella valle San Fernando sotto Burbank è piuttosto misteriosa. Approssimativamente sulla mappa coincide con Griffith Park a nord di Hollywood ma la sua posizione relativa alla strada distinguibile sull'immagine radar indica una forma inesatta (potrebbe trattarsi di un effetto di non rettificazione).

Anche le scene a più bassa risoluzione create dalle immagini MSS mostrano le principali caratteristiche delle aree urbane, come strade, edifici, aeroporti, parchi e strutture industriali. L'immagine MSS del 30 marzo 1975 riprende la parte centrale di San Diego nella California del sud, nell'immagine si riconoscono il porto, gli aeroporti civili e militari, il centro della città, Balboa Park, Mission Bay e Cabrillo Point.

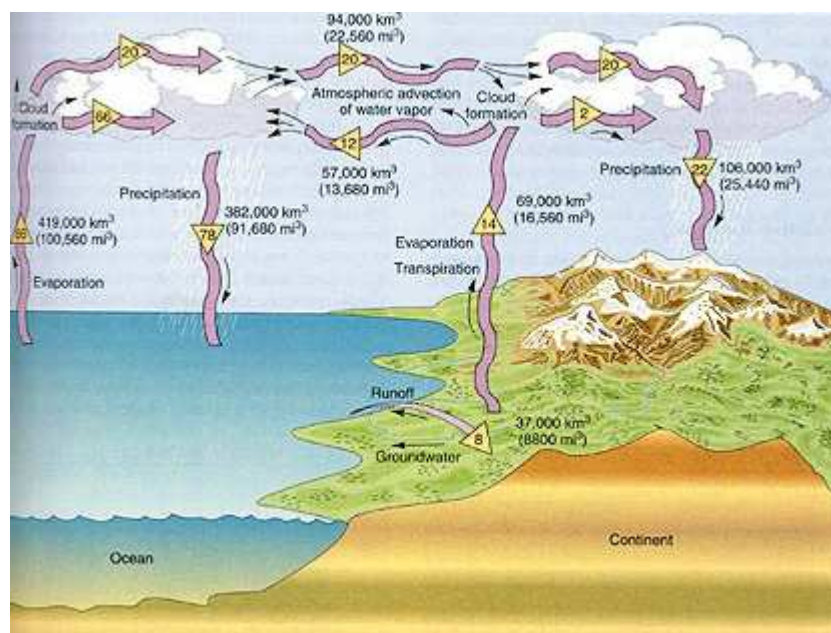


Ma la capacità di distinguere caratteristiche metropolitane fino alla scala dei singoli edifici, derivante dall'uso di sensori a più alta risoluzione, è evidente in questa immagine SPOT del 22 novembre 1986 del centro di San Diego in cui le tre bande multispettrali HRV, a 20 m di risoluzione sono combinate e registrate con l'immagine pancromatica a 10 m. I dettagli dell'immagine mostrano chiaramente che le immagini da satellite possono competere con la scala più piccola delle foto aeree in nitidezza e contenuto informativo.



Meteorologia

Gli oceani e altre grandi masse d'acqua dolce ricoprono più del 70% della superficie del pianeta. In un qualsiasi istante, circa il 50% di questa superficie, sia sul mare che sulla terraferma, è coperta da nuvole. La pioggia proveniente da queste nuvole convoglia a formare corsi d'acqua e ad ingrossare fiumi. Questo complesso sistema interconnesso di circolazione d'acqua costituisce il ciclo idrico, schematizzato nel diagramma:



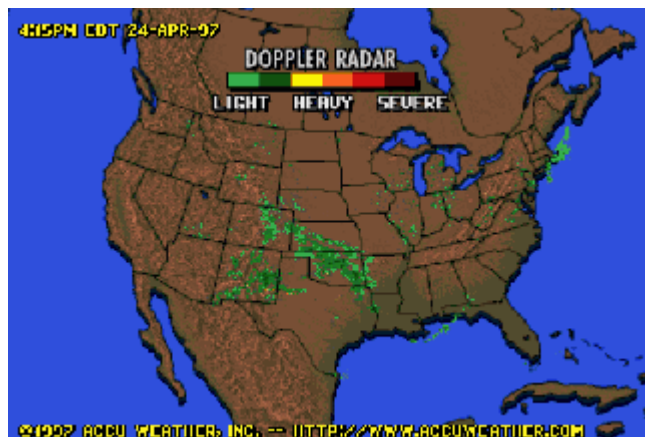
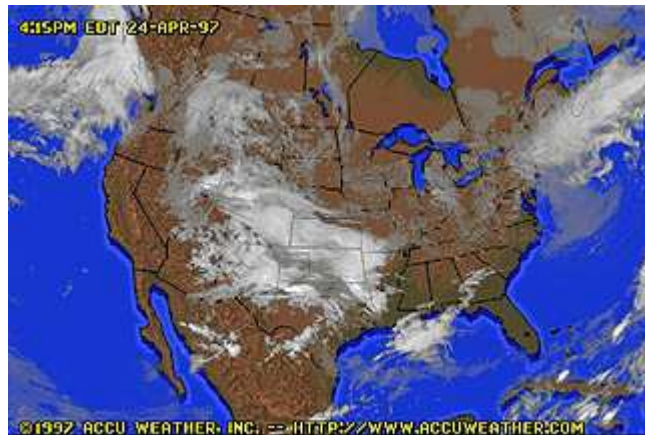
(Christopherson, R.W., GEOSYSTEMS: An Introduction to Physical Geography, 2nd Ed. © 1994. Riprodotto con il consenso di Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey)

I numeri associati a questo diagramma mostrano chiaramente che gli oceani non soltanto costituiscono la parte più consistente dell'acqua presente sul pianeta, ma sono sorgente di gran parte delle precipitazioni che consentono il riciclo dell'acqua che giunge nell'atmosfera per evaporazione. L'acqua in movimento è reperibile sotto forma di nubi visibili o di vapor d'acqua invisibile o ancora di sistemi fluviali. Oltre agli oceani, che costituiscono quasi il 98% del volume d'acqua in superficie, grandi serbatoi d'acqua sono anche i ghiacciai, principalmente quelli Antartici e della Groenlandia, la neve (in gran parte stagionale), e i laghi d'acqua dolce.

L'avvento dei satelliti ha permesso una visione ampia di vasti territori finalizzata all'osservazione diretta dei sistemi meteorologici, delle condizioni oceanografiche e del flusso d'acqua sui continenti e le isole. Una serie di scene adiacenti acquisite in brevi periodi di tempo possono essere rapidamente combinate in mosaici per ottenere una copertura globale giornaliera. Nel tempo, i satelliti lanciati su orbite geosincrone hanno raggiunto un grado di copertura quasi istantaneo degli emisferi terrestri in modo da fornire rapidi aggiornamenti sulla distribuzione dei banchi nuvolosi e le strutture di circolazione su quasi tutto il pianeta. Paradossalmente le nuvole, che sono gli elementi che compromettono in misura maggiore le osservazioni del suolo e degli oceani, rappresentano l'obiettivo primario dei satelliti meteo. Con la nascita di sensori più versatili è diventato possibile monitorare altre proprietà atmosferiche ed oceanografiche quali le temperature della stratosfera e della troposfera, il bilancio della radiazione terrestre, la chimica dell'aria (per esempio l'ozono, il CO₂, i composti solforosi, gli aerosol), i venti e le correnti marine, i ghiacci sul mare e i nutrienti marini biotici.

Dal 1959 al 1994 sono stati lanciati circa 270 satelliti (con pochi fallimenti) da Stati Uniti, Unione Sovietica/Russia, Giappone, Cina, India, Italia, Francia e soprattutto dall'ESA principalmente con l'obiettivo di poter disporre di dati sempre aggiornati per monitorare il sistema climatico e realizzare previsioni meteorologiche, ma anche per condurre studi scientifici finalizzati ad una migliore comprensione dell'atmosfera, degli oceani, dei campi di forza della Terra (ionosfera, magnetosfera), della radiazione solare e dei fenomeni ambientali associati. D'altro canto, ad oggi, soltanto 25 satelliti sono stati dedicati ampiamente alle osservazioni della terra. Esperimenti meteorologici sono stati condotti anche da osservatori a bordo delle missioni Mercury, Gemini, Apollo, Shuttle (STS), e MIR. Chiaramente la quasi totalità delle applicazioni dei sensori operanti su piattaforme spaziali sono state fino ad ora concentrate in settori legati all'idrologia in merito alle sue numerose funzioni nell'ambito del sistema terrestre.

Per buona parte del pubblico l'unico contatto con i satelliti per l'osservazione del pianeta ha luogo nel corso dello spazio dedicato al tempo durante il telegiornale. Siamo tutti abituati alla vista delle nuvole sulla regione in cui viviamo, tanto quanto alla visione sinottica delle stesse sull'intero nostro continente. Le immagini sono in genere prodotte dalle bande nel visibile e nell'IR termico di sensori montati su satelliti geostazionari. Ancora più spesso sono proposte immagini realizzate con sistemi Doppler radar che effettuano una scansione circolare periodica; i segnali radio vengono diffusi in seguito all'interazione con particelle di ghiaccio o gocce d'acqua, consentendo una stima della quantità di precipitazioni e della velocità del vento. Qui sono riportati due esempi, copertura nuvolosa in alto e precipitazioni in basso, presi dal sito di Accuweather (<http://www.accuweather.com>).



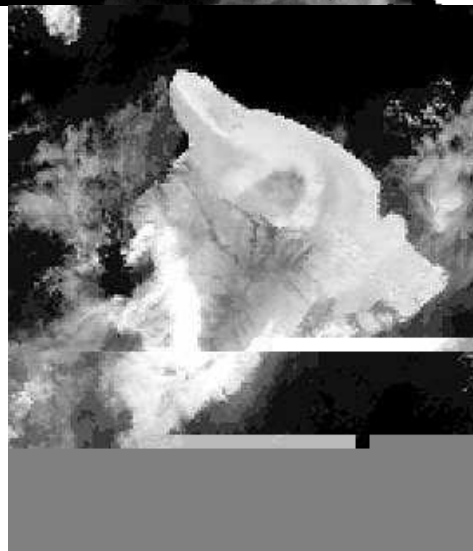
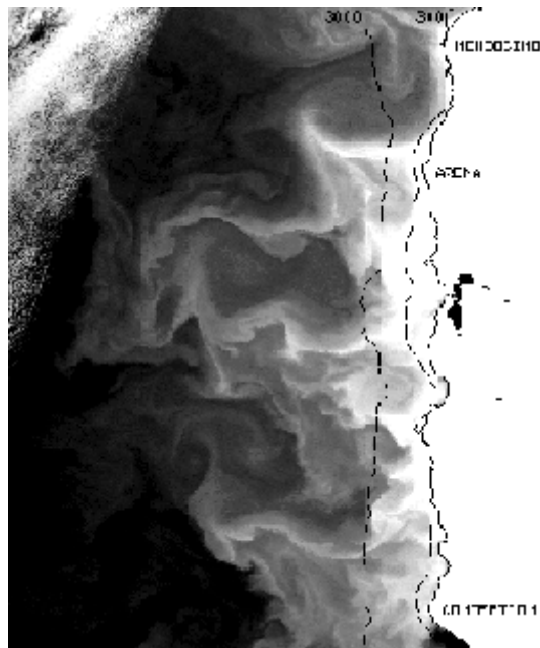
Combinando osservazioni frequenti in una sequenza temporale (generalmente su un intervallo totale dalle 6 alle 24 ore), è possibile mostrare allo spettatore televisivo un'animazione dell'evoluzione del sistema meteorologico su scale da locali a continentali.

Osservazioni Oceanografiche

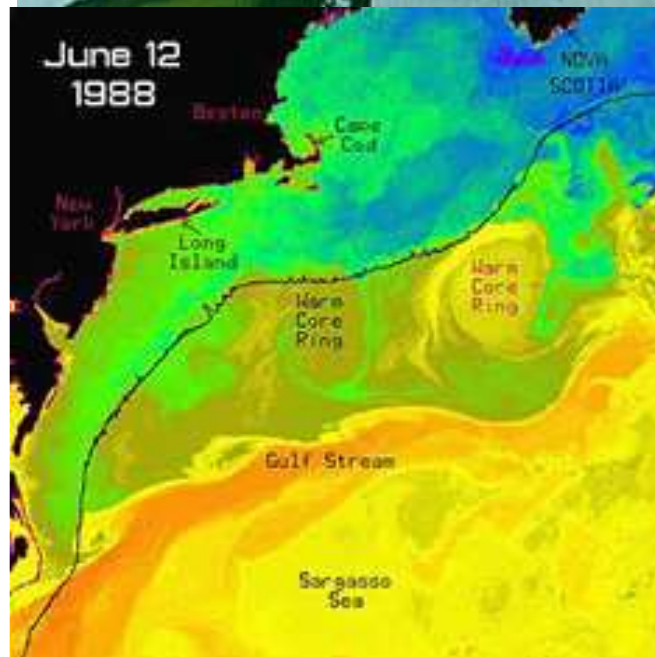
Spostiamoci ora dall'enfasi sui sistemi meteorologici visti dallo spazio per concentrarci sulle osservazioni degli Oceani terrestri. La maggior parte delle informazioni che verranno riportate in seguito provengono comunque dai satelliti meteo sebbene diversi satelliti e alcune missioni Shuttle avevano lo scopo di missioni oceanografiche.

Il tipo di informazione ricavata dai sensori include: la temperatura superficiale dell'acqua, i modelli di correnti oceaniche, la formazione di vortici e cerchi, le correnti di risalita, i venti superficiali, i movimenti delle onde, il colore del mare (indicativo della concentrazione di fitoplancton), e i ghiacci marini alle alte latitudini.

Le acque costiere adiacenti ai margini continentali mostrano in genere considerevoli variazioni nella temperatura superficiale. Alcuni di questi sono dovuti al mescolamento di acque fluviali, ma le correnti oceaniche e di risalita modificano i modelli. Osservate le due immagini in infrarosso termico del NOAA AVHRR di una parte della costa californiana da Mendocino sud a Lompoc (in alto) e la grande Isola di Hawaii (in basso), in cui le acque più calde al largo sono rappresentate dai toni più chiari.

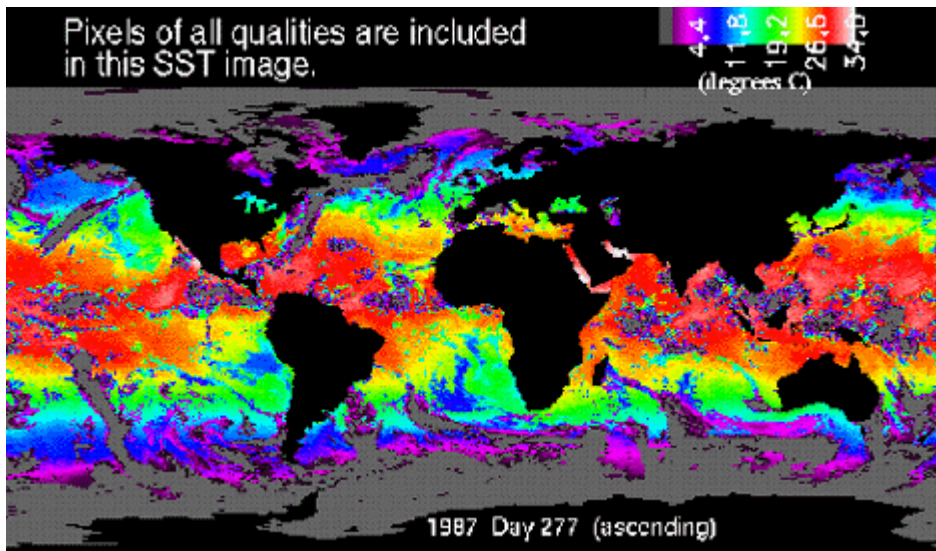


Le correnti oceaniche come quella del Golfo nella costa Est degli U.S. e la corrente Pacifica nella costa Occidentale, sono il risultato della redistribuzione di acque calde accumulate nelle regioni tropicali verso zone più fredde ad alte latitudini. Un rendimento a colori di parte dell'immagine diurna termica HCM mostra la corrente del Golfo della costa della Carolina-Virginia Nord. Confrontata con questa immagine ce n'è qui una della costa Est che mostra le temperature superficiali calcolate dagli algoritmi di elaborazione dei dati multispettrali ottenuti, come in questo caso, da NOAA AVHRR.

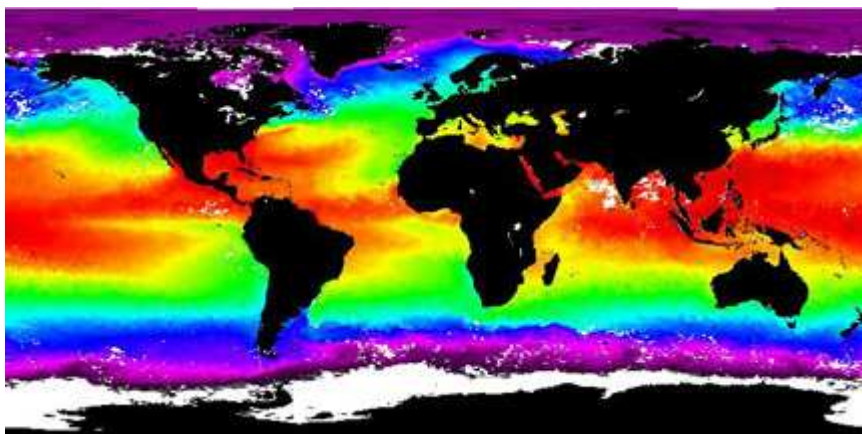
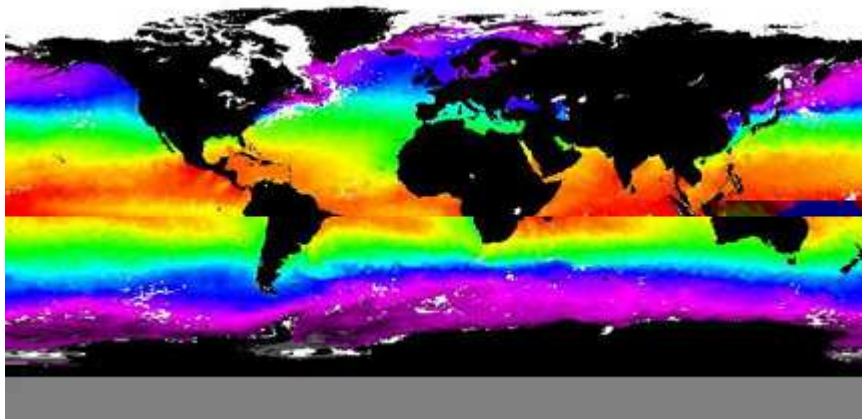


Anche quest'immagine mostra la corrente del Golfo, che in alcune zone si divide in aree circolari con la parte centrale calda. I valori di temperatura per i diversi colori sono: arancio=25-28° C; giallo = 23° C; verde14° C; blu 5° C.

Le osservazioni globali da satellite sulle temperature dell'acqua marina (conosciuta come SST Sea Surface Temperature) vengono ora fatte ogni giorno principalmente attraverso i satelliti meteorologici. Questo è un esempio di *mappa* di SST fatta alla fine di Settembre del 1987.



I valori di SST possono essere integrati in intervalli di tempo predefiniti e quindi confrontati mese per mese o tra periodi equivalenti in nel corso degli anni. Qui sotto vi sono le SST per i mesi di Gennaio (in alto) e Luglio (in basso) nel 1993,ottenuti dai dati NOAA AVHRR.



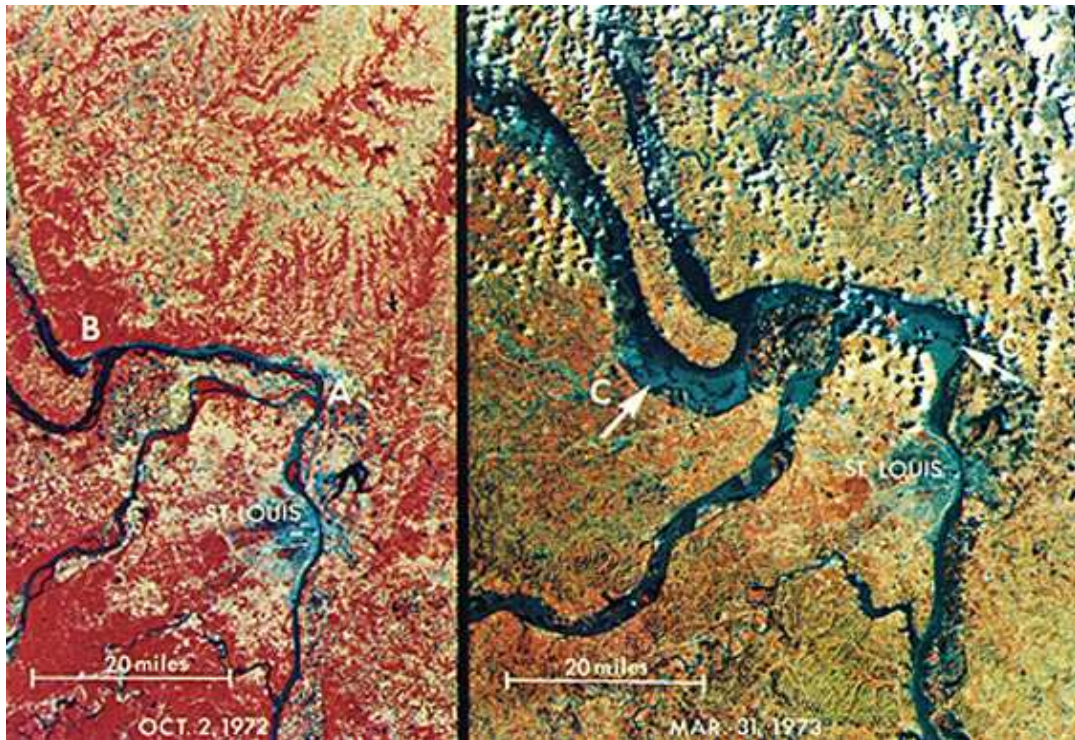
Rosso e giallo indicano temperature più elevate, blu e porpora più fredde. A prima vista non sembra esserci grossa variazione stagionale sebbene una visione più attenta denota differenze sostanziali, tenendo conto che, in generale, gli oceani tendono a mantenere le loro temperature medie con variazioni meno evidenti rispetto all'atmosfera.

Idrologia: le alluvioni

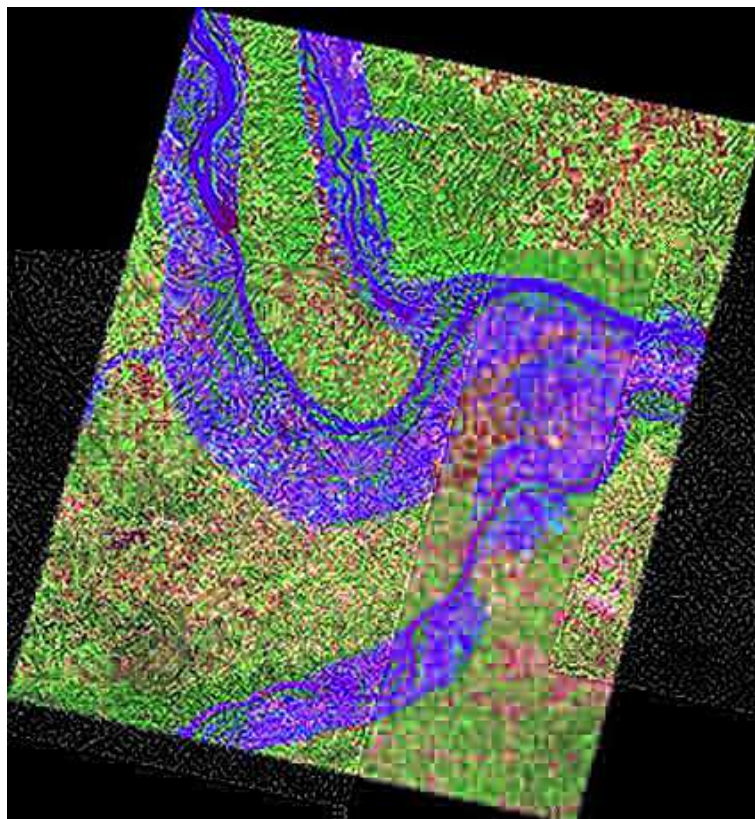
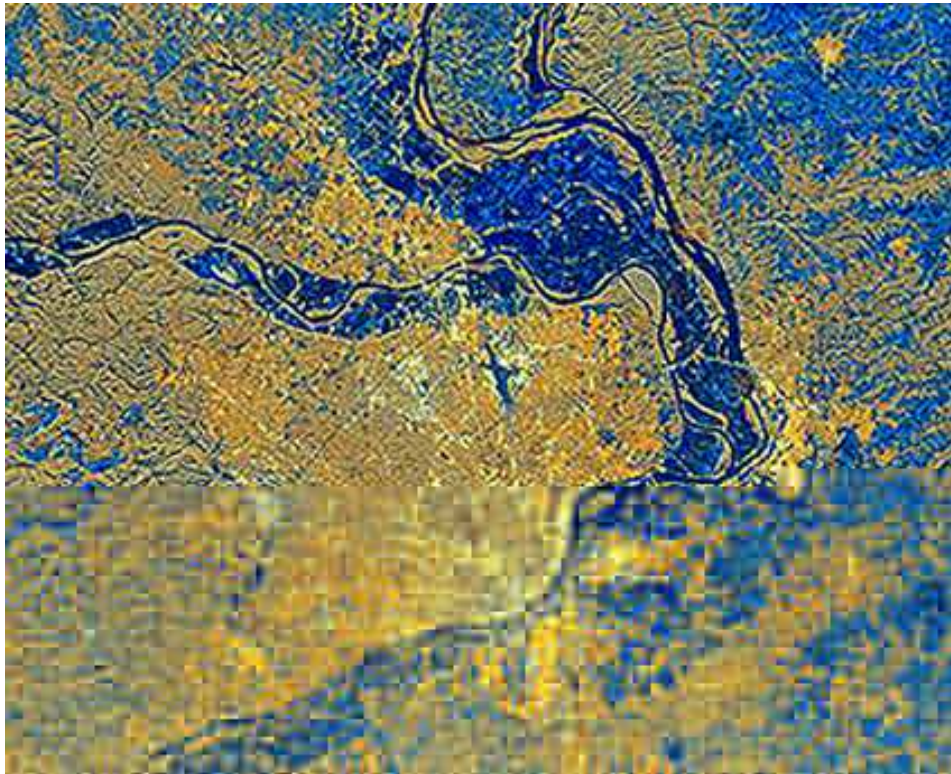
L'immagine presentata mostra le grandi alluvioni del Fiume Rosso in Nord Dakota e Manitoba (Canada) che inondò Grand Forks, Fargo e altre città. L'alluvione del 27 Aprile venne ripresa dal NOAA AVHRR, con l'acqua rappresentata in grigio chiaro e le nuvole in arancio:



Le alluvioni sono molto frequenti in primavera nelle zone del bacino del Mississippi. Un alluvione, fra i più devastanti avvenuti negli ultimi cento anni, fu causato dallo scioglimento delle nevi e dalle piogge alla fine di Marzo 1973. L'evento ripreso in questa scena Landsat (confrontata con una precedente all'alluvione) in un giorno privo di copertura nuvolosa, mostra St Louis, Missouri e le pianure alluvionali del Mississippi, Missouri (che si unisce in A), e il fiume Illinois(B):



Vent'anni dopo queste aree sono state nuovamente colpite da un più grande evento alluvionale. Le aree più colpite andavano dallo Iowa all'Illinois del sud. Gli argini si ruppero inondando decine di migliaia di ettari; l'alluvione del 1993 è stata una delle più costose nella storia degli Stati Uniti (si stima sia costata circa 15 miliardi di dollari). In questa occasione sono state analizzate diverse immagini radar. Esaminiamo ancora una volta le piane a nord-ovest di St.Louis. In alto appare un'immagine presa dagli astronauti dello Shuttle utilizzando il SIR-C. In basso è invece un'immagine ricavata da fusione di dati JERS-1 e SPOT 3 da cui si evidenzia un buon dettaglio (notate come appaiono le coltivazioni attraverso l'acqua).



L'ultima immagine è una scena Landsat-1 (6 Febbraio 1974) del fiume Barcoo nel Queensland (Sud Australia) straripato a causa delle piogge d'Autunno con inondando le pianie circostanti per oltre 50 Km.



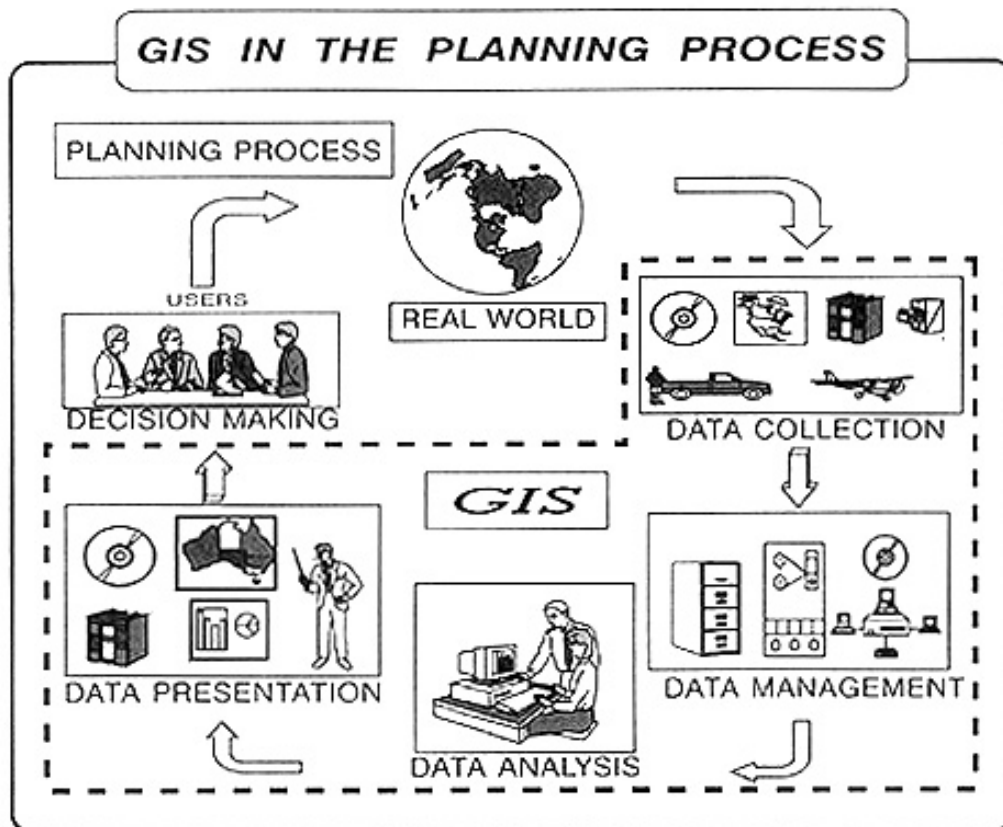
Integrazione del telerilevamento nei Sistemi Informativi Geografici

Il telerilevamento da satellite rappresenta un'importante fonte informativa per un Sistema Informativo Geografico (conosciuto anche con il suo acronimo GIS), un potente strumento nato negli anni 70.

Il GIS è stato definito dall'Associazione per l'Informazione Geografica come: un sistema per acquisire, conservare, verificare, integrare, manipolare, analizzare e visualizzare dati relativi al territorio.

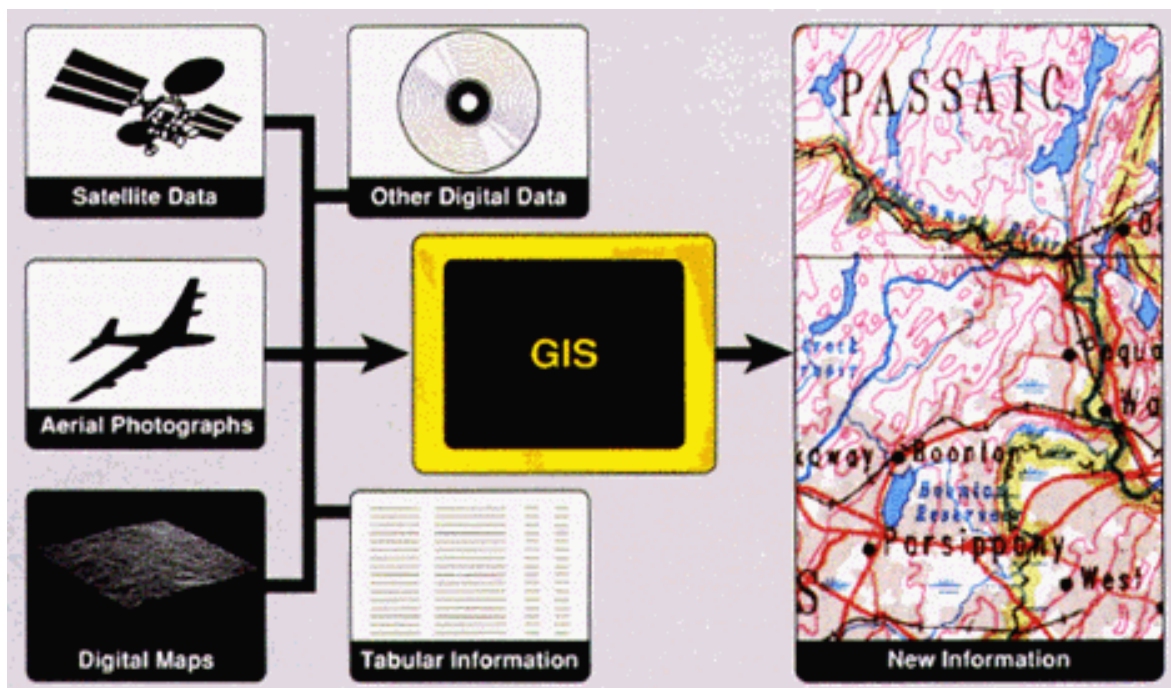
Una più semplice definizione è: un approccio per interpretare mappe e immagini ed utilizzarle per risolvere problemi. La crescita dell'informatica ha enormemente cambiato la maniera in cui più mappe e altri set di dati possono essere integrati, comparati e manipolati.

Il ruolo dei GIS nel processo di pianificazione, ad esempio, per la selezione di un sito, per la gestione dell'ambiente e per altre applicazioni geografiche, è schematizzato nel seguente diagramma:



Da B. Davis, GIS: A Visual Approach, ©1996. Reproduced by permission of Onword Press, Santa Fe, NM.

Un GIS consente di collegare o integrare informazioni che normalmente sono difficili da associare attraverso altri mezzi. Quindi un GIS permette di usare combinazioni di dati per creare nuova informazione.



Agli albori del telerilevamento, la capacità di integrare dati provenienti da differenti sorgenti era limitata. Oggi, con la maggior parte dei dati disponibili in formato digitale, l'integrazione dei dati è diventato un metodo comune usato per l'interpretazione e l'analisi. L'integrazione dei dati fondamentalemente comporta la combinazione di dati provenienti da differenti fonti con l'obiettivo di estrarre migliori e/o più informazioni. In un sistema digitale, dove tutte le fonti di dati sono geometricamente registrate ad una comune base geografica, la potenzialità di estrazione di informazioni è estremamente ampia. Questo è il concetto su cui si basa un Sistema Informativo Geografico. Ogni dato che può essere riferito al territorio, può essere usato in questo tipo di sistema. Esempi possono includere mappe digitali pedologiche, classi di copertura del suolo, specie forestali, rete stradale e molti altri che possono variare in funzione dell'applicazione. I risultati di una classificazione di dati telerilevati, ad esempio, possono essere usati all'interno di un GIS come un'altra fonte di dati per aggiornare mappe esistenti. In conclusione, analizzando diversi set di dati insieme, è possibile estrarre migliori e più accurate informazioni di quelle ricavabili utilizzando una singola fonte di dati.