
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Corso di
Telerilevamento e Sistemi Informativi Territoriali

TEORIA

**Principi di Fisica nel Telerilevamento
L'Immagine Digitale
Sensoristica**

*Docente del Corso:
Francesco Pirotti PhD*

Sommario

Sommario Figure	3
GLOSSARIO.....	6
Definizione di telerilevamento	8
1 Principi di Fisica.....	9
1.1 La radiazione elettromagnetica.....	9
1.2 Interazione della radiazione con l'atmosfera e la superficie terrestre	14
1.2.1 Interazione della EEM con l'atmosfera	15
1.2.1.1 Correzione atmosferica.....	18
1.2.2 Interazione della EEM con la superficie terrestre	23
1.2.3 Interazione della EEM con il sensore	25
2 L'immagine digitale	27
2.1 Le risoluzioni che caratterizzano il sensore/l'immagine	29
2.1.1 La risoluzione spaziale	29
2.1.2 La risoluzione radiometrica	31
2.1.3 La risoluzione sullo spettro.....	33
2.1.4 La risoluzione temporale (tempo di ritorno)	34
2.2 Elementi dell'immagine digitale.....	34
2.2.1 Immagini a scala di grigio.....	35
2.2.2 La rappresentazione a colori	36
3 Il sistema ottica/sensore	37
3.1 Il sistema ottico	37
3.2 Il sensore	39
3.3 Risposta degli elementi del sensore	42
3.3.1 Calibrazioni e correzioni radiometriche	42
4 Dataset da Satelliti.....	1

Sommario Figure

Figura 1: grafico di assorbimento da parte della clorofilla in funzione delle lunghezze d'onda (wavelength) – presa da: "The light-dependent reactions of photosynthesis: Figure 4," by OpenStax College, Biology (CC BY 3.0).....	8
Figura 2: Schema lunghezza d'onda (da: wikipedia)	10
Figura 3: Spettro dell'energia elettromagnetica (EEM).	11
Figura 4: Emittanza e corrispondente lunghezza d'onda emessa a varie temperature (K).	12
Figura 5: Spettro EEM con esempi di firme spettrali di tre classi (Acqua, Vegetazione e terreno) – in grigio le zone(bande) di sensibilità di un sensore (sensore ETM+ del Landsat7) a determinate lunghezze d'onda. Nota bene che le bande registrano un valore medio della riflettanza.	13
Figura 6: Schema dell'interazione delle onde elettromagnetiche con mezzi che attraversa gli oggetti che incontra.	15
Figura 7: Schema dei seguenti fenomeni, dall'alto verso il basso; quantità di energia (spectral intensity) in rosso ed in blu rispettivamente in entrata dal sole ed in uscita dalla terra; finestra atmosferica - percentuale assorbita (grigio) e trasmessa (bianco); componenti gassose responsabili per l'assorbimento (da Wikipedia autore: Robert A. Rohde).	18
Figura 8: Passaggi per collegare il DN al valore di riflettanza BOA	19
Figura 9: Schema interazioni EEM: T=Target, B=background (sfondo), Lp=diffusione, Lt=emissione+riflettanza, i=angolo incidenza luce solare, (da Peng Gong - Advanced Remote Sensing https://nature.berkeley.edu/~penggong/textbook/)	20
Figura 10: esempio di correzione atmosferica – sopra: un'immagine prima della correzione (TOA – Top of Atmosphere) e sotto dopo la correzione atmosferica (BOA – Bottom of Atmosphere). L'elaborazione è stata fatta mediante software dell'ESA SNAP (http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/) – l'immagine proviene dal sito dell'ESA (https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a).	21
Figura 11: Tipi di riflessione degli oggetti: A. riflessione speculare perfetta (specchio), B. mista, C. riflessione diffusa: in natura la modalità è quasi sempre la B.	23

Figura 12: Sopra: firme spettrali di quattro diversi elementi; sotto: firma spettrale estratta da un'immagine (estratto da Gomarasca M. et al. "PER UNA CARTOGRAFIA TEMATICA LOMBARDA - Cap. 12 - Telerilevamento")	25
Figura 13: sinistra – impronte di tre scene del Landsat 8 che coprono Venezia; destra – una scena Landsat 8 caricata in QGIS e rappresentata a falsi-colori (vedi capitolo 2.2.2)	27
Figura 14: Schema di associazione riflettanza → bande (raster) sui tre colori del visibile – nella figura successiva viene evidenziato come più bande sono associate a uno spettro più ampio di lunghezze d'onda.	27
Figura 15: Esempio di bande e corrispondenze nello spettro EEM con combinazione a falsi colori (vedi capitolo 2.2.2 La rappresentazione a colori)	28
Figura 16: risoluzione spaziale a confronto; In senso orario da in alto a sinistra: immagine Landsat-7 30m sovrapposta a volo NIR 0.2 m, volo NIR 0.2 m, volo NIR ricampionato a 2 m, Landsat-7 solamente.	30
Figura 17: Risoluzione spaziale di un'immagine: $L_{x_{img}} \times L_{y_{img}}$ è la dimensione totale dell'immagine in celle o pixel, $L_{x_r} \times L_{y_r}$ è la dimensione reale, a e b sono i lati del pixel ovvero la risoluzione spaziale, riportata in dimensioni reali corrispondenti a metri	31
Figura 18: Rapporto tra quota di volo e risoluzione – $L_{x(r)} = Q_{(r)} \times \tan(\alpha/2) \times 2$	31
Figura 19: Esempio di bit diversi sulla stessa area	32
Figura 20: Zone (bande) dello spettro EEM dove risiede la sensibilità delle bande nei seguenti sensori: ETM+ della missione Landsat 7, OLI+TIRS della missione Landsat 8 e MSI della missione Sentinel-2 – nello sfondo in grigio il valore di trasmittanza delle diverse lunghezze d'onda attraversando l'atmosfera (fonte: http://landsat.gsfc.nasa.gov/)	33
Figura 21: A sinistra - immagine di 9 pixel X 9 pixels con valori di grigio nelle celle (numero in rosso); a destra - corrispondente immagine interpretata a sfumatura di grigio	35
Figura 22: In alto scala dal bianco al nero (scala di grigio), in basso scala dal rosso al nero. Sotto i valori in un'immagine dove alla prima banda è stato assegnato il canale dal rosso al nero.....	35
Figura 23: Rappresentazione spazio colori.....	36
Figura 24: Le prime due immagini a sinistra sono interpretazioni a falsi-colori rispettivamente; a destra rappresentazione a pseudo-colori della stessa zona.....	37

Figura 25: Schema semplificato degli elementi ottici38

Figura 26: Schema di un generico sistema ottico (sinistra) ed a pushbroom (destra)38

Figura 27: Geometrie comuni dei sensori, a sinistra a "pushbroom" a destra a "matrice"..41

GLOSSARIO

BOA – *Bottom of Atmosphere* – parte inferiore dell'atmosfera – identico a ES, indica la superficie terrestre in termini di riflettanza senza l'effetto dell'atmosfera (vedi Figura 6)

Data cube – termine che si riferisce ad immagini multi-banda in quanto una banda è una matrice 2D e n bande sovrapposte somigliano ad un "cubo" di dati.

DN – *Digital Number* anche chiamato "valore di grigio", è il valore della cella del raster di un'immagine digitale ottenuta da telerilevamento

EEM – energia elettro-magnetica -

ES – *Earth Surface* – superficie terrestre, indica la superficie terrestre in termini di riflettanza senza l'effetto dell'atmosfera (vedi Figura 6)

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus; sensore montato sui Landsat 7. Vedi <http://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

ESA – European Space Agency – agenzia spaziale europea, ha lanciato il programma Copernicus che rilascia diversi satelliti in orbita, i "Sentinel" – vedi <http://www.copernicus.eu/main/sentinels>

MSI – Multi-Spectral Instrument – sensore montato sul satellite Sentinel-2 dell'ESA. Vedi caratteristiche in [Tabella 3: Sensori e risoluzioni di satelliti comunemente utilizzati e descrizione dei dataset](#)

NASA – National Aerospace Agency – agenzia aerospaziale americana, ha lanciato le prime missioni nello spazio (anche se il primo satellite in assoluto è lo Sputnik Russo) – il governo USA ha rilasciato gratuitamente moltissimi dataset da missioni, in corso e non, come dati aperti (open-data)

NIR – Near Infra-Red – area dello spettro EEM con lunghezze d'onda 0.7-1.4 μm ; vedi anche [Figura 5](#).

OLI: Operational Land Imager; sensore montato sul satellite Landsat 8 Vedi <http://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

Radianza ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$).– una dimensione in fisica che definisce la quantità di EEM proveniente da una singola unità di area e per una singola unità di angolo solido (direzione). Viene utilizzata per definire emissione o riflessione da parte di superfici con comportamento di diffusione perfetta - vedi anche Figura 11)

SWIR: Short Wave Infra-Red o infrarosso medio – area dello spettro EEM con lunghezze d'onda 1.4-3.0 μm ; vedi [Figura 3](#), [Figura 4](#) e [Figura 5](#).

TIR – Thermal InfraRed – Infrarosso Termico - area dello spettro EEM con lunghezze d'onda 3.0-15.0 μm vedi [Figura 3](#), [Figura 4](#) e [Figura 5](#).

TIRS - Thermal InfraRed Sensor; sensore montato sul Landsat-8 sensibile al TIR.

TOA – Top of Atmosphere – parte superiore dell'atmosfera, termine utilizzato per indicare la EEM in arrivo al sensore dopo aver subito l'effetto dell'atmosfera (vedi Figura 6).

TM: Thematic Mapper; sensore montato sui Landsat 4 e 5. Vedi

<http://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

VIS – Visibile - area dello spettro EEM con lunghezze d'onda 0.4-0.7 μm ; vedi **Figura 3**, **Figura 4** e **Figura 5**

Definizione di telerilevamento

Con il termine telerilevamento si definisce l'insieme di metodi per misurare o stimare delle caratteristiche di oggetti senza che lo strumento venga a contatto con essi. Ovvero ci sarà una certa distanza tra strumento che effettua il rilievo e l'oggetto rilevato; $\tau\eta\lambda\epsilon$ (tēle) significa infatti 'lontano' in greco.

Quando si parla di telerilevamento in senso più ampio si include anche l'eventuale sistema di trasporto (e.g. aeromobile, satellite, drone), il sistema di rilievo e registrazione (ottica e sensore), il prodotto (e.g. l'immagine digitale) ed i sistemi di analisi (*hardware*, metodi ed algoritmi, *software* – i.e. sistemi informativi). Queste misure vengono codificate in modo numerico e legate ad una posizione nel territorio codificata da convenzioni (sistemi di riferimento cartografico/geografico).

Il telerilevamento studia gli oggetti rilevati sfruttando il modo differente che hanno materiali diversi di riflettere la luce, i.e. l'energia delle onde elettromagnetiche (energia elettromagnetica - EEM) – vedi Figura 3 – che proviene in maggior parte dal sole e in parte viene emessa dagli oggetti – vedi Figura 6. Interpretare gli oggetti in funzione di come riflettono la luce è una cosa che facciamo automaticamente con il senso della vista. Ad esempio identifichiamo la vegetazione anche grazie alla sua caratteristica di riflettere la EEM che corrisponde al colore verde, mentre assorbe la EEM corrispondente alle altre lunghezze d'onda che corrispondono agli altri colori.

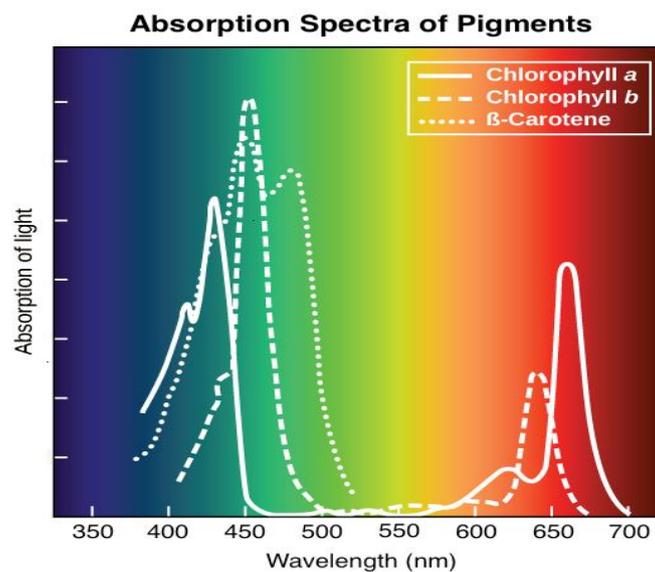


Figura 1: grafico di assorbimento da parte della clorofilla in funzione delle lunghezze d'onda (wavelength) – presa da: "The light-dependent reactions of photosynthesis: Figure 4," by OpenStax College, Biology (CC BY 3.0)

La nostra vista è però limitata ad una fascia molto piccola di EEM che corrisponde ai colori a noi visibili, ovvero a lunghezze d'onda da 400 nm a 800 nm – vedi Figura 3.. I sensori per il telerilevamento consentono di registrare lunghezze d'onda ben oltre quelle a noi percepibili.

Sono anche comunemente utilizzate altre metodologie che consentono di rilevare altri aspetti dalla EEM, come il tempo di volo o la differenza di fase di un segnale su un'onda portante per rilevare la geometria dell'oggetto rilevato (e.g. RADAR e LiDAR).

Si divide il telerilevamento in due classi – **telerilevamento passivo**, dove non viene emessa la EEM, e **telerilevamento attivo** che invece emette EEM e registra la stessa EEM riflessa dall'oggetto; come fare una foto senza flash (telerilevamento passivo) e con il flash (telerilevamento attivo).

1 Principi di Fisica

I principi fisici coinvolti nel telerilevamento riguardano aspetti collegati alla EEM che dalla fonte, il sole, entra nella biosfera, interagisce con la materia nei diversi strati e stati (e.g. gassosa dell'atmosfera, solida o liquida della superficie terrestre) ed entra nell'ottica del sensore e nel suo sistema elettronico che consente di convertire la EEM in voltaggio e poi in numeri che vengono memorizzati digitalmente su un supporto – vedi Figura 6. Nelle sezioni seguenti si spiegano quindi i fenomeni, legati alla EEM, di **emissione**, **riflessione** (speculare e lambertiana), **diffusione**, **assorbimento**.

1.1 La radiazione elettromagnetica

Qualsiasi oggetto ha una temperatura e secondo leggi fisiche emette una data distribuzione di lunghezze d'onda (Figura 5). La superficie terrestre è un corpo che emette energia elettromagnetica ed interagisce in vari modi con quella che arriva dall'esterno (dal sole o da fonti artificiali). Questa energia ha caratteristiche duali "onda - particella" e presenta quindi fenomeni appartenenti alle due categorie. Viene caratterizzata dalla lunghezza d'onda rappresentata dalla lettera greca lambda (λ) – vedi Figura 2) e dalla frequenza in Hertz, ovvero cicli al secondo, grandezza rappresentata con dalla lettera greca nu (ν); la rappresentazione delle possibili lunghezze d'onda e frequenze si chiama spettro

elettromagnetico. Incontriamo così molti fenomeni a noi più o meno famigliari (vedi Tabella 1 e Figura 3).

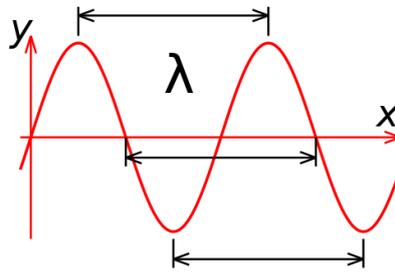


Figura 2: Schema lunghezza d'onda (da: wikipedia)

La relazione tra frequenza, lunghezza d'onda e contenuto di energia (E) è rappresentata dall'equazione sotto:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

Equazione 1: lunghezza d'onda / frequenza

dove c è la velocità della luce (~2.997 x 10⁸ ms⁻¹ nel vuoto), ν è la frequenza, λ la lunghezza d'onda, h è una costante (di Plank: 6.626x10⁻³⁴ J s = 4.1356x10⁻¹⁵ eV s).

Lo spettro elettromagnetico rappresenta lo spettro delle varie lunghezze d'onda, con i nomi comunemente utilizzati per definire alcune zone (e.g. radar, infrarosso vicino etc.. vedi Figura 3). Il visibile risiede in una zona che va da 400 a 700 nm (nanometri – 1x10⁻⁹ m) ovvero 0.4 a 0.7 μm (micrometri - 1x10⁻⁶ m).

Tabella 1: Lunghezze d'onda e utilizzi.

Lunghezza d'Onda	Uso	Lunghezza d'Onda	Uso
Raggi Gamma	Riconoscimento minerali	1.55-1.75 μm	Contenuto in acqua nelle piante o nel terreno
Raggi X	Medico	2.04-2.34 μm	Riconoscimento minerali e tipi di rocce
Ultravioletto (UV)	Rilevamento inquinamento marino	10.5-12.5 μm	Temperatura di una superficie
0.4-0.45 μm	Torbidita` e profondita` dell'acqua	3 cm - 15 cm	Umidita` del suolo, dislivello del suolo
0.7-1.1 μm	Vigore vegetativo	20 cm - 1 m	Densita` chioma e biomassa legnosa
0.4-0.70 μm	Percezione visiva		

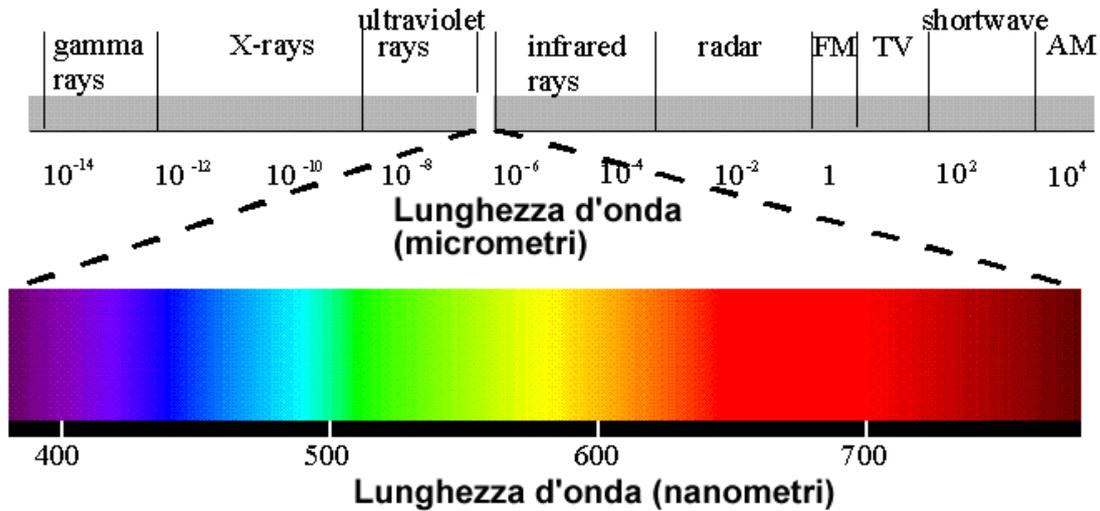


Figura 3: Spettro dell'energia elettromagnetica (EEM).

Le immagini satellitari sono registrazioni dell'energia elettromagnetica che arriva ai sensori; questi, essendo puntati verso gli oggetti di studio, percepiranno pacchetti di EEM (fotoni) che provengono dalla superficie di questi oggetti, sia perché riflessa sia perché emessa dall'oggetto stesso in quanto esso ha una temperatura (vedi Figura 4 ed Equazione 2: Legge di Planck). Per capire il funzionamento è necessario studiare i fenomeni che caratterizzano il comportamento di questa energia e quelli che caratterizzano il funzionamento del sensore che, in poche parole, è un "lettore e traduttore" di EEM in valori numerici. Il comportamento delle onde elettromagnetiche viene chiarito in buona parte con le leggi di *Planck*, di *Stefan-Boltzman* e di *Wien*.

$$E_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Equazione 2: Legge di Planck

Spiega che qualsiasi corpo dotato di temperatura T Kelvin, emette energia (E) ad una data lunghezza d'onda λ : h = Costante di Planck, c = velocità della luce, k = Costante di Stefan.

$$j = \sigma T^4$$

Equazione 3: Legge di Stefan -Boltzmann

dove j = quantità di energia emessa dal corpo per unità di superficie per unità di tempo (radianza), T = Temperatura in Kelvin, σ = costante di Stefan

Quindi un corpo che possiede una temperatura maggiore di 0 gradi Kelvin (zero assoluto) emette EEM con una certa combinazione di lunghezze d'onda che dipende dalla

temperatura (vedi Figura 4). La lunghezza d'onda del picco di emittanza e la temperatura sono inversamente proporzionali, e relativi ad una costante (b) secondo la legge di Wien.

$$b = \lambda T$$

Equazione 4: Legge di Wien

dove $b = 2.897 \times 10^{-3}$ λ = lunghezza d'onda T = temperatura in Kelvin

In altre parole, aumentando la temperatura, il picco di emittanza sarà ad una lunghezza d'onda minore – ovvero ad una frequenza maggiore.

Il concetto viene riassunto nella figura seguente. Un tipico esempio è la luce emessa da una lampadina ad incandescenza: il calore del filamento, una volta raggiunta una data temperatura, crea l'emissione nel visibile della EEM.

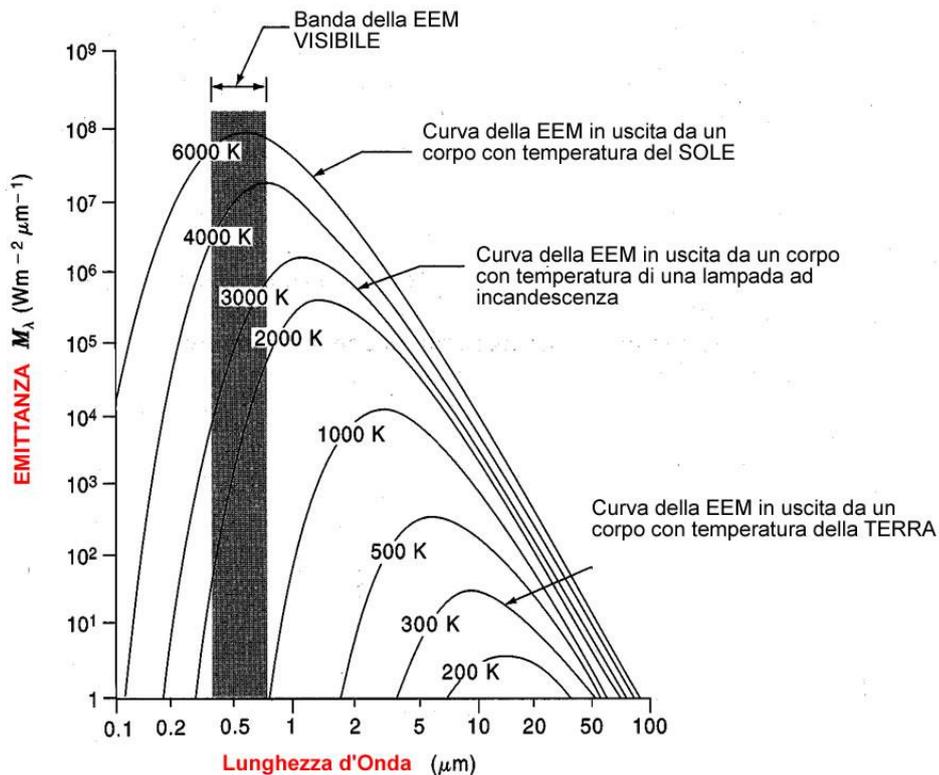


Figura 4: Emittanza e corrispondente lunghezza d'onda emessa a varie temperature (K).

Si evince dalla precedente figura che qualsiasi materiale emette, ad ogni lunghezza d'onda, una certa quantità di energia elettromagnetica in funzione della sua temperatura, che può

essere misurata in watt per metro quadrato. Nota bene che per ogni temperatura ci sarà un picco ad una data lunghezza d'onda (λ_{max}). In altre parole emette uno spettro di radiazioni caratteristico per quel materiale a quella temperatura.

Esempio 1: un filamento di una lampadina ad incandescenza ripreso a rallentatore mentre si accende la luce appare prima rosso, poi giallo e poi bianco.

Esempio 2: si riesce a capire la temperatura di una stella in funzione del colore – le stelle rosse sono più fredde rispetto alle bianche, mentre le stelle blu-viola sono le più calde in assoluto.

Un grafico che riporta l'energia in funzione della lunghezza d'onda rappresenta una *firma spettrale*, come vedremo meglio più avanti. *La firma spettrale della EEM proveniente dal sole viene modificata dai mezzi che attraversa (atmosfera) e con cui interagisce alla superficie terrestre, e.g. vegetazione, suolo nudo o acqua (vedi Figura 5 e Figura 6).*

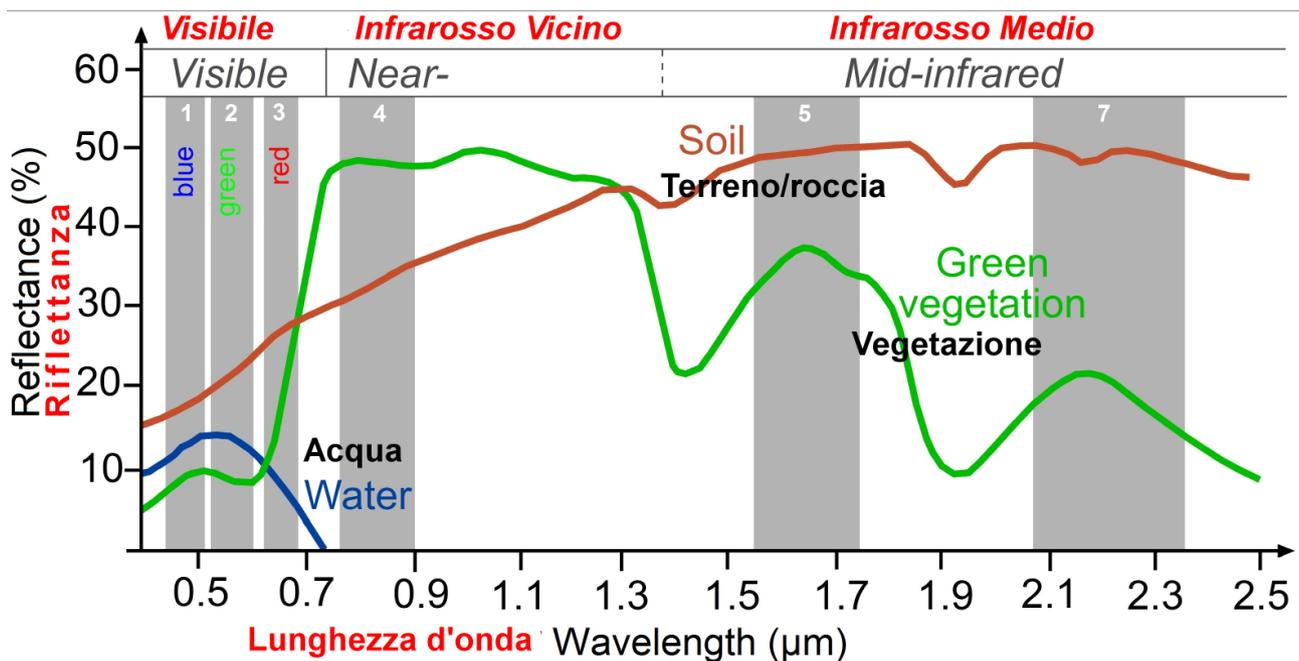


Figura 5: Spettro EEM con esempi di firme spettrali di tre classi (Acqua, Vegetazione e terreno) – in grigio le zone(bande) di sensibilità di un sensore (sensore ETM+ del Landsat7) a determinate lunghezze d’onda. Nota bene che le bande registrano un valore medio della riflettanza.

Le linee nel grafico in **Figura 5** sopra hanno una “forma” caratteristica, che riflette sia la fonte dalla quale proviene la EEM (e.g. il sole), sia il suo tragitto ed interazione con gli elementi che incontra (atmosfera, superficie terrestre). Dunque la sua “forma” cambia in funzione delle interazioni che subisce nello spazio che si frappone tra la sorgente emittente e la superficie riflettente, oltre che dal modo in cui viene letta, registrata e tradotta dal

particolare sensore (trasformazione da radianza a voltaggio a DN). Questo fenomeno è molto importante in quanto permette di risalire a quali elementi hanno interagito con la EEM leggendo proprio la "forma" o il "grafo" che prende il nome di **firma spettrale**.

1.2 Interazione della radiazione con l'atmosfera e la superficie terrestre

L'energia elettromagnetica (EEM) che viene registrata dal sensore e che viene "tradotta" in valori numerici – DN Digital Number - e quindi in immagine digitale - subisce diverse modifiche nel suo tragitto sorgente->oggetto->sensore (vedi Figura 6). Una volta analizzati questi cambiamenti è più semplice capire le caratteristiche dell'immagine digitale creata, e come questa rappresenti l'oggetto. Per prima cosa è necessario chiarire che l'energia che arriva al sensore proviene sia da fonti esterne al pianeta terra - per la maggior parte dal sole, o, in alcuni tipologie di sensori (**telerilevamento attivo**) dal sensore stesso – vedi sezione dedicata. In parte viene emessa anche dal pianeta stesso come indicato dalla legge di Planck illustrata nella Figura 4, che spiega come un qualsiasi corpo, che possiede una temperatura, emetta EEM. Questa energia, prima di arrivare al sensore, deve per forza di cose interagire con i mezzi che attraversa (atmosfera) che modificano la sua firma spettrale. Grazie a questa interazione, ogni tipo di oggetto con il quale l'energia interagisce lascia la sua "impronta", i.e. *firma spettrale*.

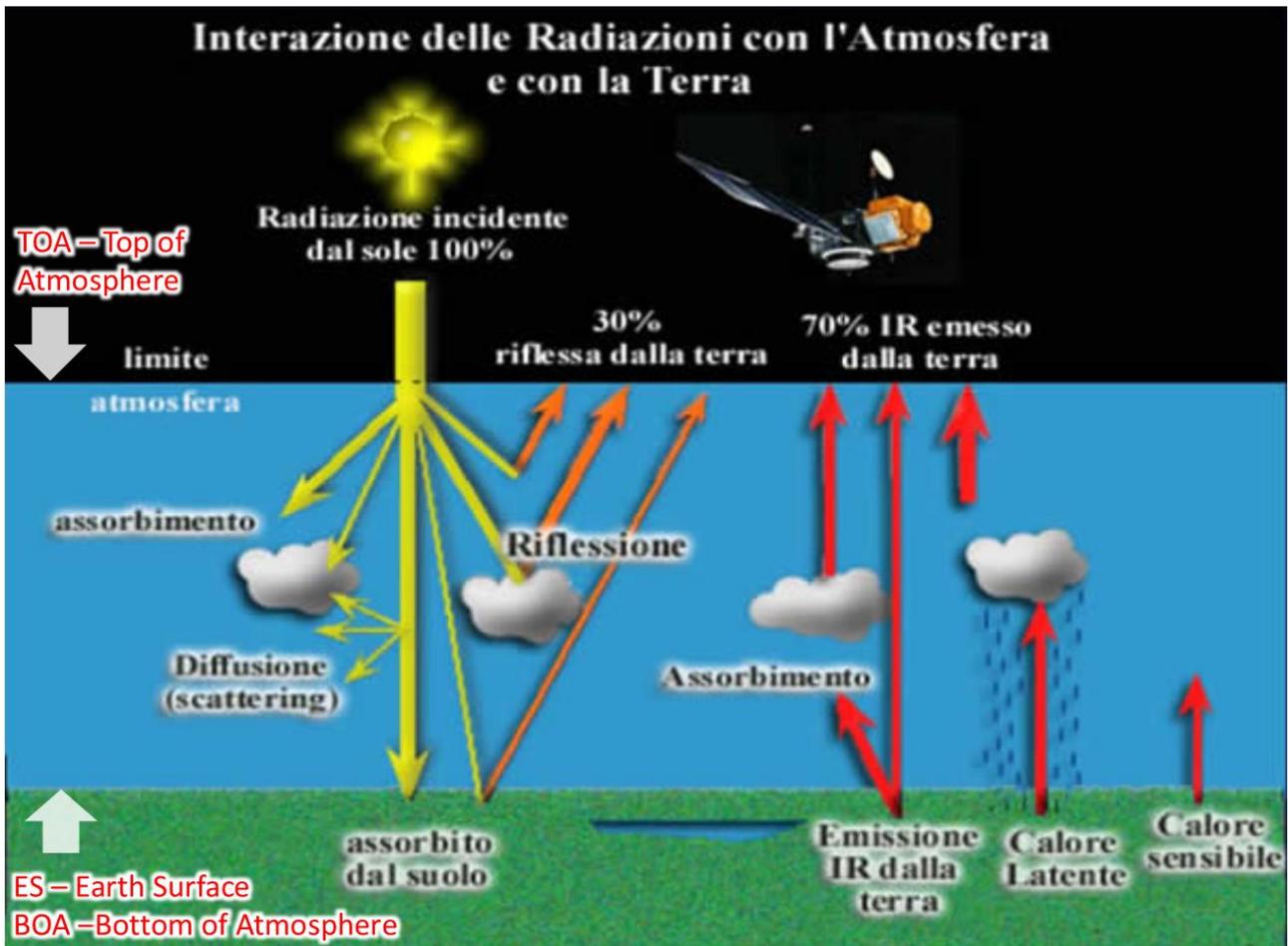


Figura 6: Schema dell'interazione delle onde elettromagnetiche con mezzi che attraversa gli oggetti che incontra.

Riassumendo, ogni lunghezza d'onda della EEM può essere riflessa, assorbita, o trasmessa in proporzioni diverse in funzione del mezzo che incontra.

$$E_{i(\lambda)} = E_{t(\lambda)} + E_{a(\lambda)} + E_{r(\lambda)}$$

Equazione 5: bilancio EEM

dove E = EEM, *i*=incidente, *t*=trasmessa, *a*=assorbita, *r*=riflessa.

Il primo mezzo che incontra la EEM proveniente dal sole è l'atmosfera, che è composta da diversi gas e molecole di acqua in diverse formazioni come nuvole, nebbia etc.

1.2.1 INTERAZIONE DELLA EEM CON L'ATMOSFERA

L'atmosfera è un mezzo che modifica la EEM nel suo tragitto. Il sensore, in funzione della sua quota relativa al terreno, avrà un certo spessore di gas atmosferici tra esso e la

superficie terrestre. Questo mezzo modifica la composizione dello spettro EEM rispetto a quella originaria proveniente dal sole Figura 5.

L'atmosfera ha tre effetti sulla EEM incidente: (1) **modifica la composizione della EEM** (lunghezze d'onda) dato che assorbe alcune lunghezze d'onda e ne lascia passare alcune altre in parte o completamente, (2) **attenua la EEM riflessa dalla superficie terrestre**, sempre per il motivo al punto precedente, (3) **modifica la EEM** riflessa dalla superficie terrestre aggiungendo quella diffusa/riflessa dalle particelle nell'atmosfera – le nuvole sono l'esempio più evidente, ma anche nebbia e smog.

Gli elementi che hanno un effetto sulla EEM possono essere divisi in funzione della loro **dimensione relativa alla lunghezza d'onda** della EEM (X) e subire diversi fenomeni riassunti in Tabella 2.

$$X = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

Equazione 6: relazione tra dimensione particelle e lunghezza d'onda per diffusione

dove $2\pi r$ è la dimensione della particella relativa al suo raggio medio (r) e λ la lunghezza d'onda, x è il valore dell'indicatore (vedi [Tabella 2](#)).

Tabella 2: Differenze di fenomeni di interazione EEM–atmosfera in funzione della dimensione del particolato. X è descritta in [Equazione 6](#).

Diffusione	Dimensione	Esempio
Segue legge di Rayleigh	$X \ll 1$ ($r \ll \lambda^{-4}$) molecole gas	Tramonto, colore del cielo, colore del sole
Segue legge di Mie	$X \approx 1$ polveri, fumo	
Diffusione non selettiva	$X \gg 1$ ($r \gg \lambda^{-4}$) Gocce di acqua	Nebbia, colore delle nuvole

La composizione dell'atmosfera non è costante nello spazio, e quindi la modifica che apporta allo spettro EEM non è costante né nello spazio, né nel tempo. E' però certamente stimabile utilizzando determinati parametri come ad esempio la pressione, lo spessore (distanza al suolo), l'umidità e la composizione in percentuale dei gas e dei particolati che la compongono. Si può comunque definire per ogni lunghezza d'onda la percentuale di EEM assorbita, definendo quindi due caratteristiche dell'atmosfera, la **trasmissione**, ovvero

quanta EEM riesce ad attraversare lo strato di atmosfera ed arrivare al suolo, ed il suo inverso, l'**assorbimento**. Il grafico seguente in Figura 7 riporta i valori di trasmittanza atmosferica in funzione della lunghezza d'onda. Le fasce di lunghezza d'onda poco ostacolate dall'atmosfera vengono dette "**finestre atmosferiche**" in quanto lasciano passare la EEM a quella lunghezza d'onda (vedi Figura 7). In altri casi, per altre lunghezze d'onda, l'atmosfera blocca completamente o in parte il passaggio.

Esempio 1: i raggi UV sono bloccati dall'ozono – in questo caso si può proprio dire "grazie al cielo"! Nel telerilevamento la lunghezza d'onda che corrisponde all'ultravioletto è utilizzata molto poco, ma ci sono delle applicazioni specifiche – vedi

Esempio 2: l'anidride carbonica (Carbon Dioxide) è uno dei "gas serra", ovvero non fa passare la lunghezza d'onda che corrisponde all'infrarosso termico (il calore). La terra però si scalda quando esposta ai raggi solari, e la quantità di calore che esce dalla biosfera per ritornare nello spazio è modulato proprio da questi gas. Troppi gas serra e la Terra si scalda, troppi pochi e la Terra subirebbe glaciazioni.

Esempio 3: lo stesso fenomeno dell'esempio precedente accade quando lasciamo la macchina al sole. Il vetro è un materiale che fa passare la luce visibile (trasmette il 100% della EEM visibile), ma non fa passare la EEM termica. La macchina si scalda quando la EEM interagisce con il materiale solido – provate a toccare il volante d'estate – ma il calore non esce.

In figura si vede anche come ogni gas che compone l'atmosfera assorbe una certa lunghezza d'onda.

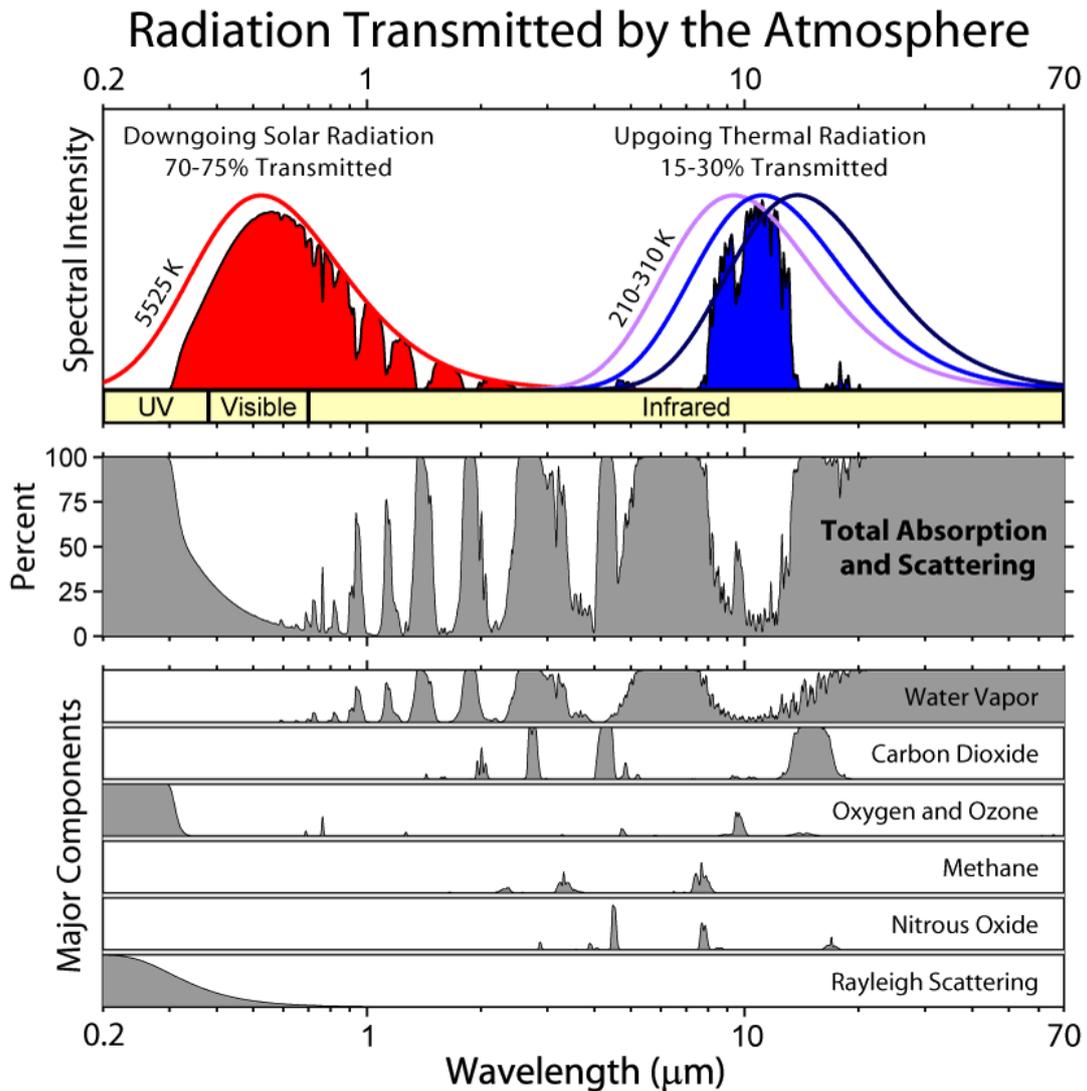


Figura 7: Schema dei seguenti fenomeni, dall'alto verso il basso; quantità di energia (spectral intensity) in rosso ed in blu rispettivamente in entrata dal sole ed in uscita dalla terra; finestra atmosferica - percentuale assorbita (grigio) e trasmessa (bianco); componenti gassose responsabili per l'assorbimento (da Wikipedia autore: Robert A. Rohde).

1.2.1.1 Correzione atmosferica

Se si vuole studiare la superficie terrestre, l'effetto dell'atmosfera sulla firma spettrale della EEM è sicuramente un fattore di disturbo. Quello che "vede" (i.e. registra) un sensore da un satellite è un'immagine disturbata dall'atmosfera. Ci sono delle tecniche per "correggere" l'effetto dell'atmosfera. Il termine "correggere" è tra virgolette perché il termine fa sembrare l'effetto un errore, ma è tale solo se consideriamo lo studio della superficie terrestre. In

alcune applicazioni si studia l'effetto dell'atmosfera sulla EEM per stimare proprio la composizione dell'atmosfera.

Va ricordato che il sensore registra la quantità di EEM che arriva al sistema ottico trasformando questa quantità in valori numerici registrati su supporti digitali (vedi capitolo 2). Come si evince dalla Figura 6, la EEM viene modificata dalla superficie terrestre (Bottom of Atmosphere - **BOA**) fino all'estremo esterno dell'atmosfera (Top of Atmosphere - **TOA**) e poi arriva al sistema ottica/sensore dove le diverse componenti della EEM vengono trasformate da radianza¹ ad una differenza di potenziale elettrico, (volt joule-coulomb⁻¹) ed il voltaggio viene registrato come un numero, chiamato Digital Number (DN) che è il valore del pixel che trovate nel raster corrispondente alla banda (vedi Figura 8). Nell'analisi delle immagini siamo interessati al valore di riflettanza² BOA, ma abbiamo il valore DN, che, subendo i passaggi sopra descritti.

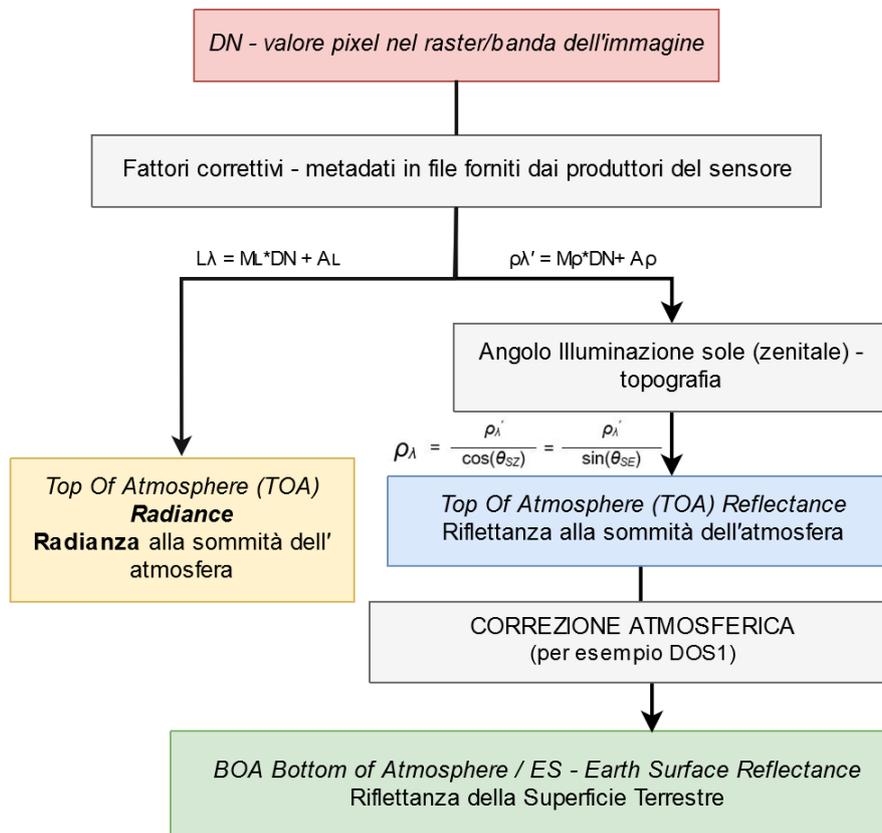


Figura 8: Passaggi per collegare il DN al valore di riflettanza BOA

¹ La radianza è una grandezza fisica (watts-steradian⁻¹·m⁻²·µm⁻¹) che misura la quantità di energia registrata dal sensore.

² Differenza tra radianza e riflettanza? La riflettanza è la radianza riflessa relativa alla radianza in entrata, quindi non ha unità di misura e può essere espressa in percentuale, o rapporto.

Riflettanza è un termine generico che esprime la proporzione di EEM riflessa rispetto a quella che arriva all'oggetto, quindi meno quella trasmessa o assorbita (vedi Equazione 5: bilancio EEM) – spesso è espressa in percentuale o rapporto tra 0 ed 1, ma può anche essere scalata su numeri interi; rimane comunque una misura relativa.

In seguito si riportano alcune tecniche per correggere l'effetto dell'atmosfera, ovvero per passare da riflettanza TOA a riflettanza BOA. Prima vanno eseguite altre correzioni e calibrazioni radiometriche, che vengono descritte in toto nel capitolo 3.3 "Risposta degli elementi del sensore". Tutto insieme viene riassunto nella scheda dell'**Esercizio n. 2 – Correzioni Radiometriche**.

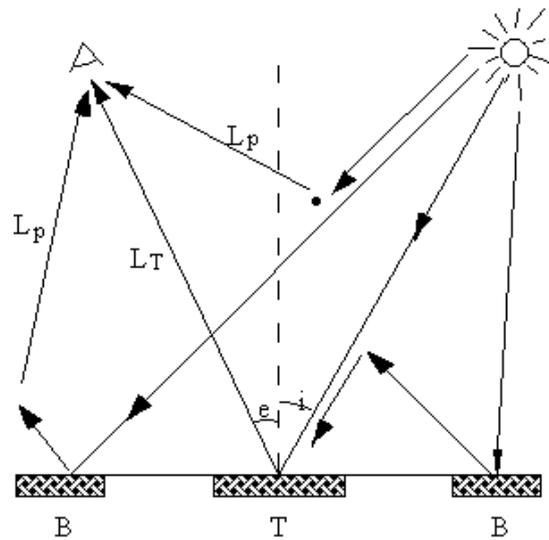


Figura 9: Schema interazioni EEM: T=Target, B=background (sfondo), L_p =diffusione, L_t =emissione+riflettanza, i =angolo incidenza luce solare, (da Peng Gong - Advanced Remote Sensing <https://nature.berkeley.edu/~penggong/textbook/>)

Come si evince dalla Figura 9, se si vuole utilizzare il telerilevamento per studiare la superficie terrestre ci interessa L_t , "ripulito" dal L_p ; è necessario quindi eliminare L_p per ottenere L_t , e questo richiede di eliminare l'effetto dell'atmosfera.



Figura 10: esempio di correzione atmosferica – sopra: un'immagine prima della correzione (TOA – Top of Atmosphere) e sotto dopo la correzione atmosferica (BOA – Bottom of Atmosphere). L'elaborazione è stata fatta mediante software dell'ESA SNAP (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>) – l'immagine proviene dal sito dell'ESA (<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a>).

Il passaggio da riflettanza TOA \rightarrow radianza TOA \rightarrow DN è appannaggio del sistema sensore e quindi il calcolo per il calcolo inverso **DN \rightarrow radianza TOA \rightarrow riflettanza TOA** viene descritto nel capitolo dedicato ai sensori: vedi "3.3.1 - Calibrazioni e correzioni".

Ci sono diversi metodi per correggere l'effetto dell'atmosfera quindi **riflettanza TOA \rightarrow riflettanza BOA**. I primi due descritti in seguito sono modelli empirici e più comunemente

utilizzati, in quanto non richiedono la conoscenza di parametri atmosferici. L'ultimo metodo è più sofisticato, ma richiede le informazioni sui parametri atmosferici.

Modelli empirici - Trasformazione diretta

La trasformazione diretta implica un rilievo in campo di valori di riflettanza nel momento della ripresa dell'immagine da satellite. I valori misurati sul campo vengono poi usati applicando una funzione di trasformazione tra DN del pixel ed il valore di riflettanza

$$Rt_{\lambda} = a \times DN_{\lambda} + b$$

dove Rt è il valore di riflettanza BOA misurato a terra, nello stesso momento della registrazione fatta dal satellite, con gli strumenti sul campo (e.g. spettrometro), a e b sono i parametri, che si calcolano automaticamente dato che conosciamo il DN del pixel corrispondente alla misura. Avendo più pixel di controllo è possibile risolvere l'equazione per a e b , e quindi correggere *trasformare tutti i DN in Rt* .

Questo metodo è utile anche quando ci sono oggetti con Rt noti e che coprono almeno un pixel completamente, quindi dando pixel "puri" – ad esempio corpi idrici di acqua pulita e calma hanno valori noti di riflettanza – in questo caso non serve fare rilievi a terra.

Modelli empirici - Pixel "nero" – Dark Object Subtraction (DOS)

Un metodo, più semplice, in quanto non richiede rilievi o informazioni particolari, ma meno efficace, è quello che presuppone che nell'intera immagine ci siano almeno alcuni pixel in zone d'ombra³. Si ipotizza dunque che da queste aree la radianza che arriva al sensore è solo dovuta a radianza diffusa dall'atmosfera e non da quella proveniente dall'oggetto. In assenza di radianza diffusa dall'atmosfera, il DN di questi pixel dovrebbe essere zero; un

³ Attenzione! Questa supposizione potrebbe non corrispondere alla realtà. Inoltre decade se utilizziamo aree piccole e con orografia non complessa (quindi senza avvallamenti che forniscono le zone "dark" ovvero in ombra)

valore superiore indica che quella risposta è data dalla diffusione dell'atmosfera e quindi si può sottrarre ai valori di DN di tutti gli altri pixel:

$$FC_{\lambda} = DN_{\lambda}^{pixelNero-0.01\%}$$

dove FC è il fattore di correzione, ovvero il valore da sottrarre a tutti i pixel della banda λ .

Modelli parametrici/fisici

Modelli più complessi richiedono più parametri, e considerano i diversi fenomeni di diffusione (Rayleigh e Mie). Alcuni esempi sono il LOWTRAN 7, il 6S ed il 5S. L'applicazione di questi modelli richiede un'accurata valutazione delle condizioni dell'atmosfera (umidità, trasparenza etc...), in quanto danno buoni risultati quando queste corrispondono alle indicazioni del modello stesso.

1.2.2 INTERAZIONE DELLA EEM CON LA SUPERFICIE TERRESTRE

La EEM arriva alla superficie terrestre e subisce i fenomeni fisici prima indicati (vedi Figura 6). Arriva quindi al sensore dalla superficie terrestre in quanto riflessa oppure emessa da essa (in quanto avente una temperatura – vedi leggi di Boltzman, Plank e Wien). La riflettanza è il risultato del fenomeno fisico per cui un corpo interagisce con la radiazione in arrivo riflettendola seguendo delle leggi fisiche ben definite, come visualizzato in Figura 11.



Figura 11: Tipi di riflessione degli oggetti: A. riflessione speculare perfetta (specchio), B. mista, C. riflessione diffusa: in natura la modalità è quasi sempre la B.

La riflettanza è la misura della riflessione, ovvero il rapporto tra intensità riflessa e intensità incidente. Oggetti lucidi (specchi) tendono verso una riflessione speculare, mentre oggetti opachi tendono verso una riflessione diffusa quasi perfetta (Lambertiana). La maggior parte degli elementi in natura hanno un comportamento misto. Le superfici "opache" tendono invece verso i diffusori perfetti. Per opache si intende superfici che hanno una tessitura con elementi di dimensione dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda che li colpisce. All'occhio nudo questi elementi vengono visti come opachi perchè

non si riesce a percepire gli elementi microscopici che fanno da diffusori della luce. Questo fenomeno viene utilizzato anche per produrre superfici *ad hoc* che riflettono non specularmente.

Esempio: le targhe delle macchine, i cartelli stradali, i vetri di alcuni portafoto, sono esempi di superfici opache. In particolare le targhe ed i cartelli stradali, in quanto sarebbe pericoloso che il sole ad una data angolazione riflettesse completamente da un cartello accecando chi guida le auto.

Ogni elemento in natura interagisce in un certo modo con la radiazione e crea una sua firma spettrale tipica (vedi Figura 5). Ovviamente in natura la maggior parte degli oggetti sono composti da più elementi, e quindi la loro firma spettrale sarà il risultato del mescolamento (*spectral mixing*) delle diverse firme spettrali degli elementi che li compongono, in funzione della percentuale di ogni elemento. Inoltre il singolo elemento dell'immagine (pixel) rappresenta un'area più o meno grande di superficie terrestre (vedi capitolo "La risoluzione spaziale") e all'interno di questa area ci possono essere diversi elementi – e.g. parte erba parte cemento.

Diversi sforzi sono stati fatti per individuare non solo le firme spettrali tipiche degli elementi, ma anche per catalogare le firme spettrali dei diversi oggetti in natura più utili per l'analisi, come ad esempio la firma spettrale di diverse specie di vegetazione, di diversi tipi di suolo e dei materiali edilizi (per individuare le zone urbane dalle immagini digitali fino ad analisi più specifiche come le coperture di amianto nei fabbricati).

La firma spettrale viene quindi registrata dal sensore e trasformata nell'immagine digitale (vedi **Figura 5**). L'immagine viene analizzata dall'operatore per identificare, mediante metodi matematici in modo automatico o semiautomatico, a che oggetti appartengono le firme spettrali registrate; questa operazione di dividere i pixel in classi di oggetti viene detta **segmentazione**, mentre la fase di associare ad una classe un dato elemento viene detta propriamente di **classificazione**.

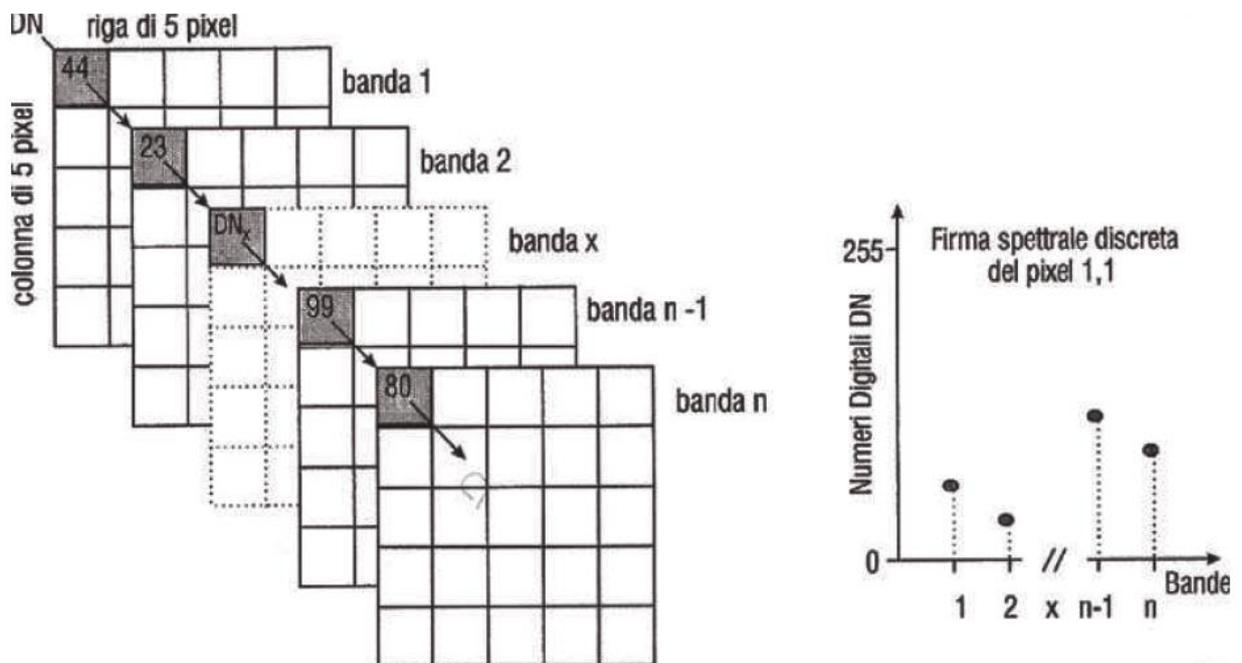
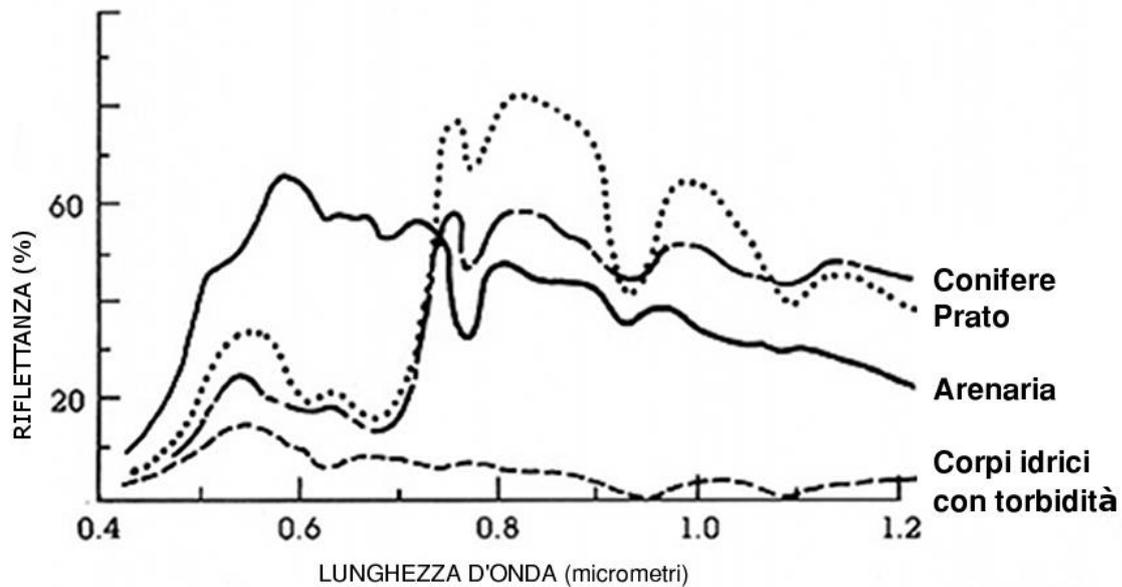


Figura 12: Sopra: firme spettrali di quattro diversi elementi; sotto: firma spettrale estratta da un'immagine (estratto da Gomasca M. et al. "PER UNA CARTOGRAFIA TEMATICA LOMBARDA - Cap. 12 - Telerilevamento")

1.2.3 INTERAZIONE DELLA EEM CON IL SENSORE

Il sensore registra la radianza della EEM che gli arriva in uscita dal sistema terra: come prima menzionato questa può essere stata emessa direttamente dall'oggetto rilevato o essere radiazione solare riflessa o, ancora, riflessa da un'eventuale EEM emessa dal sensore stesso come nel caso del telerilevamento attivo (Radar, SAR, laser scanning). In

tutti i casi le onde elettromagnetiche subiscono gli effetti dell'interazione con le particelle fisiche presenti nell'atmosfera e con la superficie terrestre, prima di "entrare" nel sistema ottico del sensore. Il sensore, come viene spiegato più chiaramente avanti (vedi sezione "Il sensore") ha un componente che è sensibile alla EEM e da questa viene "impressionato" a rispondere con un voltaggio proporzionale alla quantità (radianza) di EEM, voltaggio che viene registrato come un numero, il digital number (DN). La quantità di energia all'interno di questo intervallo viene trasformata in impulsi elettrici e questi a loro volta trasformati in un valore numerico. Si rimanda al capitolo sui sensori per una descrizione dettagliata.

2 L'immagine digitale

Un'immagine digitale riprende una scena della superficie terrestre di una data dimensione, a volte ci si riferisce all'impronta a terra dell'immagine come in figura sotto.

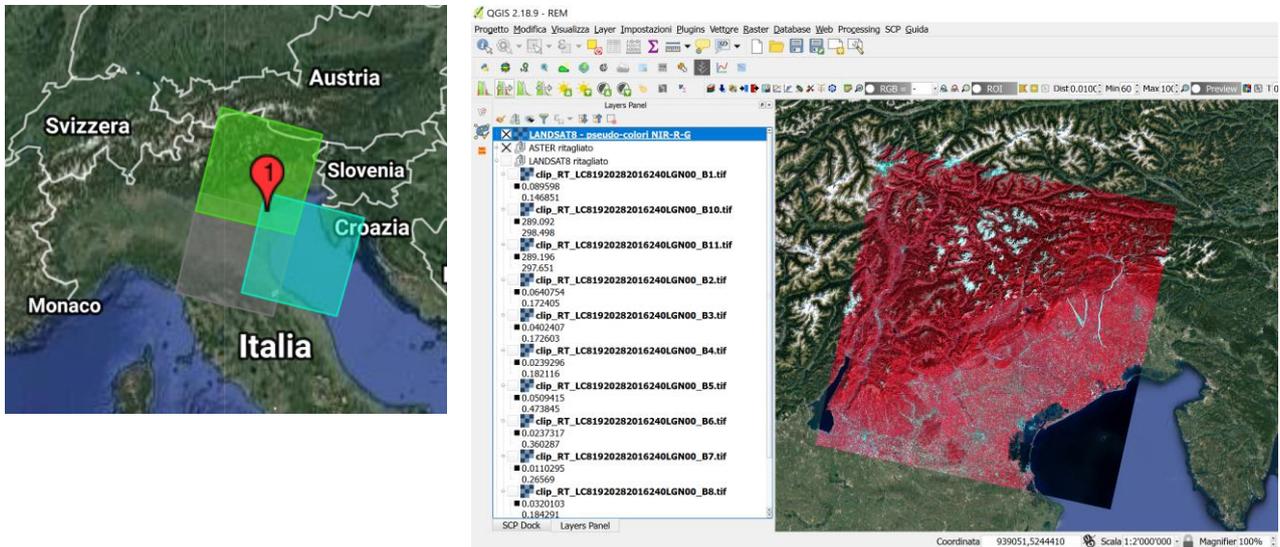


Figura 13: sinistra – impronte di tre scene del Landsat 8 che coprono Venezia; destra – una scena Landsat 8 caricata in QGIS e rappresentata a falsi-colori (vedi capitolo 2.2.2)

Come illustrato alla fine del capitolo precedente, la EEM in arrivo al sensore entra attraverso il sistema ottico e “impressiona” gli elementi sensibili del sensore, ovvero i CCD che rispondono alla EEM proporzionalmente, creando una differenza di potenziale (voltage) che viene tradotto in numeri che vengono registrati in una memoria. Ogni valore corrisponde ad una parte dell’area della superficie terrestre ripresa dal sensore, e viene associata ad un pixel dell’immagine finale. Per analogia, anche l'apparato della vista negli animali è un sensore che traduce l'energia riflessa dagli oggetti verso cui sono puntati gli occhi in segnali elettrici interpretabili dal nostro sistema nervoso.

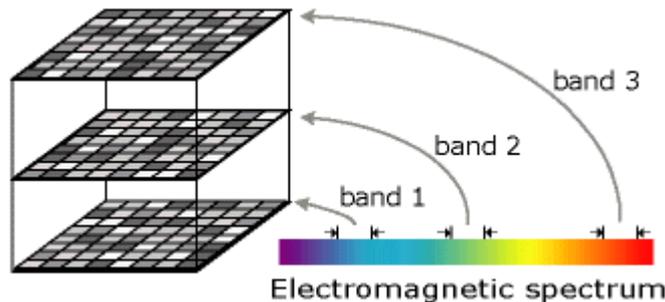


Figura 14: Schema di associazione riflettanza → bande (raster) sui tre colori del visibile – nella figura successiva viene evidenziato come più bande sono associate a uno spettro più ampio di lunghezze d’onda.

L'immagine a colori che noi vediamo sullo schermo è la rappresentazione di questa matrice di valori che vengono tradotti in luminosità dei pixel nello schermo usando uno dei tre canali (rosso verde e blu – RGB *red, green, blue*) - .

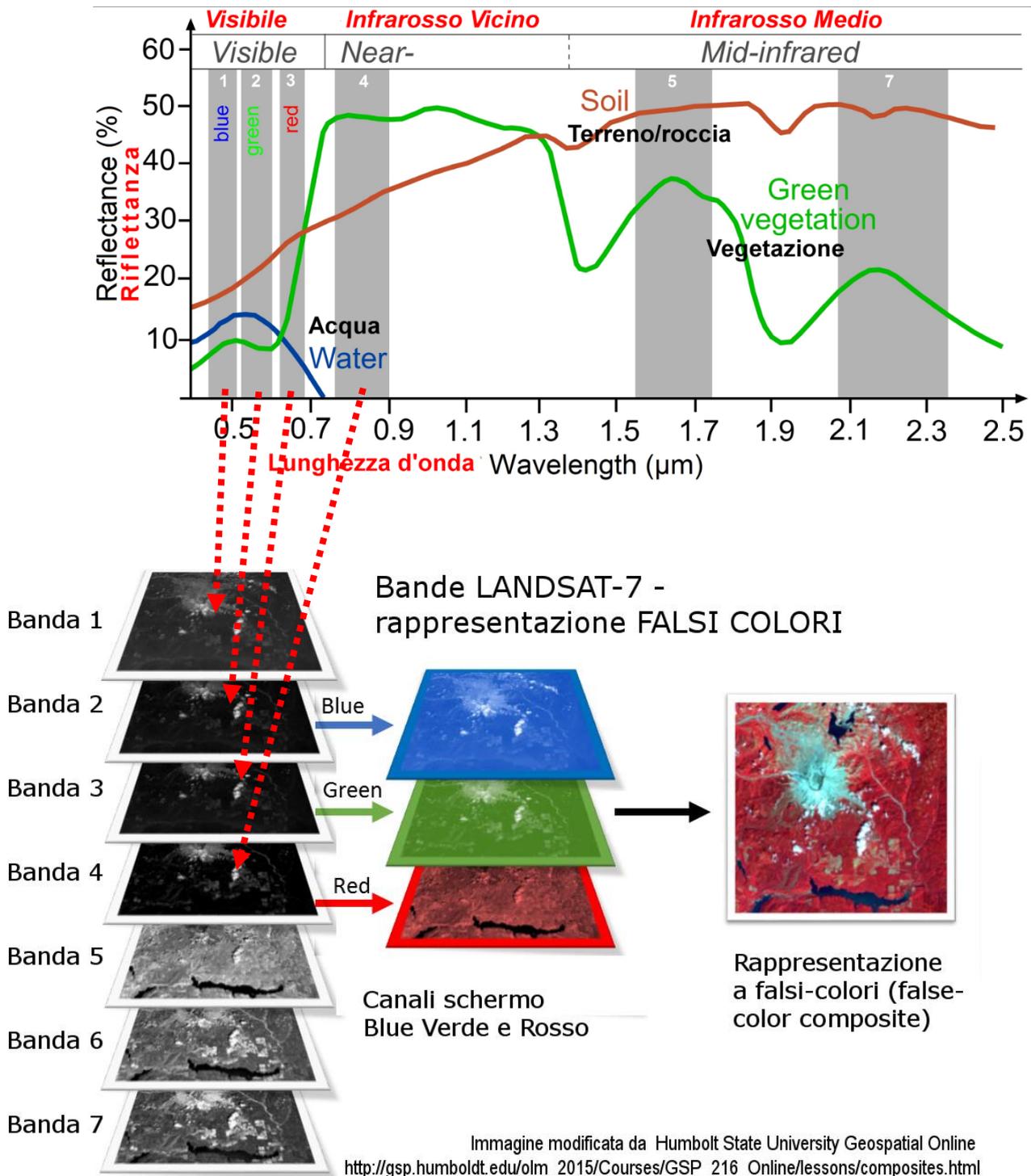


Figura 15: Esempio di bande e corrispondenze nello spettro EEM con combinazione a falsi colori (vedi capitolo 2.2.2 La rappresentazione a colori)

Prima dell'avvento dei supporti digitali di memoria, le immagini erano "analogiche" e venivano create utilizzando cristalli di ossidi d'argento che, polarizzandosi con la luce, coloravano la pellicola che veniva poi sviluppata su carta.

2.1 Le risoluzioni che caratterizzano il sensore/l'immagine

Per descrivere adeguatamente le caratteristiche di un'immagine tele rilevata – e quindi del sensore che l'ha prodotta – si riportano tre grandezze che la definiscono. Nei capitoli successivi verranno descritte le seguenti caratteristiche delle immagini digitali:

1. Risoluzione spaziale
2. Risoluzione radiometrica
3. Risoluzione sullo spettro EEM (spetttrale)

Anche una quarta risoluzione, la risoluzione temporale, è una grandezza utile da conoscere, anche se propriamente legata al piano di orbita/volo della piattaforma che trasporta il sensore.

2.1.1 LA RISOLUZIONE SPAZIALE

La risoluzione spaziale è la dimensione nel reale da una unità elementare della matrice raster (i.e. il pixel o cella). Nella cella viene registrato il singolo valore di DN che è il valore di radianza che arriva al sensore da tutti gli elementi nell'area ripresa e, limitatamente, anche da quelli vicini. In Figura 9 questo è ben schematizzato con l'area che corrisponde al pixel (T, target) ma anche ci sarà un apporto da aree limitrofe (B, background). Ci sarà quindi solo un DN per singola cella per ogni banda. La conoscenza di questa caratteristica è importante in quanto il valore di riflettanza registrato nell'immagine sarà una media delle riflettanze (i.e. firma spettrali) di tutti gli elementi che sono inclusi in quell'area + area limitrofa + atmosfera. Per esempio se si utilizza un'immagine dal satellite Landsat-8, banda 2, si avrà una risoluzione di 30 metri per lato del pixel, quindi il valore di riflettanza di ogni pixel sarà la riflettanza media di tutto quello che c'è all'interno di 900 m² nella lunghezza d'onda che corrisponde al blu (vedi Figura 20). L'area ripresa in una singola scansione del satellite dipende dalla distanza tra punto focale e superficie ripresa e dall'angolo focale (vedi Figura 18). Quest'ultima solitamente rimane fissa ed è caratteristica del tipo di sensore.

Nel caso di **telerilevamento da aeromobile o da drone**, la distanza può variare con la quota della superficie / la quota di volo. Si parla di risoluzione spaziale **media** in quanto può

variare a seconda della **distanza del sensore** dall'elemento ripreso. Questa distanza non è costante in quanto la superficie terrestre ha quota variabile, e quindi presenta variazioni sia tra riprese che all'interno della stessa ripresa. Un'altra ragione per la quale si parla di risoluzione spaziale media è che la dimensione del pixel non è costante e dipende **dalla posizione del pixel nell'immagine**; il pixel centrale avrà una dimensione leggermente minore di quella dei pixel ai margini in quanto questi subiscono una leggera deformazione per via della geometria della ripresa. Il pixel centrale è quello di riferimento, e viene chiamato anche pixel **nadirale** o a **nadir** (termine dalla lingua araba che significa "immediatamente opposto a").

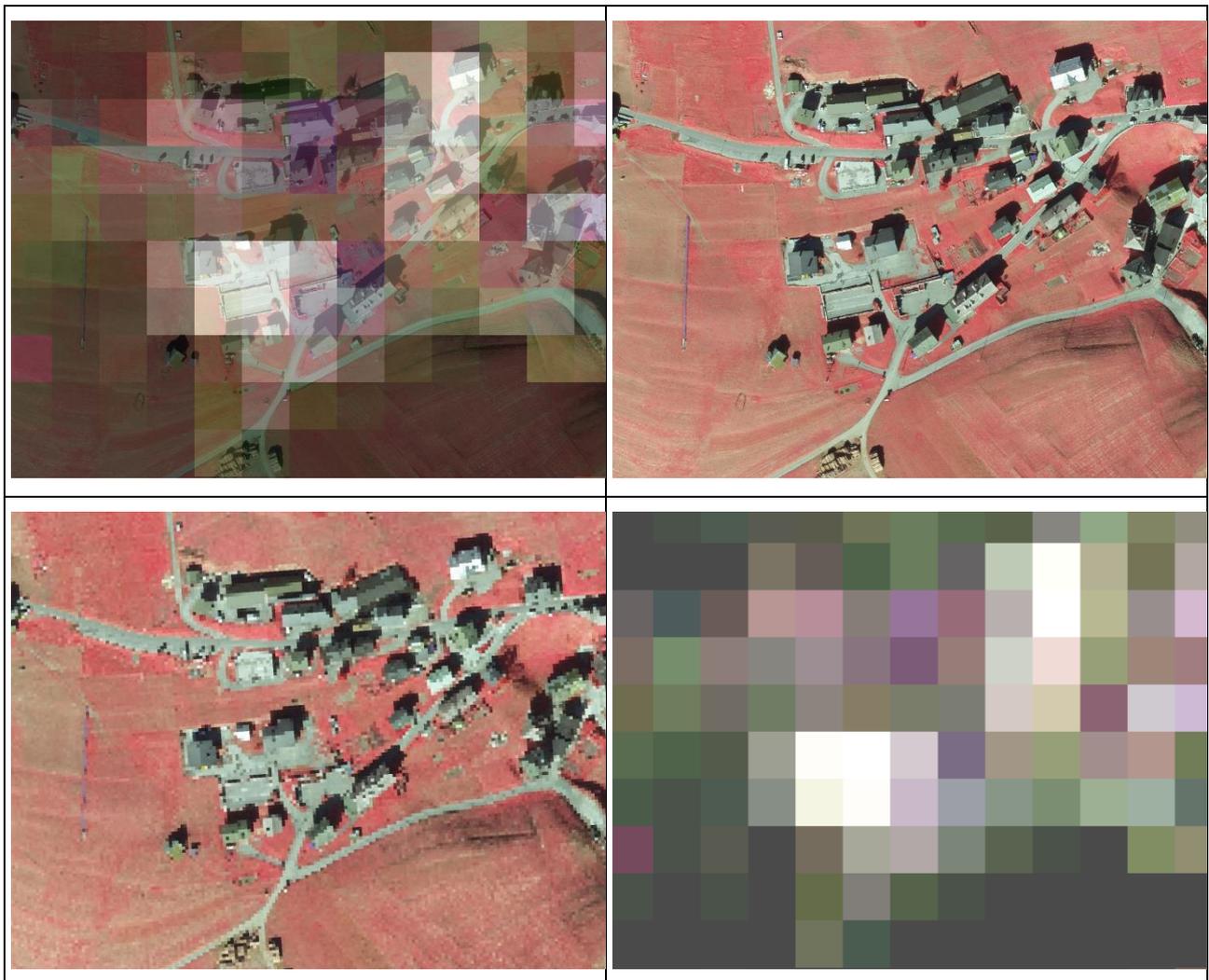


Figura 16: risoluzione spaziale a confronto; In senso orario da in alto a sinistra: immagine Landsat-7 30m sovrapposta a volo NIR 0.2 m, volo NIR 0.2 m, volo NIR ricampionato a 2 m, Landsat-7 solamente.

La dimensione di tutta l'area di territorio che viene rilevata in ogni istante (nel caso dei sensori a matrici viene spesso definita come "l'impronta" al suolo dell'immagine) viene determinata in funzione dell'angolo a cui il sensore è sensibile alle radiazioni, chiamato **IFOV**

(*Immediate Field Of View* – Angolo di Campo – vedi sezione "Il sistema ottico") vedi Figura 18. Nelle figure successive viene illustrato come calcolare la risoluzione spaziale media, conoscendo la quota di volo e l'angolo IFOV. E' anche possibile calcolare la risoluzione del singolo pixel conoscendo la dimensione dell'elemento del sensore (l'unità elementare del CCD) – vedi esercizio nella sezione "Il sistema ottico" – questo si fa spesso nel caso di rilievi da aeromobile, dove la scala dell'immagine è fortemente influenzata dalla quota relativa di volo.

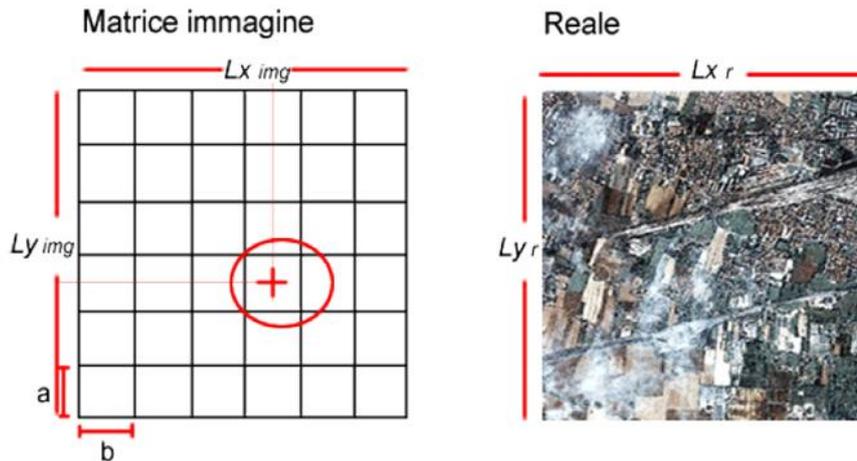


Figura 17: Risoluzione spaziale di un'immagine: $Lx_{img} \times Ly_{img}$ è la dimensione totale dell'immagine in celle o pixel, $Lx_r \times Ly_r$ è la dimensione reale, a e b sono i lati del pixel ovvero la risoluzione spaziale, riportata in dimensioni reali corrispondenti a metri

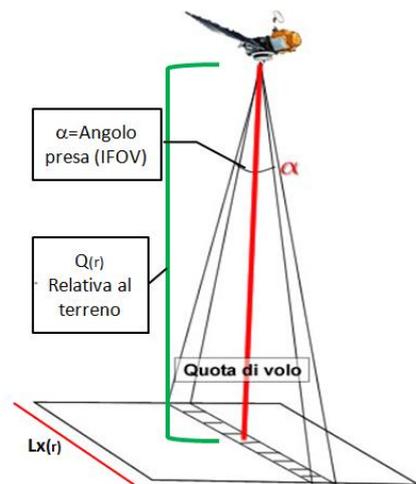


Figura 18: Rapporto tra quota di volo e risoluzione – $Lx_{(r)} = Q_{(r)} \times \tan(\alpha/2) \times 2$

2.1.2 LA RISOLUZIONE RADIOMETRICA

Prima di esporre il concetto di risoluzione radiometrica (a volte chiamata "profondità cromatica"), è bene richiamare come i calcolatori elettronici memorizzano i dati. I calcolatori

elettronici memorizzano i dati in *bit*, ossia in un formato binario che può assumere due possibili valori, 0 e 1. Per memorizzare valori numerici, devono utilizzare combinazioni di coppie binarie che gli permettano di associare la combinazione al valore numerico. Conseguentemente, per memorizzare due valori numerici basta un *bit*, per memorizzarne 3 o 4 sono necessari 2 *bit* (2^2), per accedere a otto numeri sono necessari 3 *bit* (2^3). Per visualizzare 256 valori sono necessari 8 *bit* ($2^8 = 256$). L'occhio umano medio non può discernere facilmente più di 256 sfumature intermedie tra gli estremi di una scala di colore. Per ottenere tutti i colori di uno spazio colore (vedi Figura 23) si devono utilizzare una combinazione di tre scale di colore (comunemente quello dei colori fondamentali, rosso, verde e blu - RGB), e quindi si avranno in totale $3 \times 8\text{bit} = 24$ bit; gli schermi, fondamentalmente, funzionano in quel modo.

Si rappresenta la **risoluzione radiometrica** con il numero di *bit* usati per registrare l'intensità della riflettanza della radiazione di una certa banda registrata dal sensore dentro un singolo pixel. Si va dall'utilizzo di un unico bit (immagini in bianco o nero ossia con valori o di bianco o di nero) fino anche a 64 bit. La figura seguente - Figura 19 – illustra cosa succede quando un sensore con risoluzione radiometrica diversa riprende la stessa area.



16 Valori (4 bit)



8 Valori (3 bit)



4 Valori (2 bit)



2 Valori (1 bit)

Immagine da <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Arbeck>

Figura 19: Esempio di bit diversi sulla stessa area

Esempio: un'immagine a 12 *bit* avrà una "profondità" di colore maggiore di una ad 11 *bit* ovvero il valore di intensità potrebbe assumere $2^{11} = 2048$ $2^{12} = 4096$ valori; come si può intuire questo aumenta lo spazio di memoria richiesto dall'immagine. L'occhio umano riesce a distinguere una gamma di 800 sfumature di colori e quindi difficilmente può apprezzare la

differenza tra un'immagine a 8 bit ed una a 12 bit; una risoluzione radiometrica maggiore risulta vantaggiosa per le elaborazioni eseguite tramite i software dedicati.

2.1.3 LA RISOLUZIONE SULLO SPETTRO

Ogni sensore rileva l'intensità di radiazioni EEM in una certa zona dello spettro; queste zone vengono chiamate **bande**. Ogni banda ha come caratteristica la lunghezza d'onda nello spettro EEM alla quale ha il grado maggiore di sensibilità e l'ampiezza alla quale è sensibile. Questa caratteristica si chiama **risoluzione spettrale**. In Figura 20 è visibile un esempio; in Figura 5 viene schematizzata la sensibilità di sette bande nello spettro.

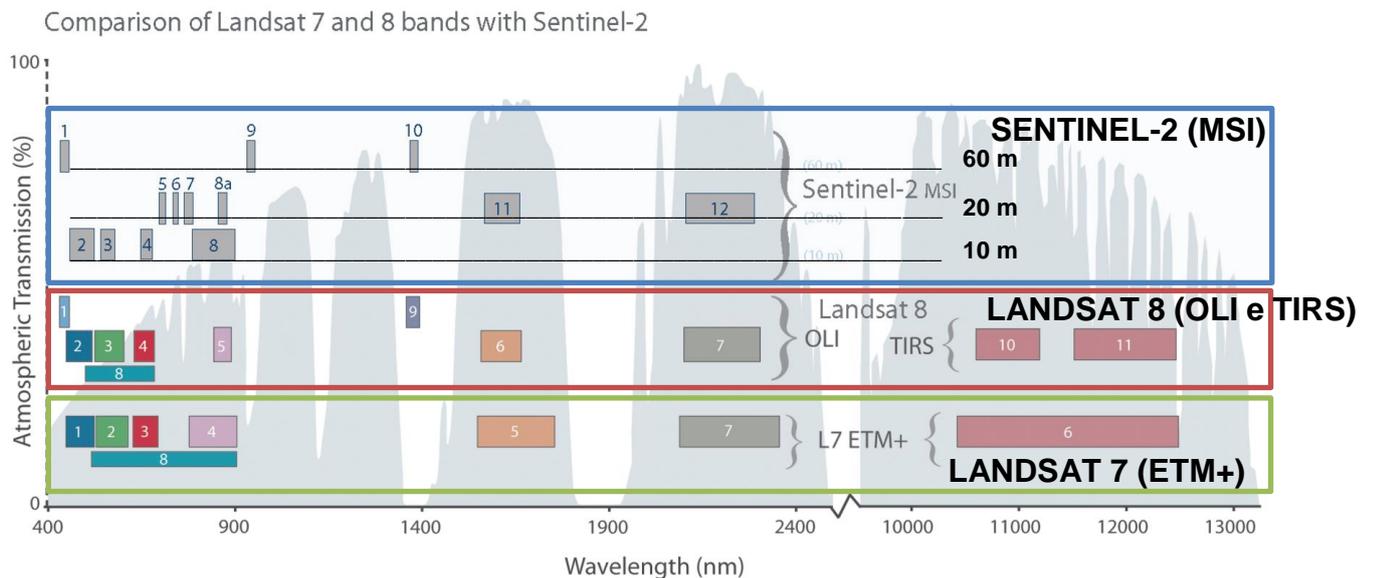


Figura 20: Zone (bande) dello spettro EEM dove risiede la sensibilità delle bande nei seguenti sensori: ETM+ della missione Landsat 7, OLI+TIRS della missione Landsat 8 e MSI della missione Sentinel-2 – nello sfondo in grigio il valore di trasmittanza delle diverse lunghezze d'onda attraversando l'atmosfera (fonte: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

E' importante sapere a quali fenomeni sono sensibili le diverse lunghezze d'onda, sia dal punto di vista della progettazione del sensore sia nell'utilizzo da parte dell'utente, che, nel caso di sensore con decine (se non centinaia) di bande a disposizione, dovrà scegliere quali utilizzare per le sue elaborazioni. Avere risoluzione spettrale molto definita (finestre piccole nello spettro) porta necessariamente ad una minore risoluzione spaziale in quanto per raggiungere la quantità minima di energia necessaria per andare oltre la soglia di sensibilità del CCD nel sensore si deve diminuire la risoluzione spaziale per coprire un'area maggiore per pixel. La quantità di energia infatti è minore in quanto la finestra della lunghezza d'onda

è più piccola. Per ogni fascia di spettro al quale è sensibile il sensore, esso riporta i valori di riflettanza relativi in una matrice a 2 dimensioni. *Più bande richiedono più matrici, e quindi in totale ci sarà un dato rappresentabile in 3 dimensioni $m \times n \times b$ dove m e n sono il numero di pixel per lato e b è il numero di bande.* A volte si usa il termine di **data cube** proprio per questa caratteristica del dato.

2.1.4 LA RISOLUZIONE TEMPORALE (TEMPO DI RITORNO)

La risoluzione temporale è il tempo che ci mette un satellite a ripassare su uno stesso punto. In altre parole ogni quanto ci sarà un'immagine di quella zona . E' una caratteristica che dipende dal tipo di orbita della piattaforma satellitare. E', ovviamente, una peculiarità dei sensori montati su satellite e non è propriamente una caratteristica di un'immagine. E' però un'informazione utile per poter considerare lavori multi-temporali ad esempio per monitorare modifiche sul territorio (inquinamento, urbanizzazione o deforestazione).

2.2 Elementi dell'immagine digitale

L'unità elementare di un'immagine è il pixel (o cella) ossia una parte dell'immagine alla quale viene associato un valore numerico unico al quale si associa poi un colore per rappresentarlo a schermo. Questo valore numerico per convenzione viene chiamato *Grey Value, Digital Number (DN) o Digital Value* e ricordiamoci che rappresenta numericamente la quantità di EEM di una certa banda di lunghezza d'onda che è arrivata all'elemento del sensore (CCD) e che è stata da esso convertita radianza e DN in modo direttamente proporzionale alla quantità di EEM.

Nella Figura 21 è visibile un esempio schematizzato di un'immagine di dimensione 6x6 pixel; ogni pixel associato ad un valore numerico (DN). Il valore minimo e massimo del valore è rispettivamente 0 e 255 rispettivamente interpretati con luminosità dello schermo nulla (nero) e massima (bianco); questo genere di immagine si dice a 8 *bit* (vedi sezione "La risoluzione radiometrica") perchè un *bit* è un valore binario e quindi $2^8 = 256$ sono il numero di valori possibili. Si può quindi intendere un'immagine come una matrice bidimensionale ($m \times n$) con m righe e n colonne di pixel. La figura a destra rappresenta l'immagine con i valori trasformati in colori che viene visualizzata sullo schermo. Questo è quanto significa applicare una **scala di grigio** ad una banda – vedi anche [Figura 22](#).

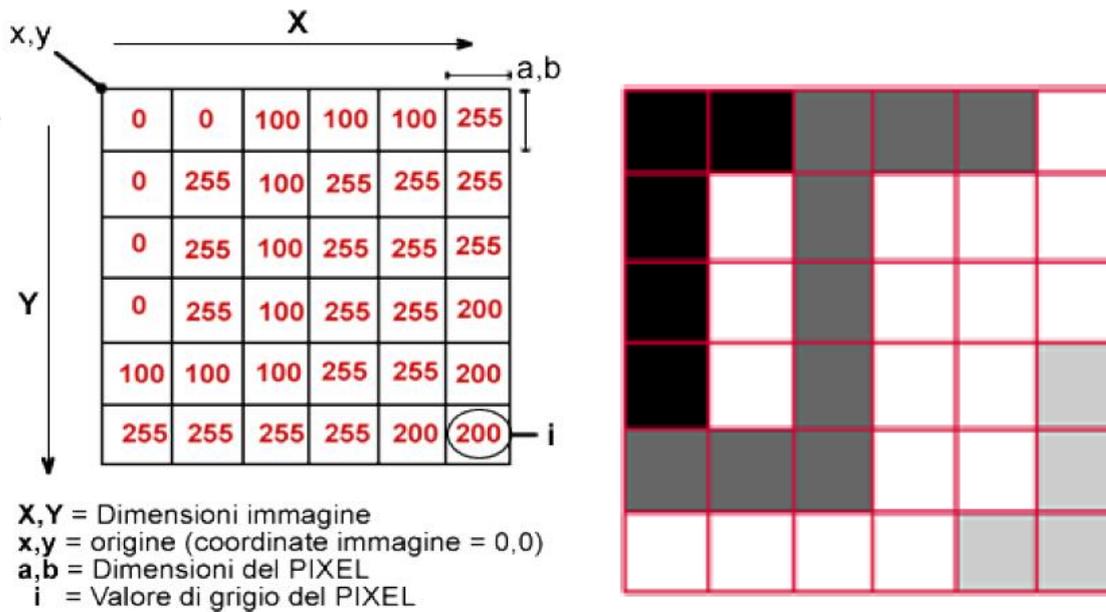


Figura 21: A sinistra - immagine di 9 pixel X 9 pixels con valori di grigio nelle celle (numero in rosso); a destra - corrispondente immagine interpretata a sfumatura di grigio

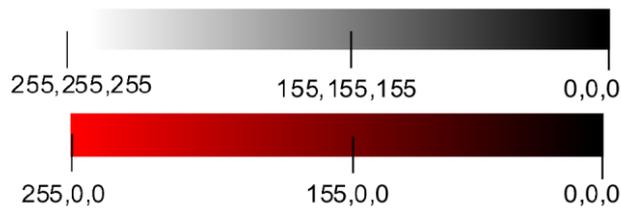


Figura 22: In alto scala dal bianco al nero (scala di grigio), in basso scala dal rosso al nero. Sotto i valori in un'immagine dove alla prima banda è stato assegnato il canale dal rosso al nero.

2.2.1 IMMAGINI A SCALA DI GRIGIO

L'immagine riportata in Figura 21 viene detta a *scala di grigio*, in quanto un singolo valore numerico viene associato ad una scala di grigio come in Figura 22 in alto. Si può anche assegnare a questa immagine una scala che va dal rosso al nero come la scala in Figura 22 (sotto). Le scale associabili ai valori possono avere combinazioni infinite, e si rifanno a vettori che possono essere rappresentati come funzioni (e.g. linee) nel sistema di riferimento ad assi cartesiane tridimensionale del colore (vedi [Figura 23](#) sotto).

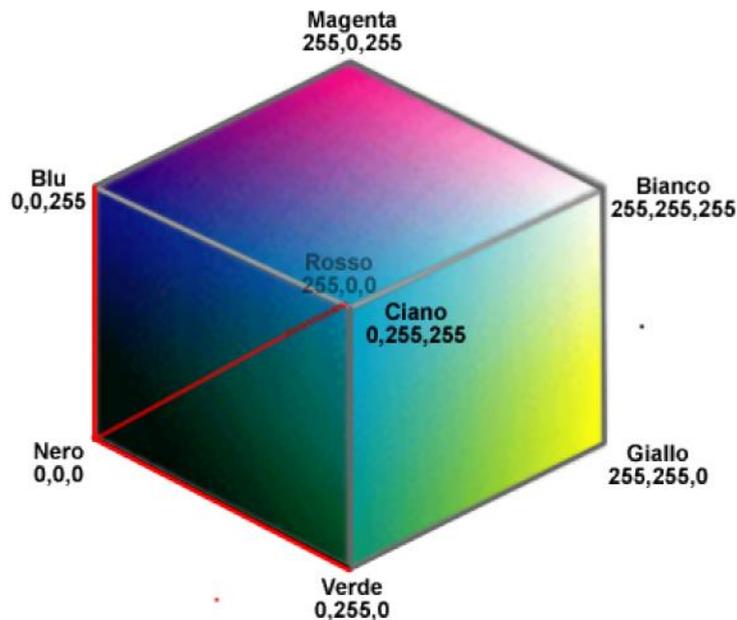


Figura 23: Rappresentazione spazio colori

Nel caso della scala di grigio la linea retta è quella che collega l'angolo bianco (255,255,255) a quello nero (0,0,0) e che taglia in diagonale il cubo in **Figura 23**. Nella scala di rosso invece sarebbe la linea retta che collega l'angolo nero (0,0,0) a quello rosso completo (valore 255,0,0).

2.2.2 LA RAPPRESENTAZIONE A COLORI

Colori Reali - quando alle bande vengono associate delle scale di colori che hanno lo stesso spazio nello spettro elettromagnetico di quello registrato nelle bande corrispondenti.

Falsi-colori - l'associazione "banda"- "scala di colore" non ha corrispondenza nello spettro del colore. Vengono assegnate le bande con criteri tali da mettere in risalto determinate caratteristiche della zona. La più comune associazione è quella che assegna le scale blu verde rosso rispettivamente al verde rosso ed infrarosso vicino (NIR) come nella figura A sotto. Essendo l'infrarosso vicino sensibile allo stato della vegetazione questa combinazione mette in risalto le zone coperte da coltivazioni o foreste vedi Figura 24 in seguito.

Pseudo-colori – in questo caso ci si riferisce ad una singola banda alla quale per ogni DN viene associato un colore in modo arbitrario mediante una tabella di corrispondenza (LUT - Look Up Tables) vedi Figura 24 in seguito.

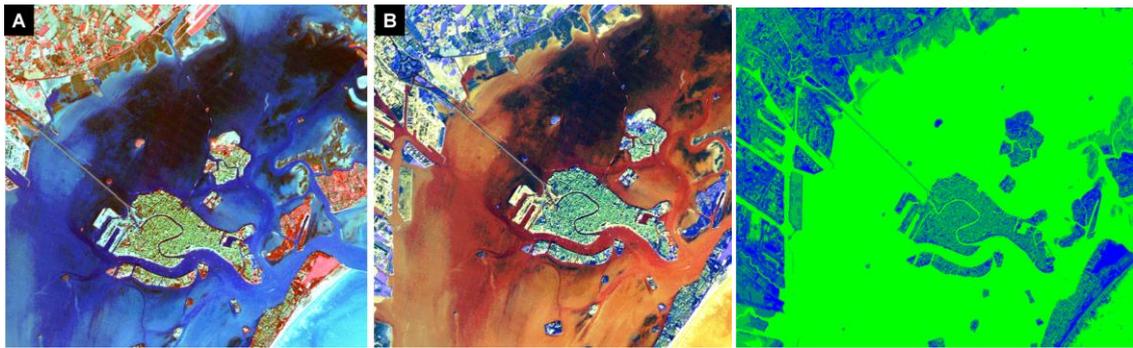


Figura 24: Le prime due immagini a sinistra sono interpretazioni a falsi-colori rispettivamente; a destra rappresentazione a pseudo-colori della stessa zona.

Trovate l'esercizio completo relativo alle correzioni radiometriche ed alle scale di colore nella scheda dell'[Esercizio n. 3 – Scale di Colore](#).

3 Il sistema ottica/sensore

Quando si parla di un sensore, ci si riferisce a due parti: il sensore propriamente detto, ed il sistema ottico che è responsabile di "canalizzare" la EEM verso il sensore. Si distinguono due tipi di fonti della EEM: fonti di EEM esterne al sistema sensore (e.g. il sole, l'emissione stessa della superficie terrestre) e fonti di EEM emesse dal sensore; l'esempio più semplice, come già accennato, sono le camere digitali senza flash (telerilevamento passivo) che attivando il flash – fonte emessa dal sistema sensore - diventa telerilevamento attivo.

3.1 Il sistema ottico

Il *sistema ottico* è l'insieme di elementi (lenti e specchi) che raccolgono la EEM per portarla al CCD, una matrice di componenti elettronici foto-sensibili, situato presso il **piano focale** (vedi figura seguente). Gli elementi in questione sono fondamentalmente una serie di prismi, lenti e specchi per direzionare la EEM verso il CCD. Il rapporto tra distanze tra le lenti, il centro ottico ed il CCD caratterizzano il sistema ottico. La **lunghezza focale** (f) è la distanza tra il fuoco (F) e il piano focale. Il **IFOV** (Immediate Field of View) è l'**angolo di campo** ed è inversamente proporzionale a f .

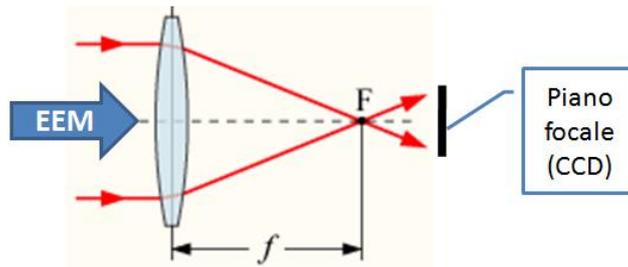


Figura 25: Schema semplificato degli elementi ottici

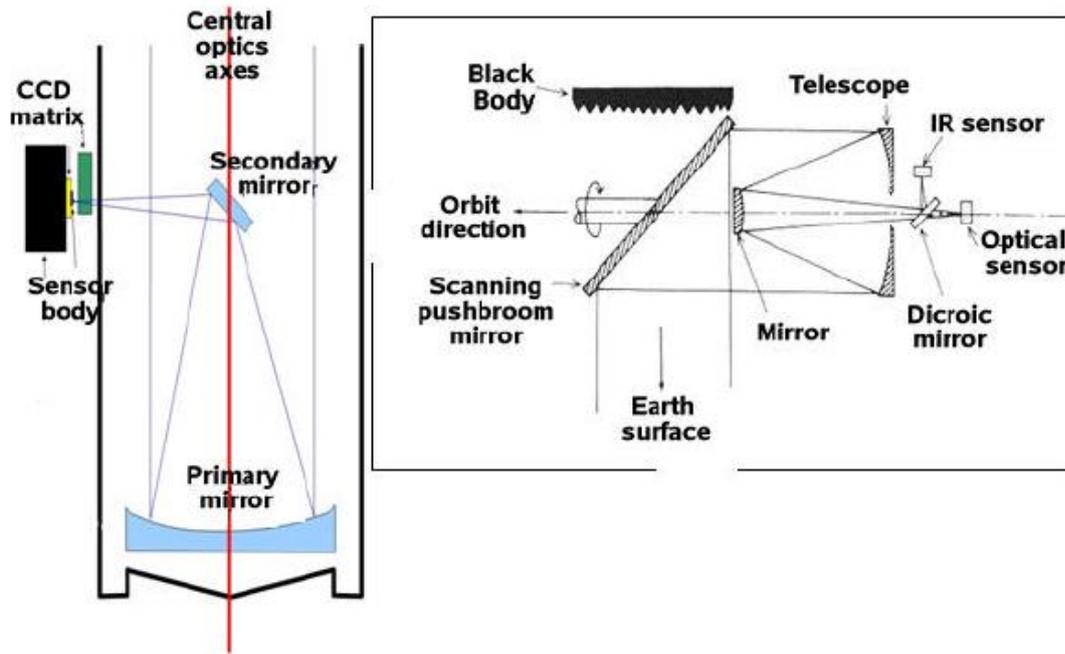


Figura 26: Schema di un generico sistema ottico (sinistra) ed a pushbroom (destra)

E' importante conoscere alcune caratteristiche del sistema ottico per poter calcolare alcune caratteristiche collegate come ad esempio conoscendo la dimensione degli elementi del CCD (vedi sezione seguente "Il sensore"), la lunghezza focale e la distanza tra il sensore ed il terreno è possibile calcolare la risoluzione media a terra del pixel, come anche conoscendo l'angolo IFOV, mediante le seguenti formule:

$$L_{(r)} = Q_{(rel)} \times \tan(\alpha / 2) \times 2$$

$$\begin{aligned} \frac{f}{Q_{(rel)}} &= \frac{L_{(eCCD)}}{L_{(r)}} \\ &= L_{(r)} = \frac{L_{(eCCD)}}{f} \times Q_{(rel)} \end{aligned}$$

dove $L_{(eCCD)}$ = Lunghezza lato di un elemento del CCD e f = lunghezza focale, $Q_{(rel)}$ = quota relativa di volo, $L_{(r)}$ = risoluzione in metri di un lato del pixel, α = angolo IFOV.

Esercizio: determinare la risoluzione a terra di un pixel per un ipotetico sensore, avente dimensione di un singolo elemento CCD di $9 \mu\text{m}$ (che nell'immagine corrisponderà al pixel), una quota di volo relativa di 1000 m, lunghezza focale di 90 mm ed un IFOV di 45°

Risposta: in questo caso l'informazione sull'IFOV non serve, calcolo utilizzando la proporzione tra lunghezza focale e quota relativa di volo, ovvero:

$$0.000009 \text{ m} \times 1000 \text{ m} / 0.09 \text{ m}$$

o meglio:

$$9 \cdot 10^{-6} \times 1 \cdot 10^3 / 9 \cdot 10^{-2} = 1 \cdot 10^{-1}$$

$$= 10 \text{ cm} .$$

3.2 Il sensore

Il sensore stesso è solitamente⁴ composto da una serie di CCD ovvero *Charged Coupled Device* che sono le parti elementari del sensore. I CCD possono essere allineati singolarmente come nel caso dei sensori *pushbroom* o essere a griglia con un certo numero di righe e colonne come nei sensori a matrice (vedi Figura 27). Il CCD trasforma la riflettanza TOA in radianza TOA che viene registrata in supporti digitali (e.g. *hard disk*) e vengono poi trasformati in immagini. Ogni sensore avrà tante serie di CCD quante sono le finestre nello spettro (bande) al quale è sensibile. Una completa analisi delle caratteristiche di un sensore richiederebbe un approfondimento nella disciplina della fisica dei segnali. E' bene ricordare, per completezza, che per caratterizzare in modo più completo un sensore dovrebbero essere conosciute le seguenti grandezze: numero di bande, lunghezza d'onda centrale della finestra di banda, sensibilità di banda, responsività di banda (come cambia la risposta del sensore spostandosi dalla lunghezza d'onda centrale), rapporto segnale rumore S/N, range dinamico, linearità della risposta (se la correlazione tra quantità di energia e risposta è

⁴ "Solitamente" in quanto la tecnologia sta proponendo diverse soluzioni, oltre i CCD, per raccogliere e registrare la EEM – vedi sensori CMOS e sensori Foveon

lineare), trasferibilità oggetto/sensore (come la matrice di valori dell'immagine riporta la zona ripresa a terra, distorsione dell'immagine dovuta alla non perfetta planarità del CCD, distorsione dell'ottica, frequenza di scansione.

Per semplicità l'utente che deve utilizzare i prodotti di un certo sensore ha la necessità di conoscere le seguenti caratteristiche:

- le due risoluzioni intrinseche ossia la *risoluzione spettrale* e la *risoluzione radiometrica*
- la *risoluzione spaziale*
- se è *attivo o passivo* ossia se si limita a raccogliere la EEM proveniente dall'oggetto rilevato oppure se emette EEM verso l'oggetto per poi analizzare quella in ritorno da esso.
- Il *tipo di scansione*
 - *Swipe* (a pendolo) – quando il sensore segue un movimento simile a quello del pendolo in direzione perpendicolare a quella della direzione di volo/orbita del veicolo
 - *Pushbroom* (vedi Figura 27) una linea di sensori che viene a scansionare la superficie
 - *A matrice* - (vedi Figura 27) come le fotocamere sono sensori a matrice che riprendono un'area di $m \times n$ pixel ad ogni ripresa.

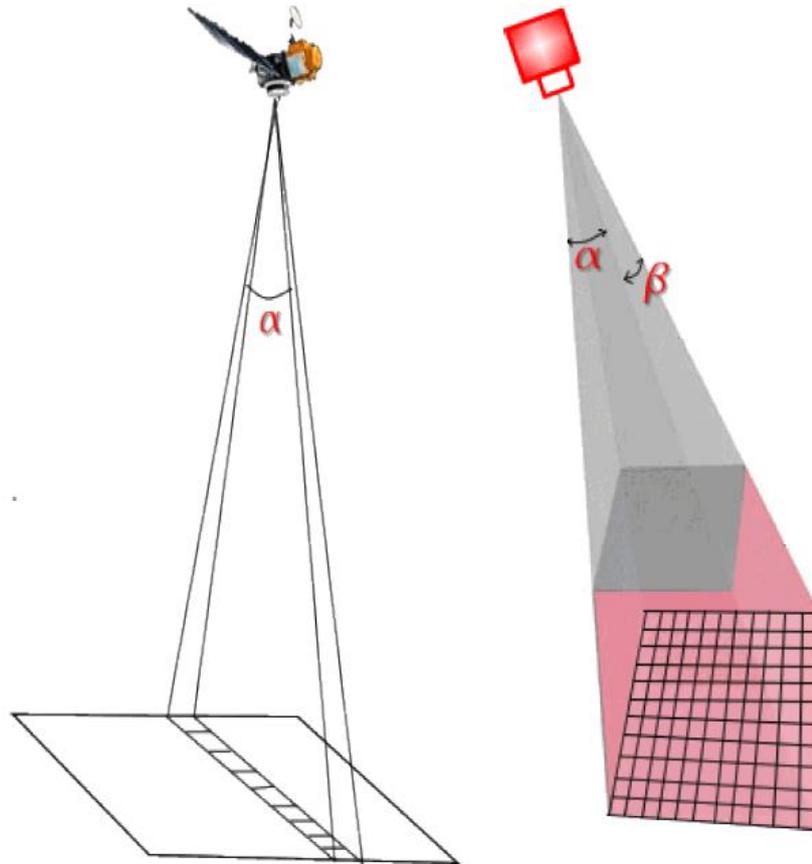


Figura 27: Geometrie comuni dei sensori, a sinistra a "pushbroom" a destra a "matrice"

Per degli esempi di caratteristiche dei sensori più comuni vedere capitolo 4 "Dataset da Satelliti".

3.3 Risposta degli elementi del sensore

Come riportato alla sezione precedente, i CCD sono formati da singoli elementi tra loro indipendenti. Questi elementi trasformano la EEM in valori digitali numerici (digital numbers – DN). Questa caratteristica non è assoluta e costante per ogni elemento nel CCD, ovvero se arriva una quantità di Energia "X" un CCD può dare un DN = 10 e quello vicino un DN = 11. Inoltre un'energia a doppia intensità, "2X", non necessariamente fa rispondere il CCD con un DN=20. E' anche possibile che questa risposta non sia costante nel tempo, e che il degrado del materiale che compone gli elementi CCD modifichi questi rapporti. Di conseguenza l'immagine viene corretta radiometricamente tenendo in considerazione la calibrazione fatta prima della messa in commercio.

3.3.1 CALIBRAZIONI E CORREZIONI RADIOMETRICHE

Questa operazione viene fatta per stabilire una relazione matematica lineare (o complessa) tra il valore del pixel – DN – e l'EEM incidente al sensore- ovvero la TOA – riflettanza Top-of-Atmosphere (Figura 8). Infatti la risposta del sensore non è sempre perfetta e quindi viene confrontata con fonti e quantità note di Energia a varie intensità e il corrispondenze valore assegnato al pixel viene registrato per poter poi utilizzare i DN per stimare il grado di Energia che lo ha investito.

Per esempio, un sensore chiamato CASI, viene calibrato dalla ditta costruttrice in laboratorio. Per il sensore Landsat MSS, viene utilizzato viene utilizzato un pannello con sei diversi colori. Per il sensore Landsat TM, tre lampade con otto diverse luminosità ciascuna vengono utilizzate. In tutti i casi una risposta lineare viene interpolate dai dati ottenuti:

$$V_{oss} = a * V_{sorgente} + b$$

Dove V_{oss} = DN registrato ("osservato") ovvero il DN, e $V_{sorgente}$ = valore di EEM incidente al sensore (**TOA**). a e b nella formula precedente vengono calcolati mediante metodo dei minimi quadrati per applicare un modello che collega il valore $V_{sorgente}$ con V_{oss} .

Trovate l'esercizio completo relativo alle correzioni radiometriche nella scheda dell'[**Esercizio n. 2 – Correzioni Radiometriche**](#).

4 Dataset da Satelliti

Tabella 3: Sensori e risoluzioni di satelliti comunemente utilizzati e descrizione dei dataset

Missione - Satellite	Sensore	Dimensione scena – km (~Gb)	Tempo di ritorno (giorni)	Risoluzione spettrale spaziale spettrale <i>n. bande m bit</i>											
				VIS			NIR			SWIR			TIR		
				n.	m	bit	n.	m	bit	n.	m	bit	n.	m	bit
LANDSAT-8	OLI/TIRS	170x185(1)	16	4	30	12	1	30	12	3	30	12	2	100	12
LANDSAT-7	ETM+	170x185(0.5)	16	3	30	8	1	30	8	2	30	8	1	120	8
LANDSAT-4/5	TM	170x185(0.35)	16	3	30	8	1	30	8	2	30	8	1	120	8
SENTINEL-2	MSI	290	5 ¹	4	10	12	4	20	12	2	20	12	-	-	-
TERRA	ASTER	60	2	3 ²	15	8	1	15	8	6	30	12	5	90	12
TERRA	MODIS	2330	2	10	250-1000	12	8	250-1000	12	2	500	12	16	1000	12
WorldView-2	IRU		1-4	6	1.84-2.4 ³	11	2	1.84-2.4 ³	11				-	-	-
WorldView-3	IRU	13.1	5	4	1.24-1.38 ³	11	3	1.24-1.38 ³	11	8	3.7-4.13 ³	14	-	-	-

OLI: Operational Land Imager; **TIRS:** Thermal InfraRed Sensor; **TM:** Thematic Mapper; **MSI:** Multispectral Instrument; **VIS:** 0.4-0.7 μm **NIR:** 0.7-1.4 μm; **SWIR:** 1.4-3.0 μm; **TIR:** 3.0-15.0 μm

¹ La missione ESA Sentinel-2 consiste in 2 satelliti, di conseguenza il tempo di ritorno di un singolo satellite è di 10 giorni.

² Il sensore ASTER fornisce 2 bande nella stessa lunghezza d'onda ma una di esse proviene da un'ottica "backward looking", ovvero puntata inversamente alla direzione di volo. Queste bande consentono elaborazioni di fotogrammetria che richiedono una baseline per estrarre la geometria degli oggetti.

³ Risoluzione a nadir (i.e. pixel centrale all'immagine) e risoluzione a 20° di angolo di presa (vedi **Figura 18** per definizione di nadir)

