

# **CORSO DI FOTOGRAMMETRIA E TELERILEVAMENTO**

**Prof. Riccardo Roncella**

## **TELERILEVAMENTO**



# SOMMARIO

- **INTRODUZIONE**
- **RICHIAMO DEI CONCETTI DI BASE E GENERALI**
- **ACQUISIZIONE DEI DATI**
- **GEOREFERENZIAZIONE DEI DATI**
- **CLASSIFICAZIONE DEI DATI**



# INTRODUZIONE

## I DATI

- Immagini digitali multispettrali
- sensori che registrano la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie terrestre,
- diversi sensori per le diverse bande dello spettro

## ACQUISIZIONE

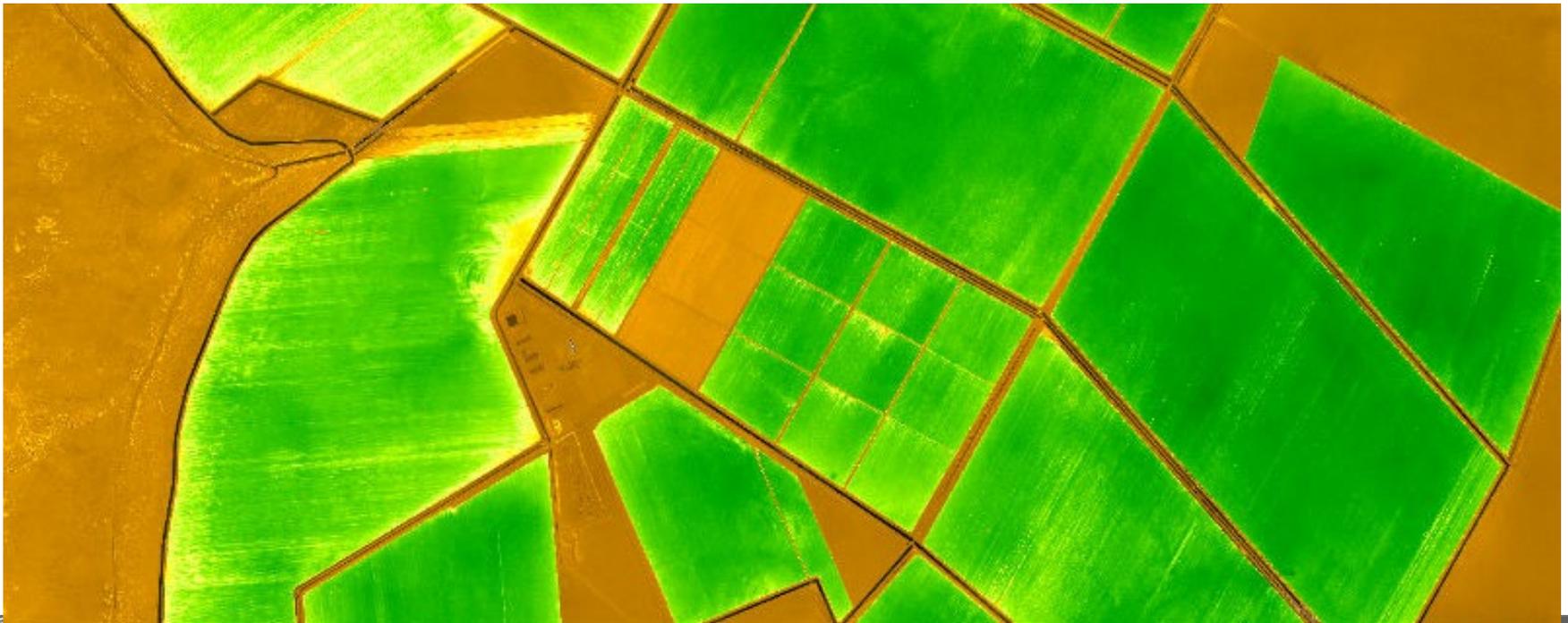
- Tipicamente da satellite, in alcuni casi prese aeree

## PRODOTTI

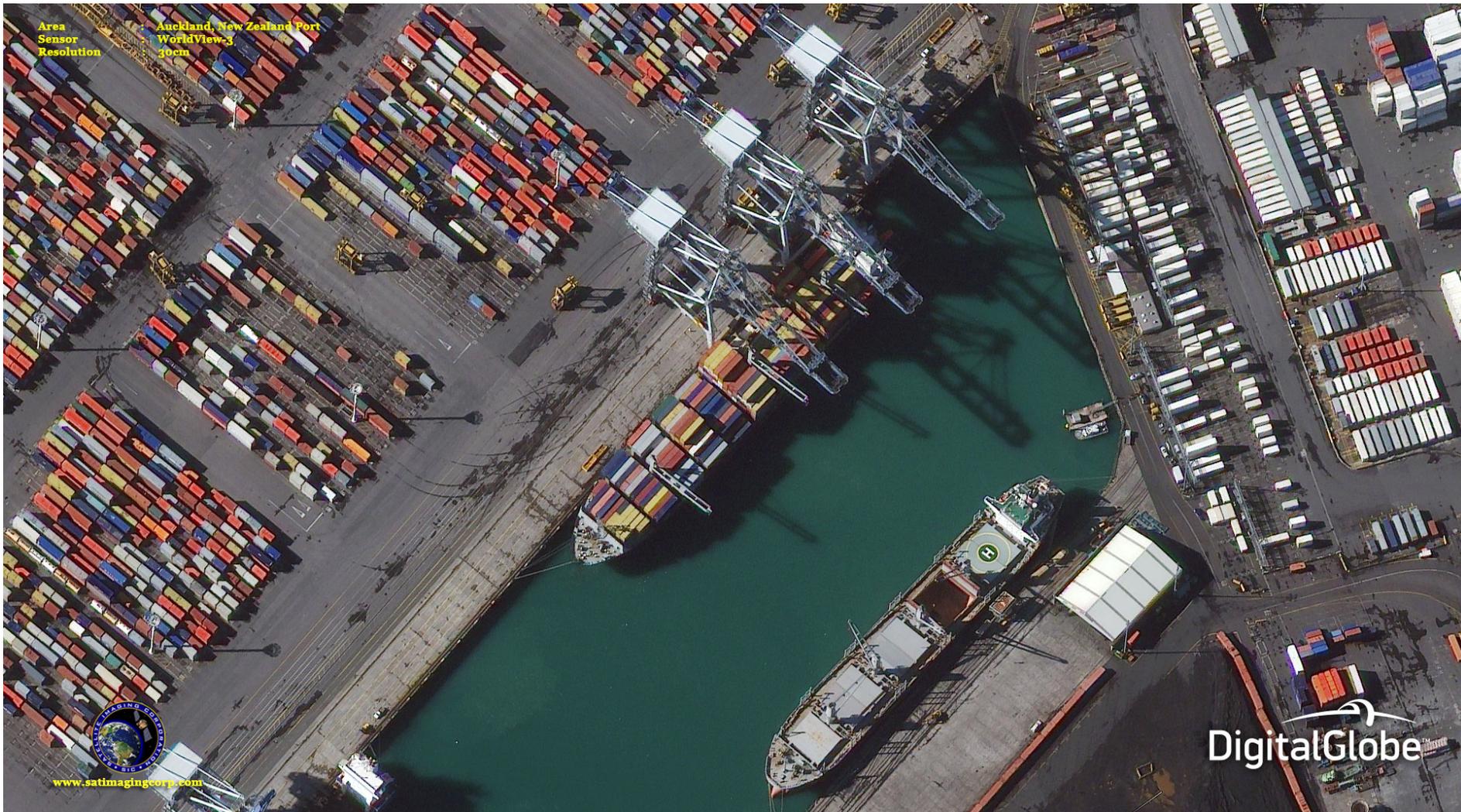
- COPERTURA DEL SUOLO
- DTM
- SPOSTAMENTI



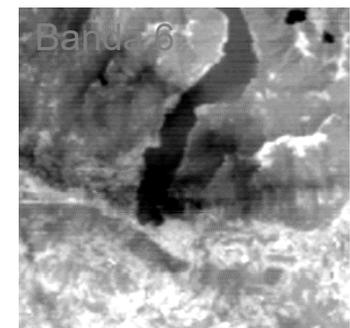
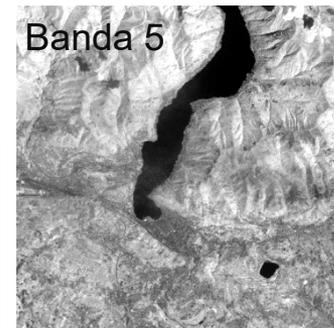
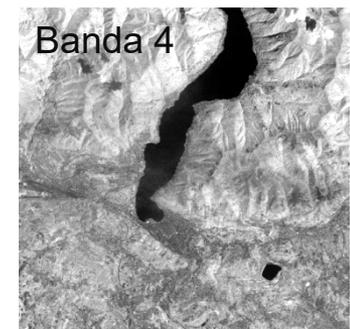
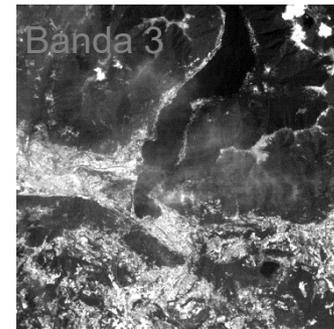
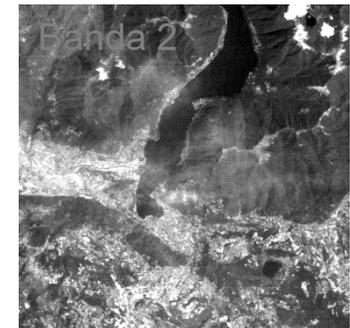
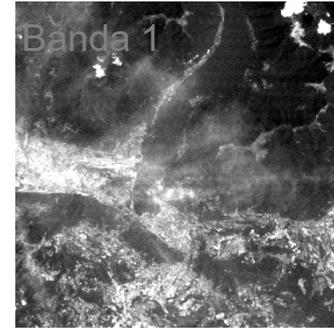
# TELERILEVAMENTO



# TELERILEVAMENTO



# IMMAGINE LANDSAT THEMATIC MAPPER

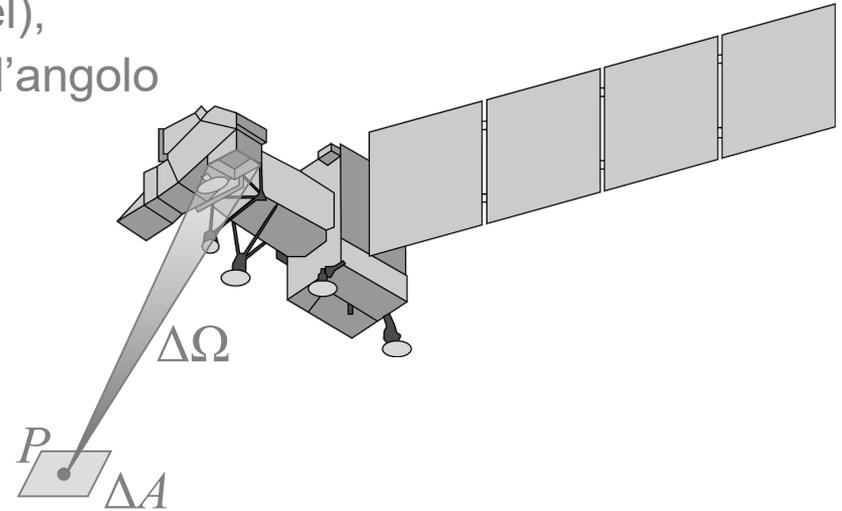


# CONCETTI FONDAMENTALI – REALTA' FISICA

I sensori raccolgono l'energia elettromagnetica  $\Delta Q$  emessa da un elemento di superficie  $\Delta A$  (pixel), durante un intervallo di tempo  $\Delta t$ , e relativa all'angolo solido  $\Delta\Omega$  fra pixel e sensore.

Per caratterizzare l'energia incidente è necessario rimuovere dall'osservazione la dipendenza da  $\Delta A$ ,  $\Delta t$  e  $\Delta\Omega$ .

Definizioni di base ( $Q$  = energia)



Flusso radiante  $\Phi(t)$ :  $\Delta\Phi \square \frac{\Delta Q}{\Delta t}$        $\Phi \square \frac{dQ}{dt}$       (potenza)

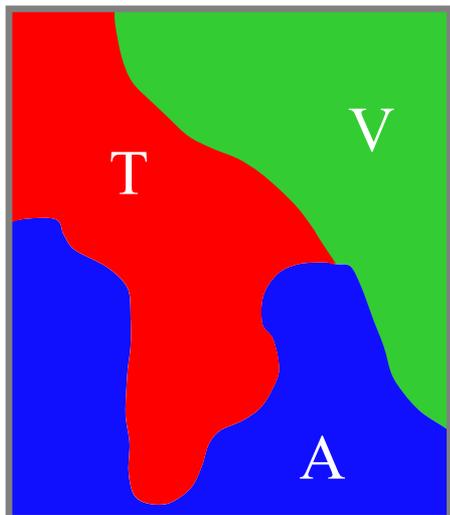
Emittanza radiante  $M(t,P)$ :  $\Delta M \square \frac{\Delta\Phi}{\Delta A}$        $M \square \frac{d\Phi}{dA}$       (emessa)

Irradianza  $E(t,P)$ :  $\Delta E \square \frac{\Delta\Phi}{\Delta A}$        $E \square \frac{d\Phi}{dA}$       (incidente)

Radianza  $L$ :  $L \square \frac{E}{\Delta\Omega}$

# CONCETTI FONDAMENTALI – REALTA' FISICA

## A. La realtà fisica

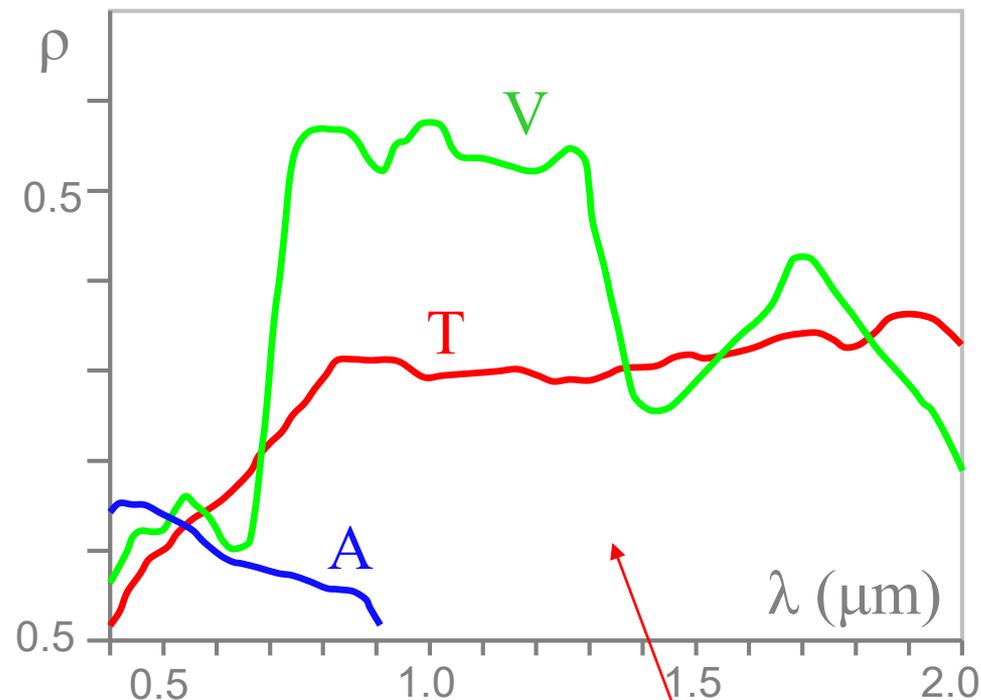


Tre tipi di copertura del suolo:

A = Acqua

T = Terra spoglia

V = Vegetazione



Ogni tipo di copertura riflette una certa frazione  $\rho$  della radiazione elettromagnetica differente per ogni lunghezza d'onda  $\lambda$

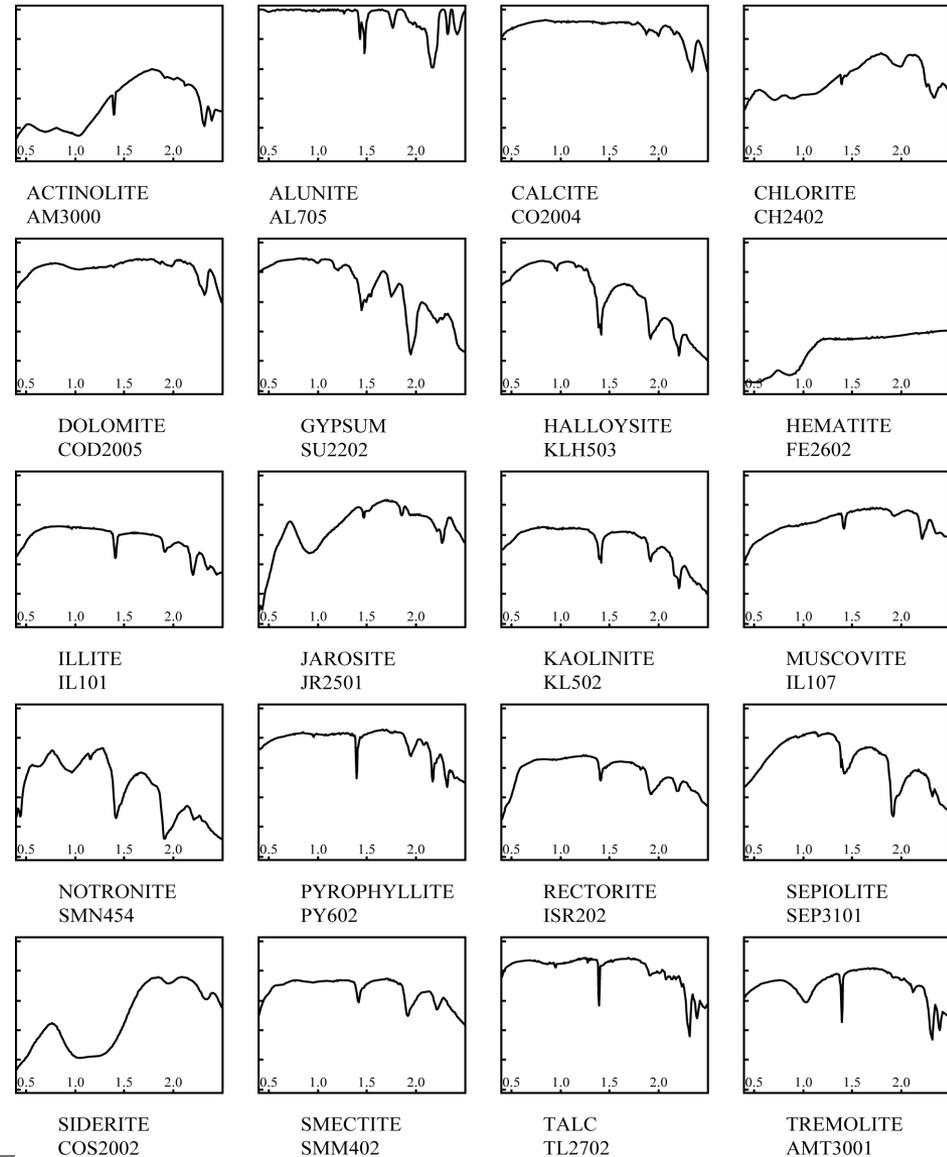
La funzione  $\rho(\lambda)$  è la **firma spettrale** del tipo di copertura

# IMMAGINE LANDSAT THEMATIC MAPPER

E' così definita la funzione  $\rho(\lambda)$  che descrive la riflettività di un determinato tipo di materiale in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

La firma spettrale di un corpo può essere determinata mediante analisi di laboratorio (spettrometri).

A fianco, esempi di firma spettrale per alcuni minerali.



# TELERILEVAMENTO – CASO IDEALE

- ❑ Un insieme di sensori registra la radianza riflessa da un pixel della superficie del pianeta, per tutte le lunghezze d'onda.
- ❑ In funzione dell'orientamento del sensore e la posizione del pixel tale informazione può essere ricondotta alla posizione geografica dell'elemento (GEOREFERENZIAZIONE)
- ❑ Si ottiene quindi, per quel pixel, una firma spettrale osservata.
- ❑ Si confronta la firma spettrale osservata con un archivio di firme spettrali note.
- ❑ Si attribuisce il pixel alla classe di superficie corrispondente alla firma spettrale osservata



# TELERILEVAMENTO – CASO REALE

La classe foresta:

- diversi tipi di alberi,
- diversi stadi di invecchiamento:  
eterogeneità spaziale;
- diversi stati di umidità,
- diversi stati di fogliazione:  
eterogeneità temporale.

La risoluzione (spaziale e radiometrica) dei sensori dovrebbe essere altissima!

L'archivio delle firme spettrali dovrebbe essere sterminato!

Inoltre nel suo percorso dalla sorgente (sole) al sensore la radiazione elettromagnetica subisce diversi effetti (assorbimento, diffusione, etc.) che rendono meno accurata la conversione fra quantità di energia misurata e riflettanza.



## Perché satelliti???

- ❑ Sensori in orbita regolare,
- ❑ immagini relativamente economiche (Ikonos: 16 E × Km<sup>2</sup>),
- ❑ ripetizioni relativamente frequenti (Landsat 7: 16 giorni):

possibilità di analisi ambientali e territoriali periodiche.

Però (tradizionalmente) sensori a bassa risoluzione:

Landsat 1 MSS: 80 × 80 m, SPOT 4 HRVIR: 20 × 20 m

Solo cartografia tematica, non cartografia metrica.

(ciò non è vero per i satelliti di ultima generazione)

# CARATTERISTICHE DELLE ORBITE

## DEFINIZIONI:

### Periodo:

tempo necessario per ripassare dallo stesso punto in un sistema di riferimento inerziale geocentrico.

### Ciclo di ripetizione:

tempo necessario per riprendere la stessa scena al suolo.

*(NB: la Terra ruota, perciò periodo e cdr non coincidono.)*

### Quota di volo:

distanza del satellite dalla superficie della Terra.

### Traccia al suolo:

proiezione ortogonale dell'orbita sulla superficie della Terra.



# CARATTERISTICHE DELLE ORBITE - REQUISITI

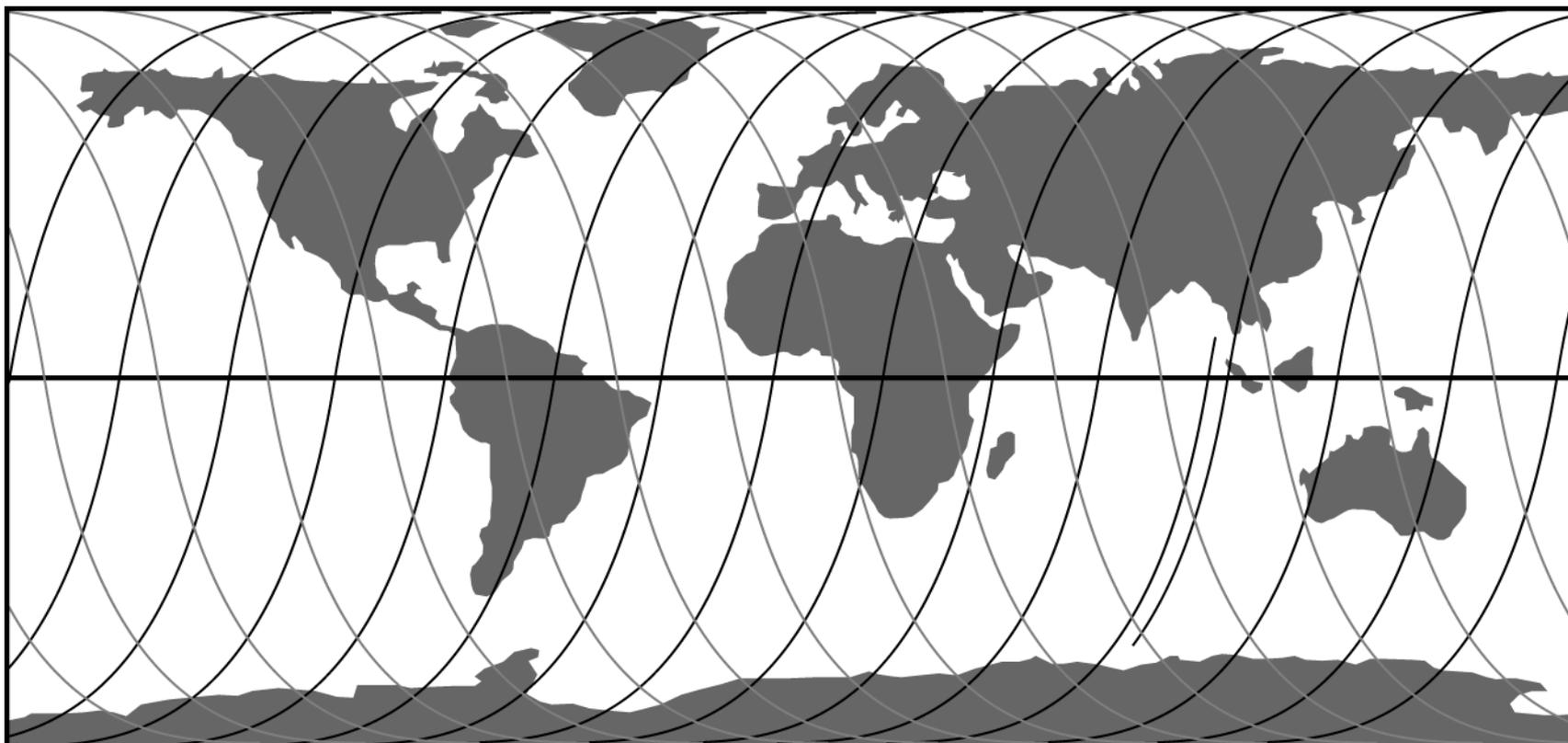
Orbite, requisiti:

1. osservare la Terra quando è illuminata dal (riflette il) Sole:  
orbita eliosincrona;
2. osservare la maggior parte possibile del pianeta il più spesso possibile:  
basso ciclo di ripetizione;
3. osservare la Terra da distanza costante:  
orbita circolare.

Tutti i parametri d'orbita sono univocamente determinati dalle leggi di Keplero, una volta scelto il ciclo di ripetizione/la quota di volo.



## Le tracce al suolo: l'esempio di SPOT4



# RISOLUZIONE DEI DATI

**Risoluzione spaziale:** GSD (Ground Sampling Density) = dimens. pixel [m]  
o anche n° di pixel per unità di superficie al suolo

**Risoluzione spettrale:** a) ampiezza dello spettro coperto dal sensore e b) ampiezza della singola banda spettrale;  
a) aumenta (in genere) con il numero di bande  
b) aumenta quando  $\Delta\lambda$  fra bande diminuisce

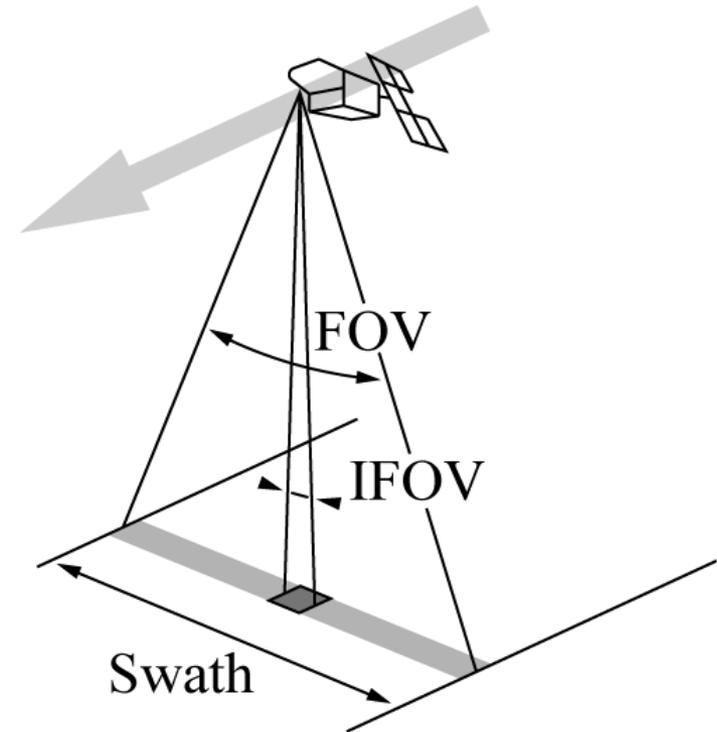
**Risoluzione temporale:** n° di passaggi (rivisitazione) nell'unità di tempo

**Risoluzione radiometrica:** n° di valori per la scala dei grigi =  $2^p$   
 $p$  = numero di bit per pixel (della singola banda)



# SENSORI

- ❑ Spatial resolution (risoluzione spaziale): dimensione del (distanza fra i centri dei) pixel al suolo.
- ❑ IFOV (Campo istantaneo di Vista): corrispondente angolo nel sensore.
- ❑ Swath (falciata!): ampiezza dell'immagine, nella direzione ortogonale alla traccia del satellite al suolo.
- ❑ FOV (Campo di Vista): corrispondente angolo nel sensore.



# CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI

## Spettrale

Pancromatiche	Scala di grigi sullo spettro visibile
Multispettrali	In genere B/G/R + una o più bande in infrarosso
Iperspettrali	$\cong$ 100 bande
Pan-sharpened	Fusione di pancromatico e multispettrale

## Spaziale

Risoluzione (m)	Definizione	Scala di applicazione
0.5 – 1	Altissima	1:1000 - 1:10000
1 – 4	alta	1:10000 - 1:15000
4 – 12	media	1:15000 - 1:25000
12 – 50	bassa	1:25000 - 1:100000
50 – 250	molto bassa	1:100000 - 1:500000
> 250	Bassissima	< 1:500000



# LANDSAT 7

## ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) Landsat 7

### *Risoluzione spettrale:*

Banda	lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ )	
Pan	0.52 – 0.90	pancromatica
1	0.45 – 0.515	blu
2	0.525 – 0.605	verde
3	0.63 – 0.690	rosso
4	0.75 – 0.90	infrarosso vicino
5	1.55 – 1.75	infrarosso medio
7	2.09 – 2.35	infrarosso medio
6	10.40 – 12.50	infrarosso termico

*Risoluzione spaziale:* 30×30 m, Banda 6: 60×60 m, Pan: 15×15 m

*Swath:* 185 km

*Risoluzione radiometrica:* 256 valori (8 bit)

*Risoluzione temporale:* 16 giorni



# IKONOS

Banda	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	
Pan	0.45-0.90	Pancromatico
MS1	0.45-0.53	Blu
MS2	0.52-0.61	Verde
MS3	0.64-0.72	Rosso
MS4	0.77-0.88	Infrarosso vicino

Risoluzione spaziale (al nadir): pancromatico:  $1 \times 1$  m; multispettrale:  $3.2 \times 3.2$  m  
Swath: 11 Km

Risoluzione radiometrica: 11 bit (2048 valori)

Risoluzione temporale: 11 giorni al nadir

Possibilità di orientamento fuori nadir sino a  $26^\circ$



# I SATELLITI DI ULTIMA GENERAZIONE

## EROS

- n° bande: 1 PAN
- risoluzione:  $1.8 \times 1.8$  m, 11 bit
- ciclo di ripetizione:

## QuickBird

- n° bande: PAN + Multispettrale (4 bande)
- risoluzione: P:  $0.61 \times 0.61$  m, MS:  $2.44 \times 2.44$  m, 11 bit
- ciclo di ripetizione:  $\cong 5$  giorni al nadir

Prese fuori nadir ( $45^\circ$  e  $25^\circ$  rispettivamente)



# I SATELLITI DI ULTIMA GENERAZIONE

## Pleiades

- ❑ n° bande: 1 PAN + 4 multispettrali
- ❑ risoluzione: 0.5 × 0.5 m PAN, 2 x 2 m multispettrale
- ❑ ciclo di ripetizione: giornaliero

## Worldview-3

- ❑ n° bande: PAN + Multispettrale (8 bande Vis + NIR) + 8 SWIR + 12 CAVIS
- ❑ risoluzione: P: 0.31 × 0.31 m, MS: 1.24 × 1.24 m, SWIR: 3.7 x 3.7 m, CAVIS: 30 x 30 m
- ❑ ciclo di ripetizione: < 1 giorno



# CONCETTI FONDAMENTALI – GEOREFERENZIAZIONE

## GEOREFERENZIAZIONE E/O CO-REGISTRAZIONE DI IMMAGINI

Georeferenziare un'immagine significa mettere in corrispondenza le coordinate pixel  $(i,j)$  con le coordinate cartografiche  $(E,N)$

Per farlo occorre un modello del sensore e della formazione dell'immagine, oltre agli altri elementi necessari per generare un'ortofoto. (MODELLO FISICO)

I sensori spesso non sono stati pensati per uso metrico e le fonti di incertezza sono molto numerose. Pertanto si preferisce nella maggior parte dei casi un approccio empirico, che stima semplicemente una trasformazione  $(i,j) \rightarrow (E,N)$ . (MODELLO GENERALIZZATO)

Si devono individuare sull'immagine e sulla carta punti corrispondenti, e stimare una trasformazione tra i due sistemi (pixel-cartografia).



# CONCETTI FONDAMENTALI – GEOREFERENZIAZIONE

Coordinate  
Terra:  $(\lambda, \varphi)$   
Immagine:  $(i, j)$   
Carta:  $(x, y)$

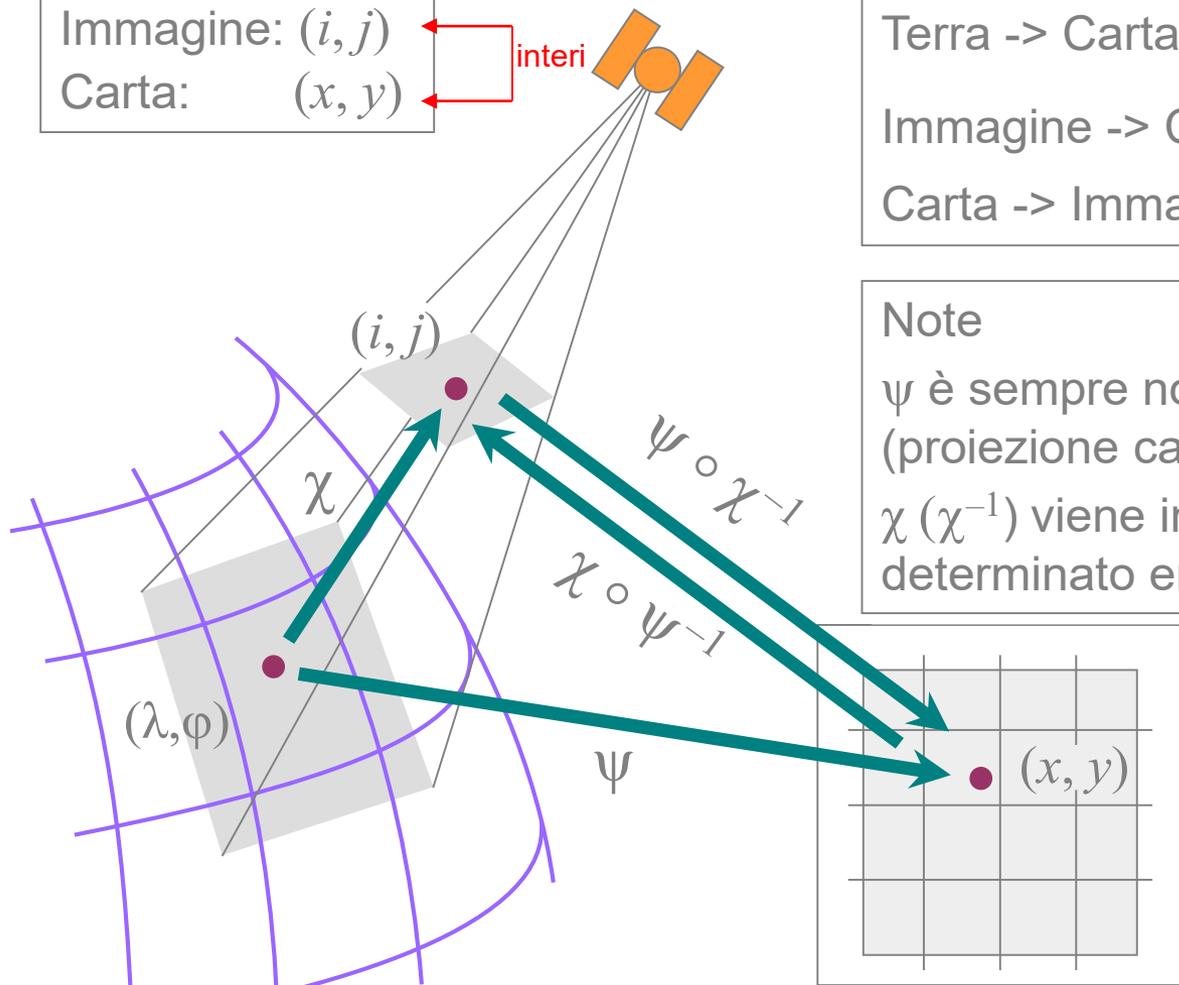
reali

interi



Trasformazioni (con deformazioni):  
Terra -> Immagine:  $\chi$  (imaging model)  
Terra -> Carta:  $\psi$  (proiezione cartografica)  
Immagine -> Carta:  $\psi \circ \chi^{-1}$   
Carta -> Immagine:  $\chi \circ \psi^{-1}$

Note  
 $\psi$  è sempre nota  
(proiezione cartografica assegnata)  
 $\chi$  ( $\chi^{-1}$ ) viene in tal caso  
determinato empiricamente



# CONCETTI FONDAMENTALI – GEOREFERENZIAZIONE

(a) Adozione di un modello parametrico per la trasformazione

$$i \square f_i(X, Y, p_1, p_2, \dots, p_m)$$

$$j \square f_j(X, Y, p_1, p_2, \dots, p_m)$$

(b) Identificazione dei pixel immagine con coordinate carta note (punti di controllo)

$$(i_k, j_k) \square (X_k, Y_k), \quad k \square 1, 2, \dots, n$$

(c) Determinazione a minimi quadrati dei parametri del modello:

linearizzo il modello rispetto ai parametri  $p_i$

(d) Applicazione della trasformazione ai pixel che cadono nell'area dell'immagine

$$i \square f_i(X, Y, \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_m)$$

$$j \square f_j(X, Y, \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_m)$$



Rototraslazione con fattore di scala

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_i \\ t_j \end{bmatrix}$$

Modello polinomiale generale

$$i = i(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + \dots \\ \dots + a_{m,0}x^m + a_{m-1,1}x^{m-1}y + \dots a_{1,m-1}xy^{m-1} + a_{0,m}y^m$$

$$j = j(x, y) = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{20}x^2 + b_{11}xy + b_{02}y^2 + \dots \\ \dots + b_{m,0}x^m + b_{m-1,1}x^{m-1}y + \dots b_{1,m-1}xy^{m-1} + b_{0,m}y^m$$

## Rational Function Models

$$\xi = \frac{P_a(X, Y, Z)}{P_b(X, Y, Z)}$$

$$\eta = \frac{P_c(X, Y, Z)}{P_d(X, Y, Z)}$$

Quoziente tra polinomi di 3<sup>a</sup> ordine

$$P_a(X, Y, Z) = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + \dots + a_{17}Y^2Z + a_{18}YZ^2 + a_{19}Z^3$$

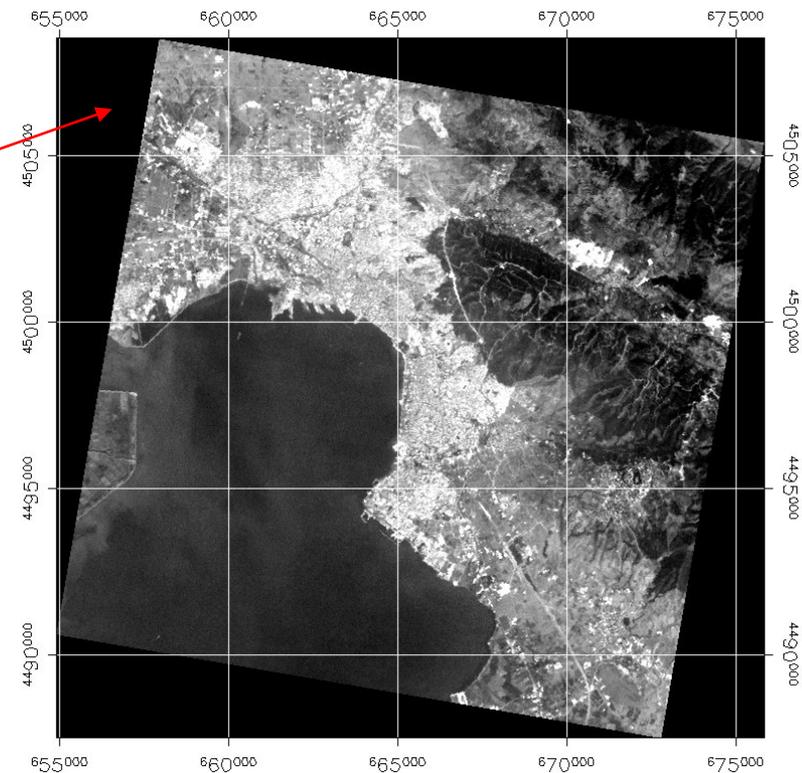
In questo caso è direttamente il modello digitale del terreno (XYZ) messo in relazione con le coordinate immagine (per produrre l'ortofoto).

Il modello è quindi adatto a georeferenziare l'immagine e tiene conto della altimetria.

# GEOREFERENZIAZIONE – ESEMPIO

Esempio di georeferenziazione:

Una registrazione da immagine a carta dell'immagine originale (sopra) sulla griglia UTM (sotto)



aree nere: assenza di dato  
(0 = codifica no data)  
corrispondono a pixel carta  
al di fuori dell'area dell'immagine

## LIVELLO DI PROCESSAMENTO

(esempio SENTINEL-2):

LEVEL 0: E' il dato grezzo compresso (senza correzioni)

LEVEL 1A: E' il dato grezzo non compresso (senza correzioni)

LEVEL 1B: Il dato viene corretto radiometricamente per tenere conto degli effetti di distorsione legati al sensore

- Dark signal
- Non uniformità/linearità della risposta del sensore
- ...

LEVEL 1C: il dato è ortorettificato e riferito al TOA (top of atmosphere)

LEVEL 2A: Il data è riferito al BOA (bottom of atmosphere)



# RIFLETTANZA TOA

Nota la quantità di energia raccolta dal sensore, per ottenere il dato di radianza emesso dalla superficie terrestre bisogna tenere in conto:

- La potenza di irraggiamento del sole (distanza sole-terra)
- L'angolo di incidenza fra i raggi solari e la superficie terrestre (elevazione del sole)

La riflettanza TOA determina la riflettanza della radiazione riflessa dalla superficie terrestre, senza considerare gli effetti di assorbimento dell'atmosfera:

$$\rho_{TOA} = L_{\lambda} \frac{(\pi d^2)}{(E_{sun} \cdot \cos(\theta_s))}$$



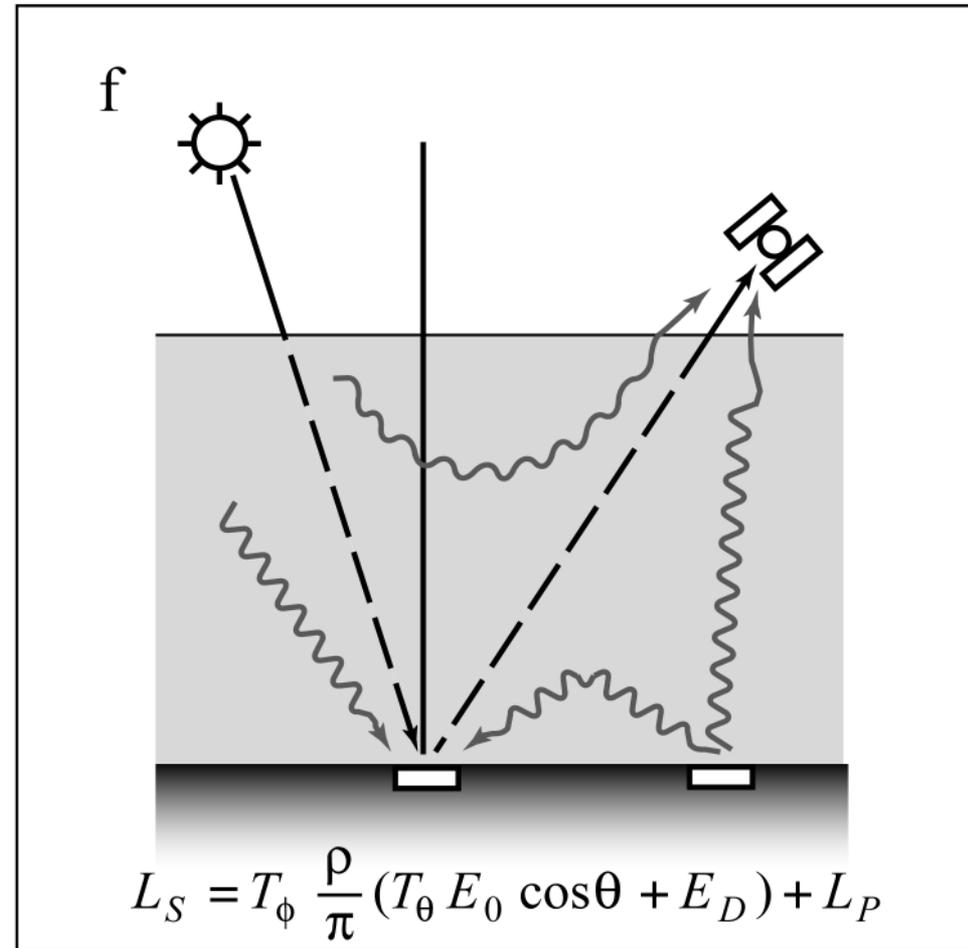
## L'EFFETTO ATMOSFERICO

L'atmosfera assorbe e diffonde la radiazione elettromagnetica:

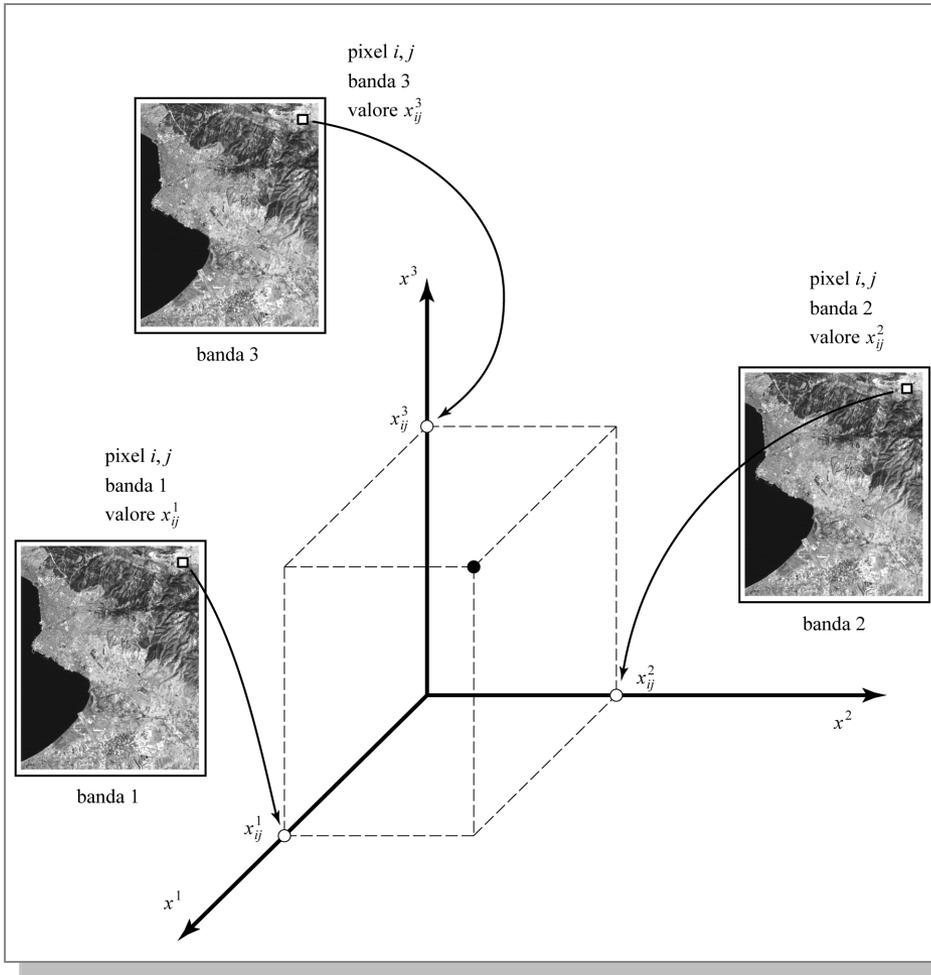
1. l'emittanza incidente su un pixel è diversa da quella emessa dal Sole;
2. la radianza osservata nel sensore per una certa banda è diversa dalla radianza riflessa dal pixel.

Correzione DOS1  
(Dark Object Subtraction)

$$L_p = L_{min} - L_{DO1\%}$$



# CLASSIFICAZIONE - LO SPAZIO MULTISPETTRALE

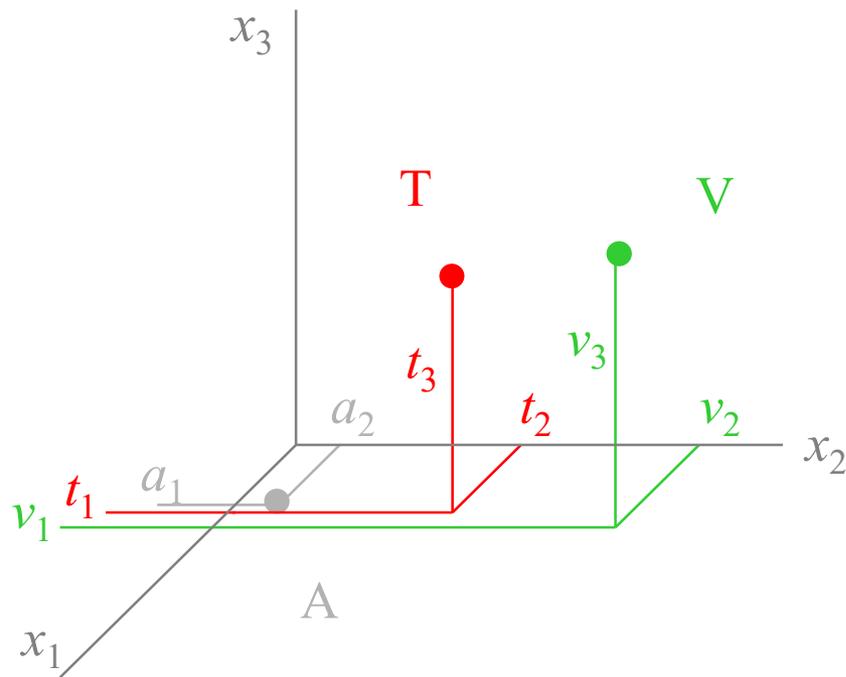


Gli assi corrispondono alle bande del sensore;

le coordinate di un pixel sono i valori assunti dal pixel nelle bande;

la similarità fra pixel è espressa da una funzione di distanza in tale spazio.

# CONCETTI FONDAMENTALI – ANALISI DEI DATI



Le tre bande generano  
uno spazio tridimensionale  
**Lo spazio multispettrale**

I valori di un pixel nelle tre bande  
costituiscono le sue coordinate nello spazio

Pixel corrispondenti  
allo stesso tipo di copertura (classe) hanno  
valori simili nello spazio multispettrale

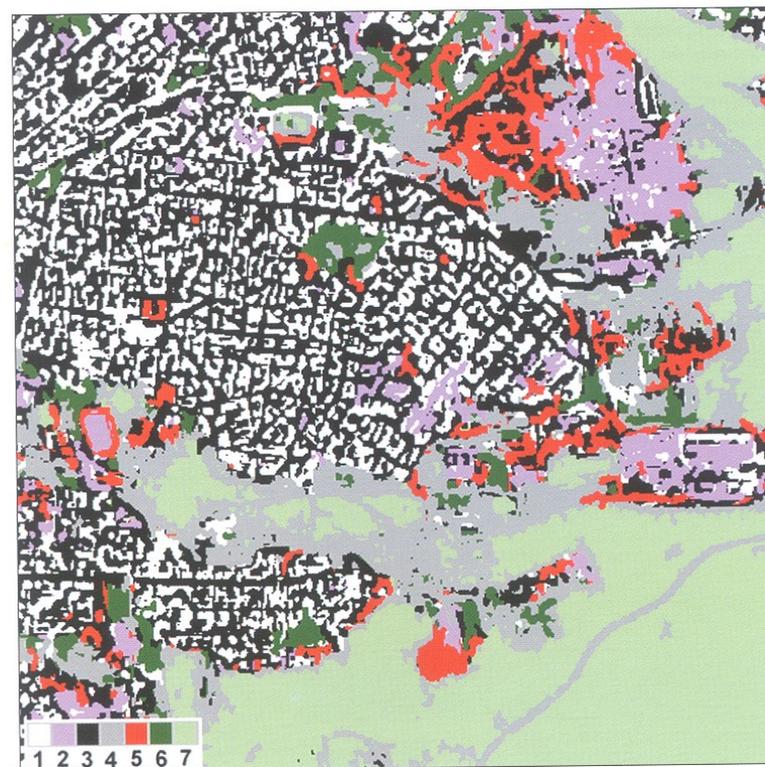
Pixel in classi diverse  
hanno valori differenti

# CONCETTI FONDAMENTALI – CLASSIFICAZIONE

Immagine: dati dal sensore Pancromatico del satellite IRS-1C (Indian Remote Sensing Satellite, risoluzione spaziale 5x5 metri).



Classificazione in 7 classi urbane (1 Residenziali, 2 Industriali, 3 - 4 Strade, 5 Discariche, 6 - 7 Spazi aperti)



Carte tematiche e classificazione di immagini

## CLASSIFICAZIONE

Definizione: Classificare un dato significa assegnarlo o assegnare ciascun elemento che lo compone ad una specifica categoria (classe) che raggruppa elementi con caratteristiche simili.

Le tecniche di classificazione si dividono in due grandi categorie:

Classificazione NON-Supervisionata (unsupervised):

Le operazioni di classificazione non prevedono interventi da parte dell'operatore (se non nella fase finale di etichettatura delle classi)

Classificazione Supervisionata (supervised):

Viene svolta in due fasi, la prima delle quali prevede un addestramento (training) del classificatore sulla base di dati forniti dall'operatore.

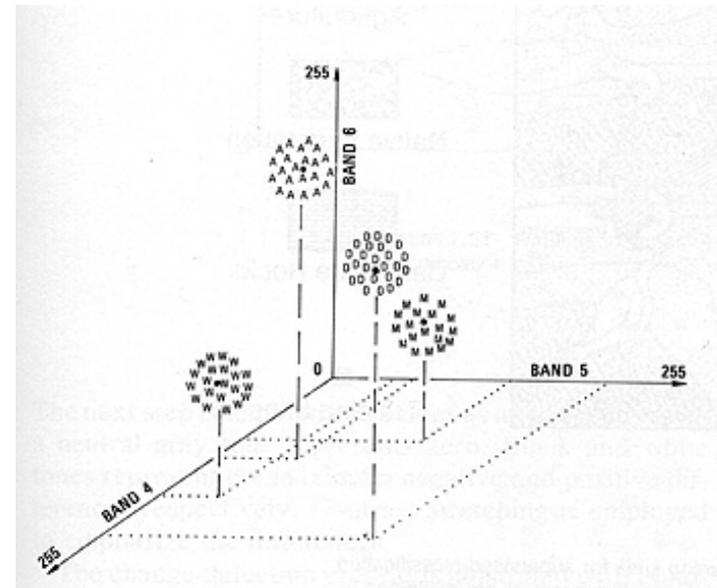
Nella seconda fase, sulla base degli esiti del training, avviene la classificazione di tutto il dataset.

# CLASSIFICAZIONE UNSUPERVISED

Si tratta di una classificazione che prescinde dalla conoscenza di aree campioni al suolo (training).

In generale si tratta di analizzare lo spazio dei dati in modo da raggrupparli in un certo numero di famiglie (cluster).

Ogni cluster è caratterizzato dall'essere formato da pixel simili (verosimilmente appartenenti alla stessa classe).



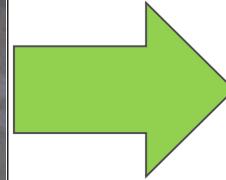
I metodi di clustering si basano generalmente su una partizione dello spazio multispettrale che

- minimizzi la distanza fra gli elementi di uno stesso cluster
- e massimizzi la distanza fra i diversi cluster.

# PREPROCESSAMENTO DEI DATI

Esistono tecniche numeriche che amplificano le differenze fra classi differenti rendendo la loro individuazione più semplice/affidabile. Generalmente tali tecniche comportano una trasformazione dello spazio radiometrico.

## ESEMPIO 1: FILTRO DI WALLIS



FILTRO DI WALLIS:

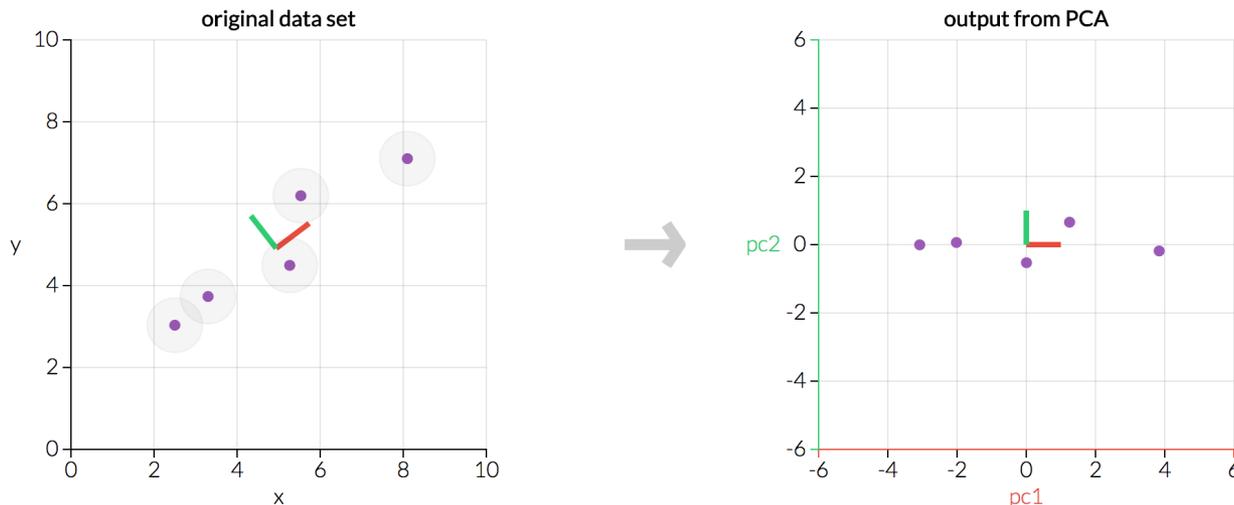
$$g(x,y) = C(x,y) + \lambda(x,y)*f(x,y)$$

# PREPROCESSAMENTO DEI DATI

Esistono tecniche numeriche che amplificano le differenze fra classi differenti rendendo la loro individuazione più semplice/affidabile. Generalmente tali tecniche comportano una trasformazione dello spazio radiometrico.

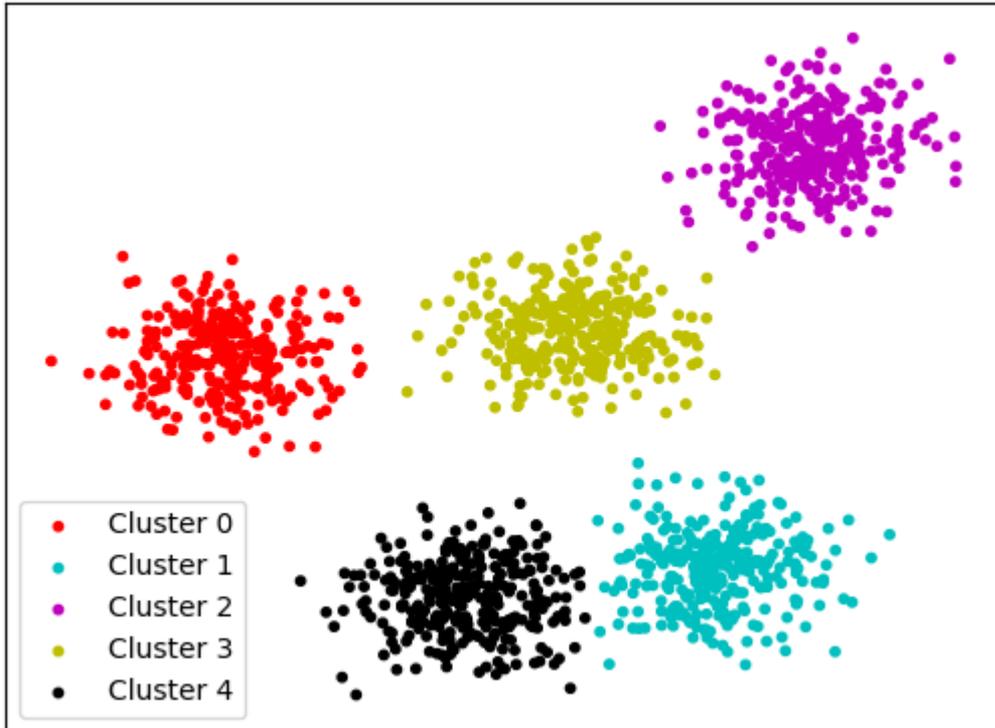
## ESEMPIO 2: PCA (Principal Component Analysis)

Trasformazione lineare che determina un nuovo sistema cartesiano in cui la varianza delle nuove variabili è massimizzata per le prime n componenti



# METODI DI CLUSTERING

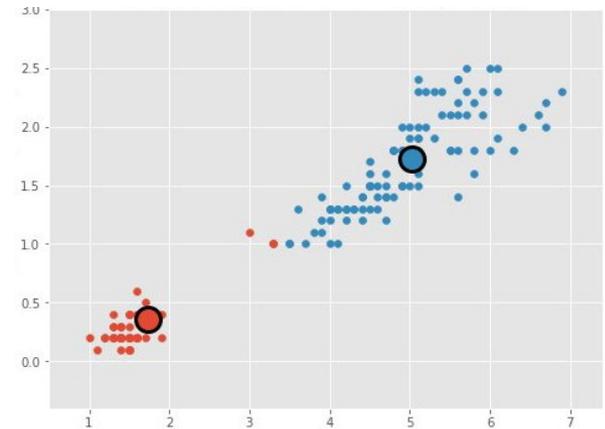
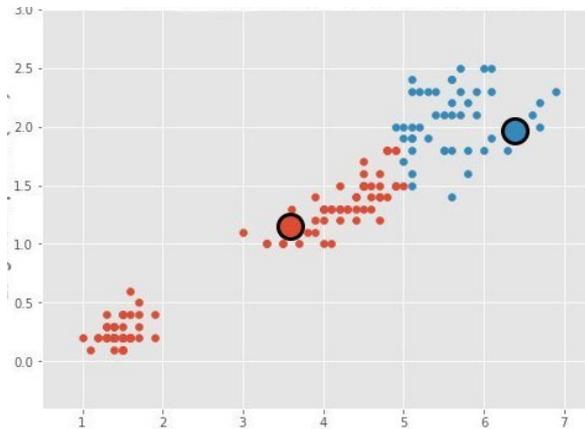
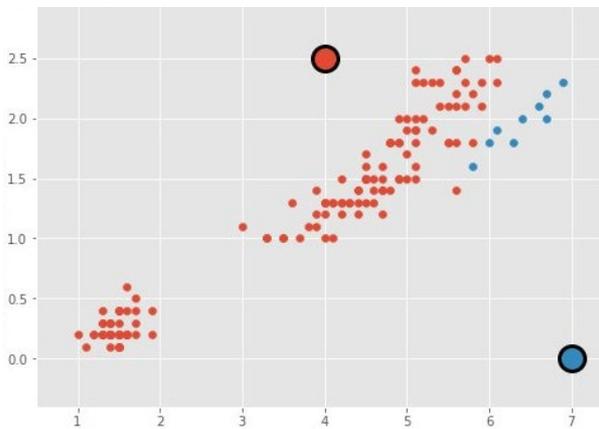
Sono metodi finalizzati a raggruppare insieme di dati che hanno caratteristiche simili. Nel caso di immagini multispettrali la caratteristica che accumuna elementi di uno stesso cluster è la similitudine spettrale.



# METODI DI CLUSTERING

## ALGORITMO K-MEANS:

1. Si definisce il numero  $n$  di cluster che si intende ottenere
2. Si genera una suddivisione del campione di dati in  $n$  partizioni:
  1. Si definiscono  $n$  punti (Centroidi)
  2. Ogni elemento del campione viene assegnato al centroide più vicino
3. Sulla base della partizione ottenuta si ricalcola il centroide
4. Ogni elemento del campione viene riassegnato al centroide più vicino
5. Si ripetono i punti 3-4 fino a convergenza



# METODI DI CLUSTERING

## ALGORITMO ISODATA:

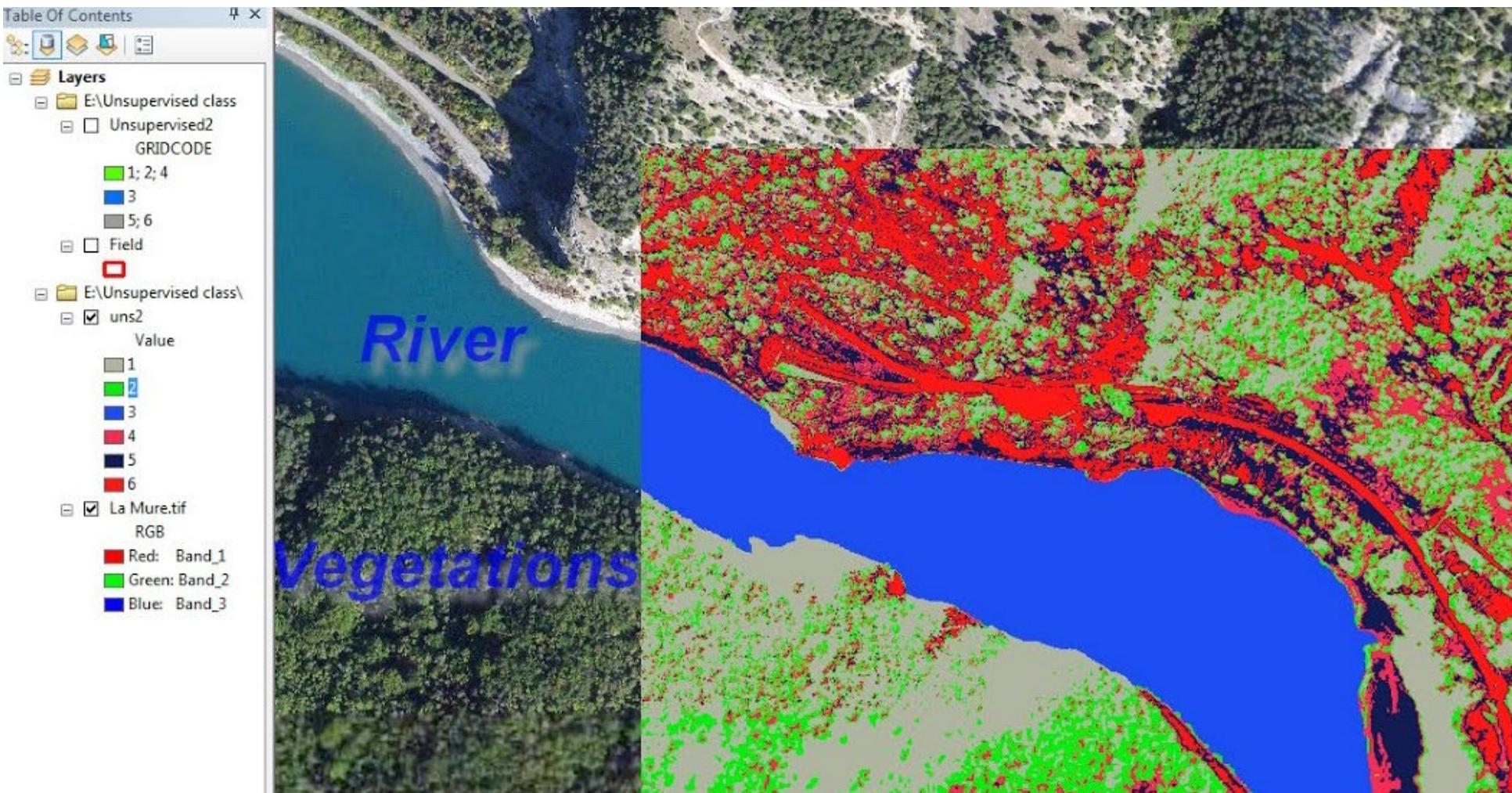
E' una variante dell'algoritmo K-means.

Ad ogni iterazione (vd slide precedente) si valuta se occorre applicare ciascuna delle seguenti tre procedure:

1. Eliminazione di un cluster: si eliminano ad esempio cluster con pochi elementi
2. Unione di cluster: si uniscono gli elementi di cluster vicini
3. Divisione di cluster: si dividono cluster dispersi (ad esempio lungo una direzione) in due nuovi cluster.



# CLASSIFICAZIONE UNSUPERVISED



# CLASSIFICAZIONE SUPERVISED

Si tratta di una classificazione che si basa sulla conoscenza di aree campioni al suolo (training).

In questo caso la partizione dello spazio multispettrale avviene sulla base di dati forniti da un operatore (supervisore).

Tale partizione viene poi applicata a tutti i restanti dati.

In altre parole la classificazione avviene in due fasi:

1. Fase di addestramento (training): L'esperto definisce quali sono le classi di interesse ed individua alcuni campioni (training set) atti a definire le caratteristiche di ciascuna classe.
2. Fase di assegnazione: Sulla base delle caratteristiche di ciascuna classe definite nel passo precedente, tutti i dati vengono assegnati alla classe «più vicina».

Al termine è sempre bene valutare l'accuratezza della classificazione utilizzando un testing set (dati di classificazione nota a priori).

**NB: VALE ANCHE PER LA CLASSIFICAZIONE UNSUPERVISED**



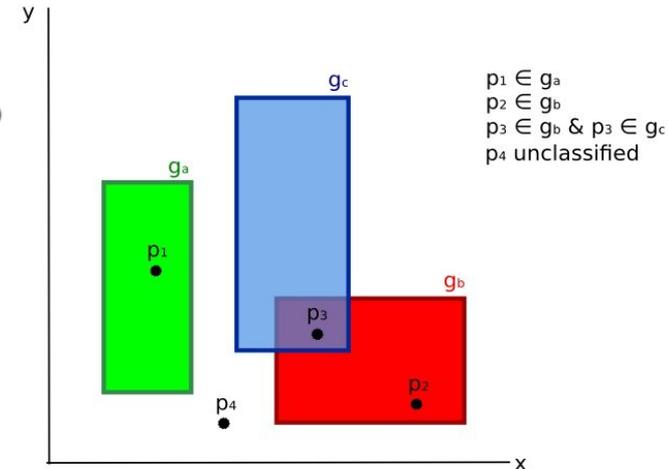
# CLASSIFICAZIONE SUPERVISED

ESEMPIO:

## ALGORITMO LAND COVER SIGNATURE DI SCP

### 1. Training:

Sulla base dei dati di addestramento relativi a ciascuna classe si determina lo spazio iper-rettangolare (rettangolo n-dimensionale) che contiene tutti i dati (o una percentuale rilevante dei dati)



### 2. Assegnazione:

Per ciascun pixel dell'immagine si analizza la sua posizione in relazione ai rettangoli individuati al passo precedente:

- Se il dato ricade all'interno di uno e uno soltanto dei rettangoli il dato viene assegnato alla classe corrispondente
- Se il dato NON ricade all'interno di alcun rettangolo non viene assegnato a nessuna classe
- Se il dato ricade in una zona di sovrapposizione fra classi viene etichettato come incerto e non viene assegnato

### 3. Assegnazione pixel non classificati (opz):

Sulla base di una determinata metrica, tutti i pixel non classificati, vengono assegnati alla classe più vicina.