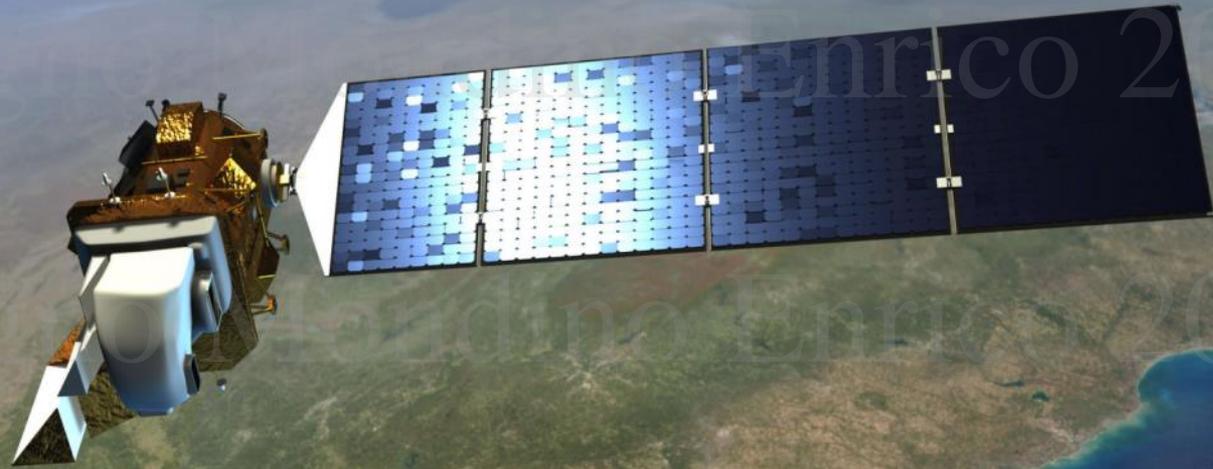


Enrico Borgogno Mondino

enrico.borgogno@unito.it

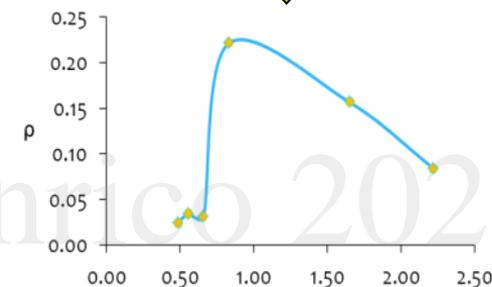
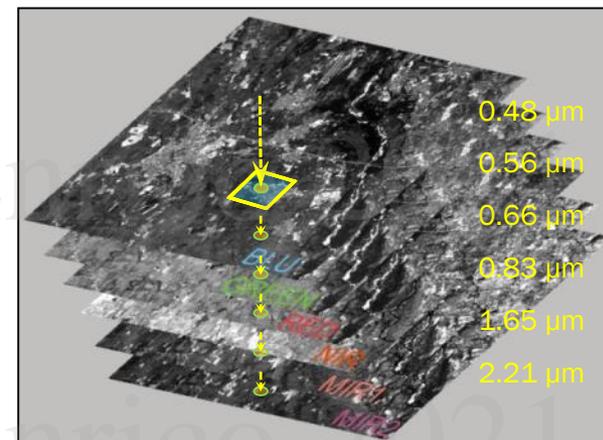
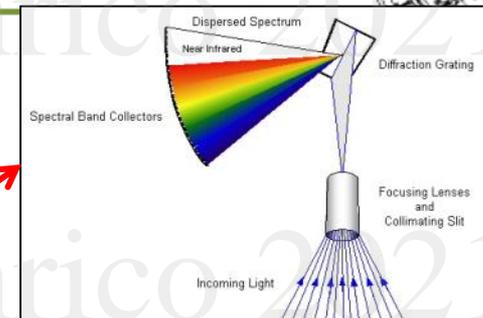
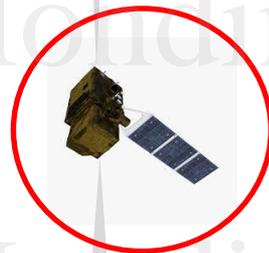
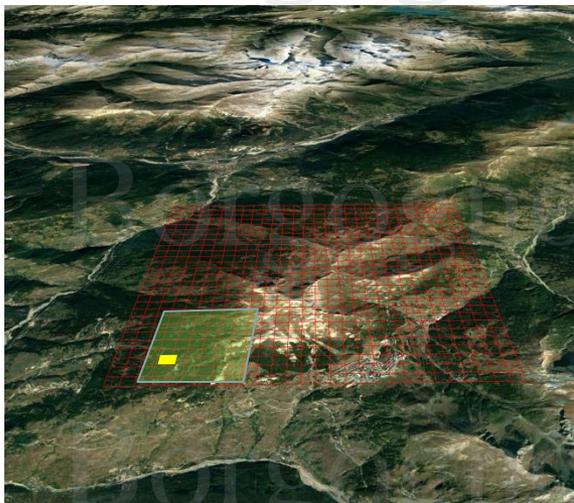
Tel. Uff. 011-6705523

From http://hyspeedblog.files.wordpress.com/2014/02/020314_landsat.jpg



Sensori per il telerilevamento

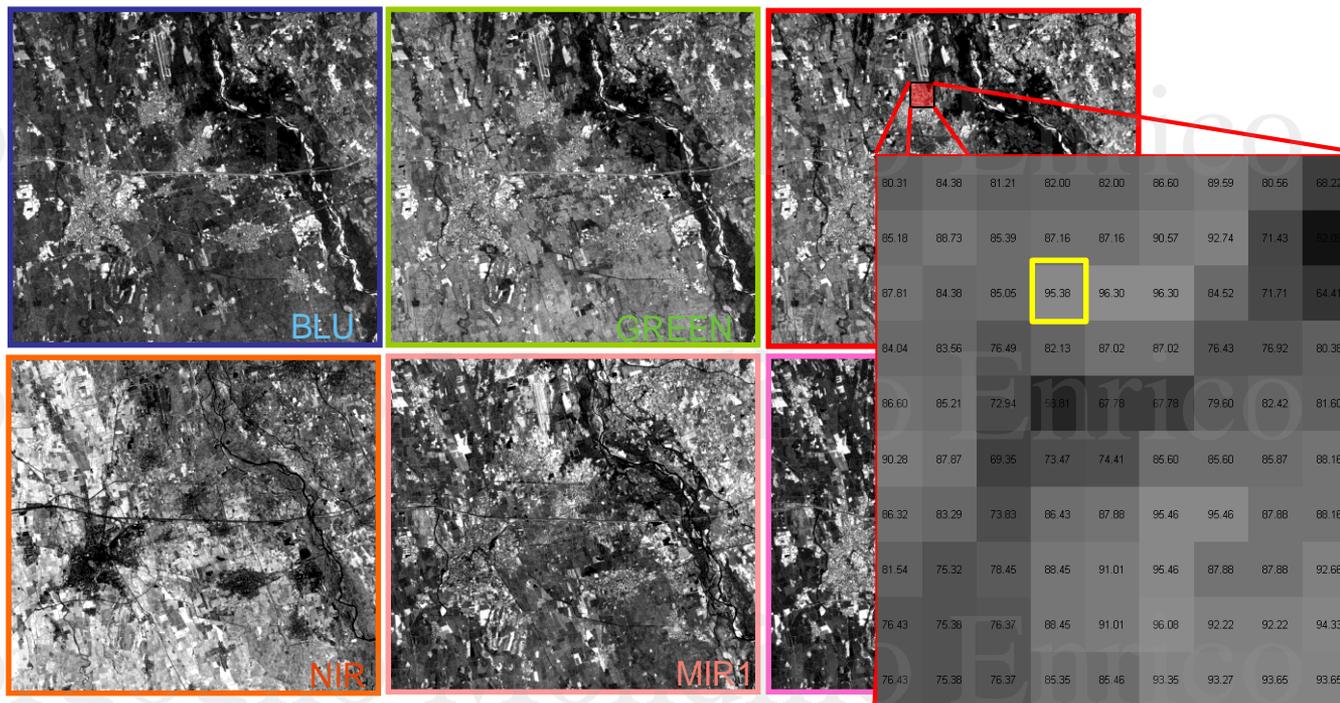
L'immagine digitale multispettrale



I sensori per il TELERILEVAMENTO sono delle camere digitali capaci di registrare e codificare separatamente il segnale riflesso dalle superfici in diversi intervalli spettrali (tipicamente appartenenti alla regione dello spettro tra 350 e 2500 nm)

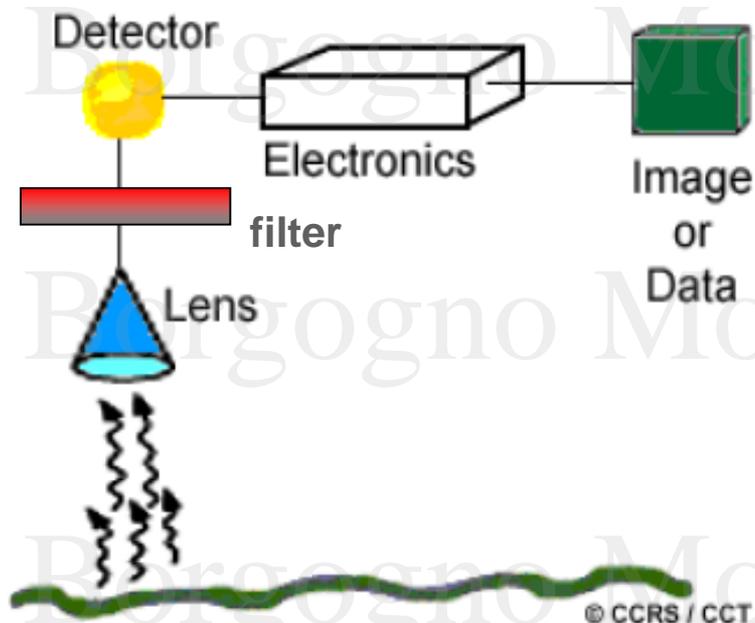
Il terreno viene campionato regolarmente dai pixel. Ogni pixel registra, per la stessa porzione di scena, tanti segnali quante sono le bande in cui il sensore è in grado di operare.

Il segnale proveniente da terra viene scomposto in bande che sono registrate separatamente sotto forma di immagini digitali in toni di grigio. Pixel scuri corrisponderanno ad aree a bassa riflettanza (per la specifica banda); pixel chiari ad aree a d alta riflettanza.



Sensori ottici per il telerilevamento

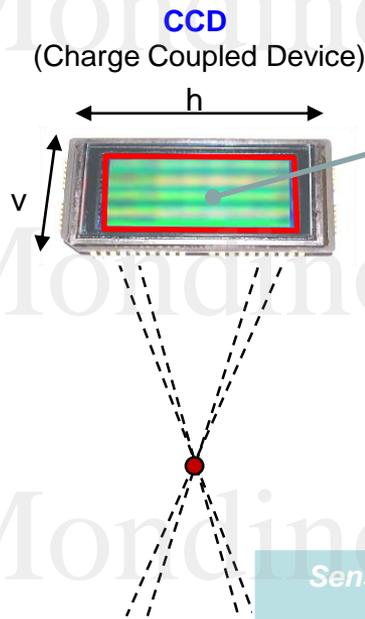
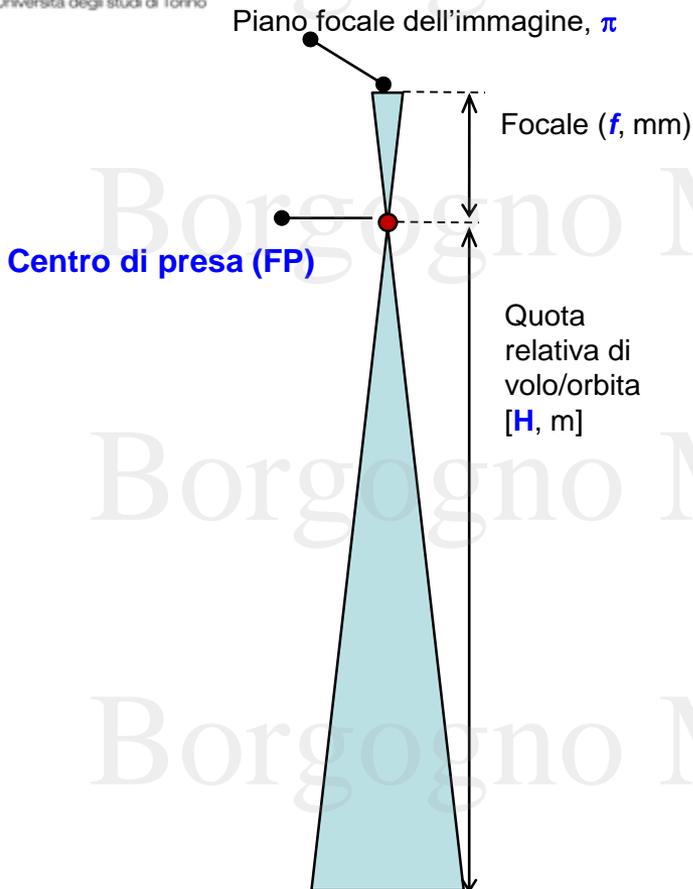
Schema generico di sensore



- Sistema ottico di lenti che colletta la radiazione
- Filtri dedicati in grado di separare le bande spettrali
- Uno o più rilevatori di segnale (CCD o CMOS)
- Un convertitore di segnale elettrico da analogico a digitale → **IMMAGINE DIGITALE**

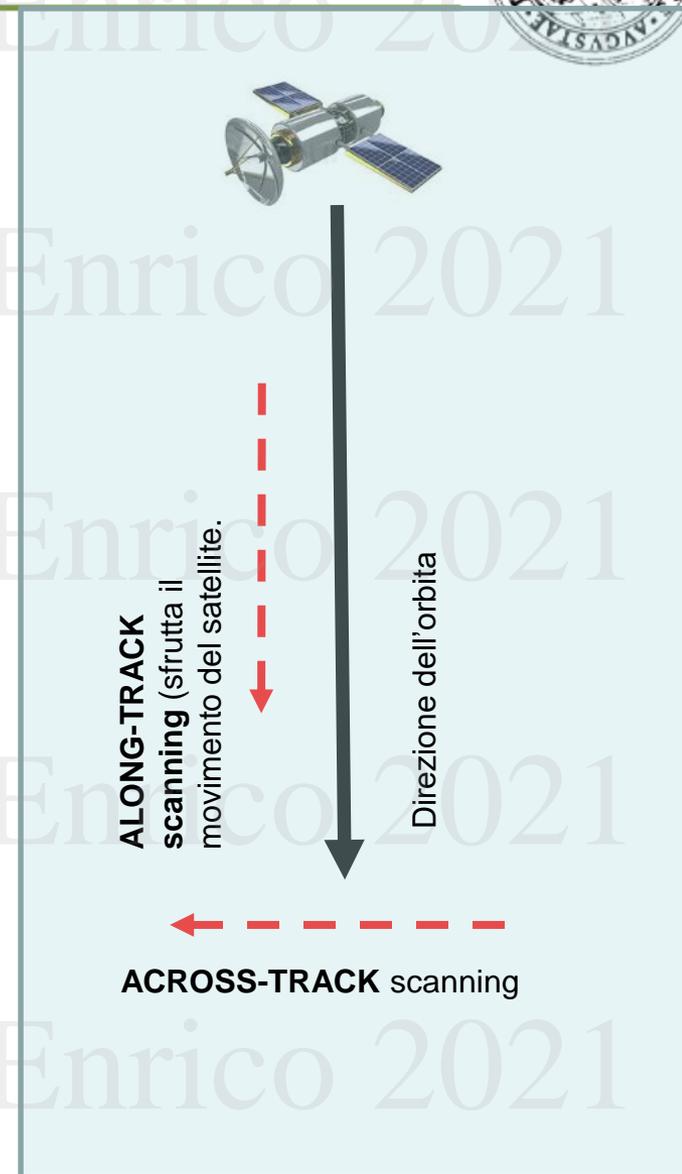
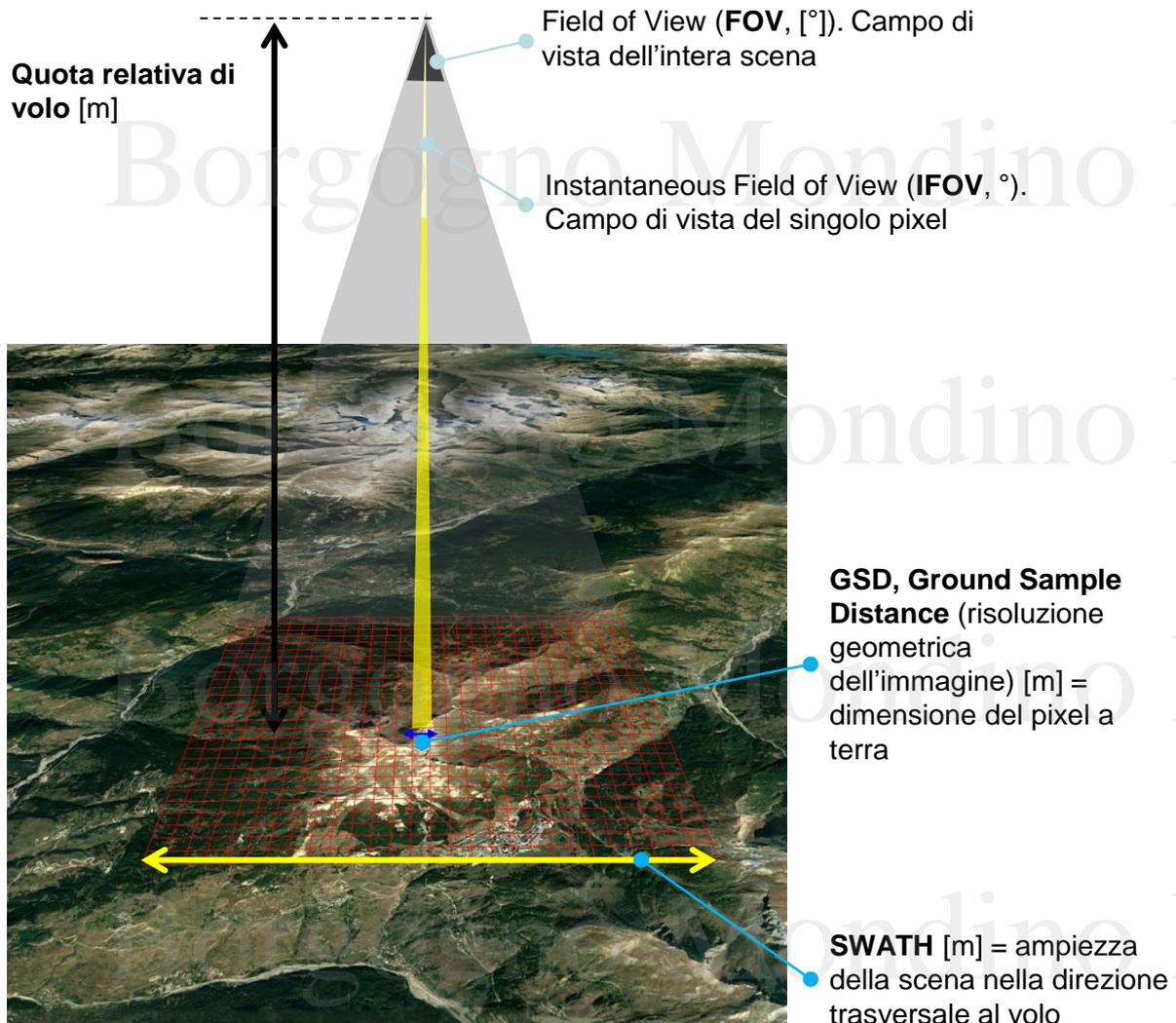
Il **piano focale (π)** è quello sul quale è posizionato il sensore CCD, cioè dove viene registrata la scena.

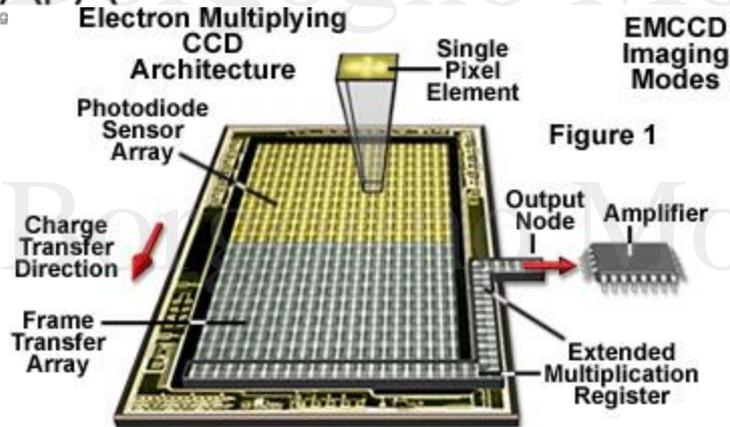
La **focale (f)** è la distanza tra il piano focale e il centro di presa del sistema ottico.



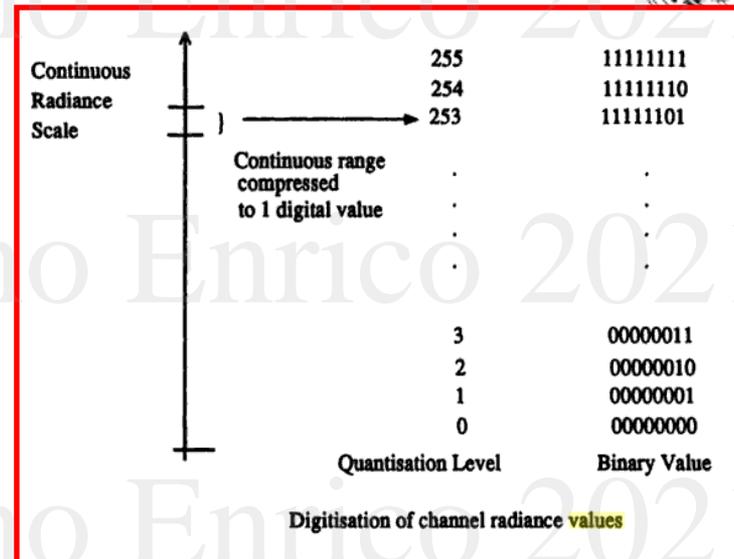
Sensor	p (μm)	SWATH (km)	H (km)	f (mm)
Landsat 8 OLI (sat.)	38	185	705	886
Sentinel 2 MSI (sat.)	7.6	290	786	600
MAIA (RPAS)	3.75	Variabile	0 - 150 m	7.5
MAPIR (RPAS)	1.34	Variabile	0 - 150 m	3.97

Il rapporto $s = \frac{H}{f}$ definisce la SCALA dell'IMMAGINE e, conseguentemente, l'ampiezza della scena (FOOTPRINT o SWATH) e la risoluzione geometrica (GSD). Per determinarli occorre conoscere rispettivamente la dimensione fisica del pixel (**pixel size (p)**) e la dimensione fisica del sensore CCD (**$h \times v$**).



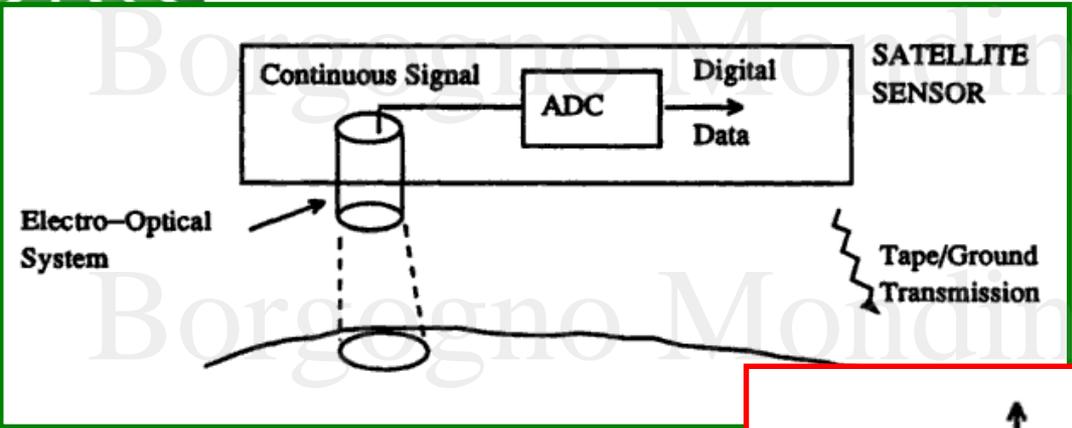


© <https://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/images/emccdsfigure1.jpg>

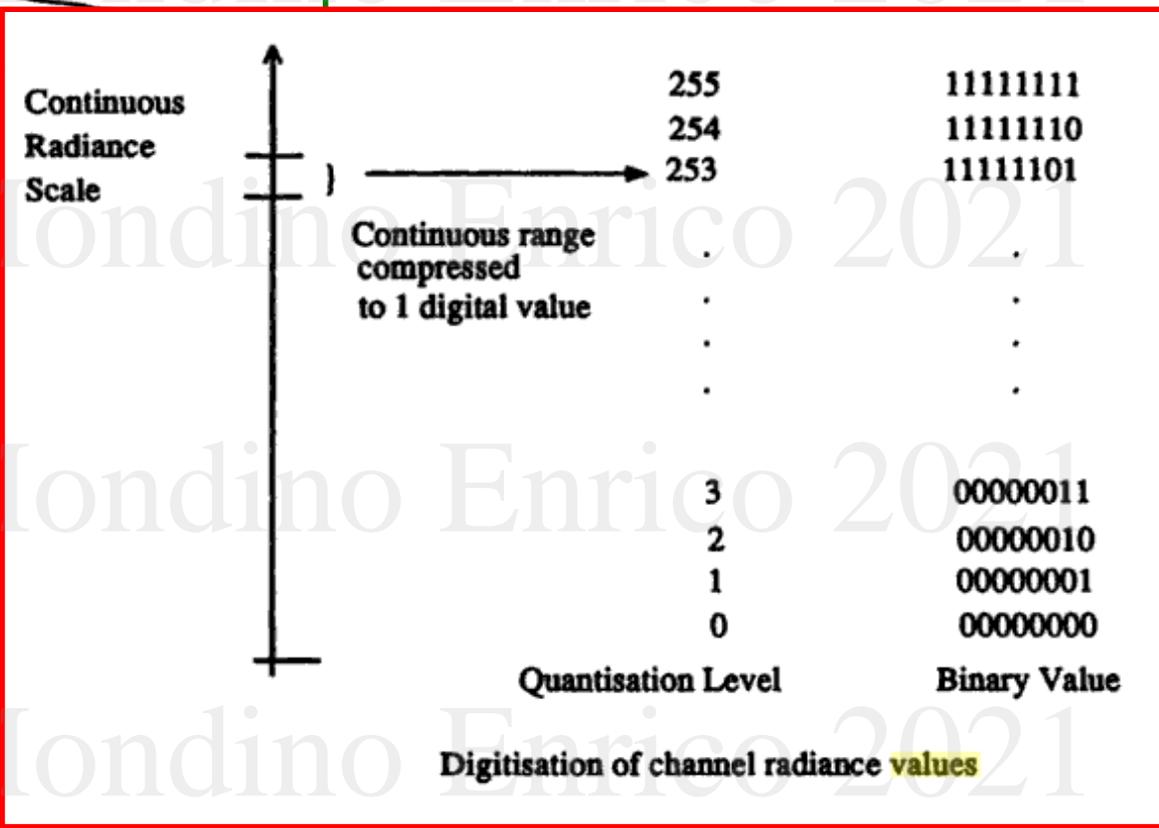


CCD: l'immagine è proiettata dal sistema ottico sulla regione foto-attiva del CCD, determinando l'accumulo di una carica elettrica proporzionale alla radianza registrata, su ogni capacitore (associato al fotodiodo della matrice CCD). Il sistema è tenuto sotto tensione da un circuito elettrico che, a seguito della variazione di carica, cambia selettivamente il valore di tensione nominale. La radianza viene dunque letta come variazione di potenziale elettrico associato alla specifica posizione sul CCD. .

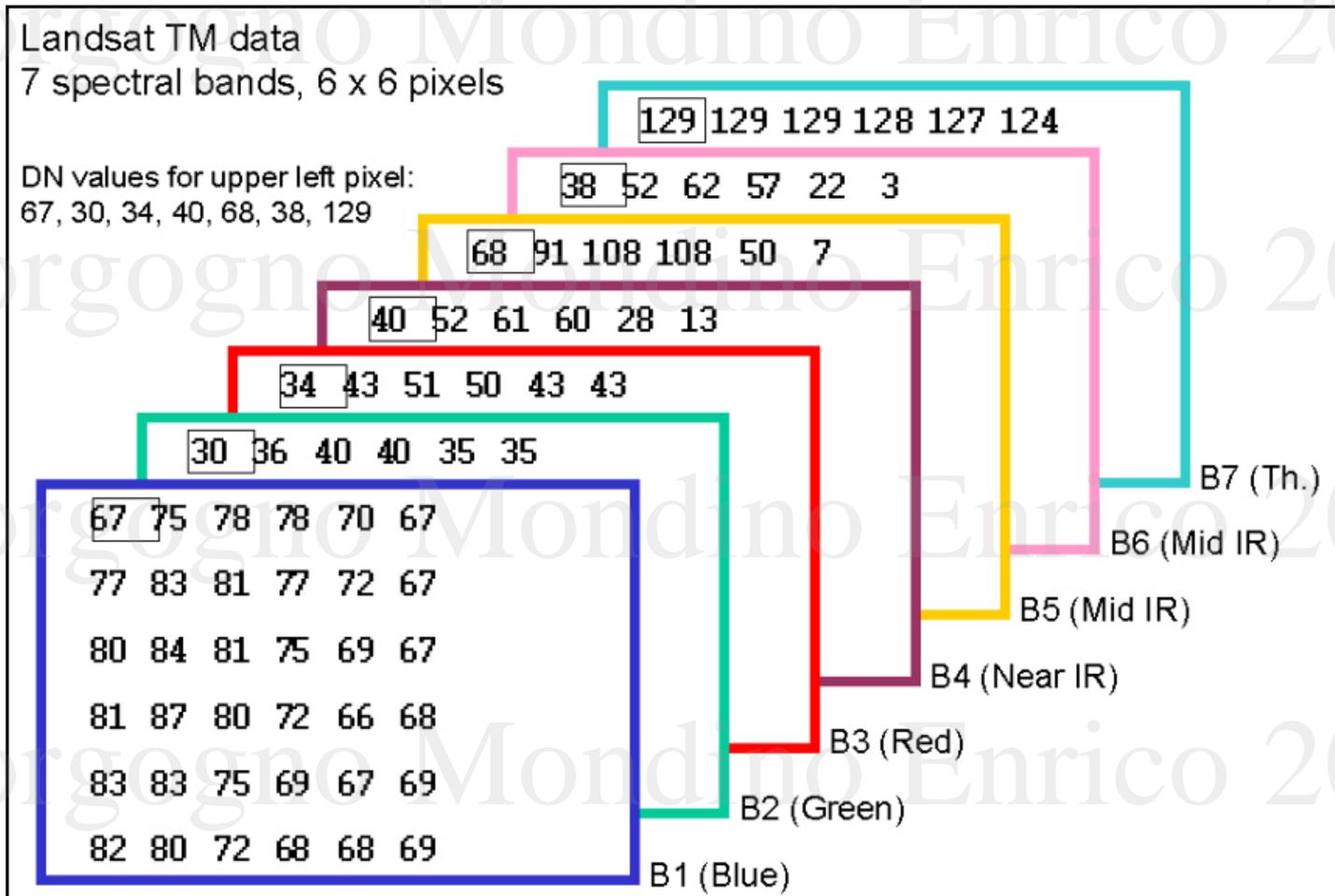
Convertitore analogico/digitale (A/D): è il dispositivo che campiona il segnale di variazione del potenziale convertendolo in Digital Numbers.

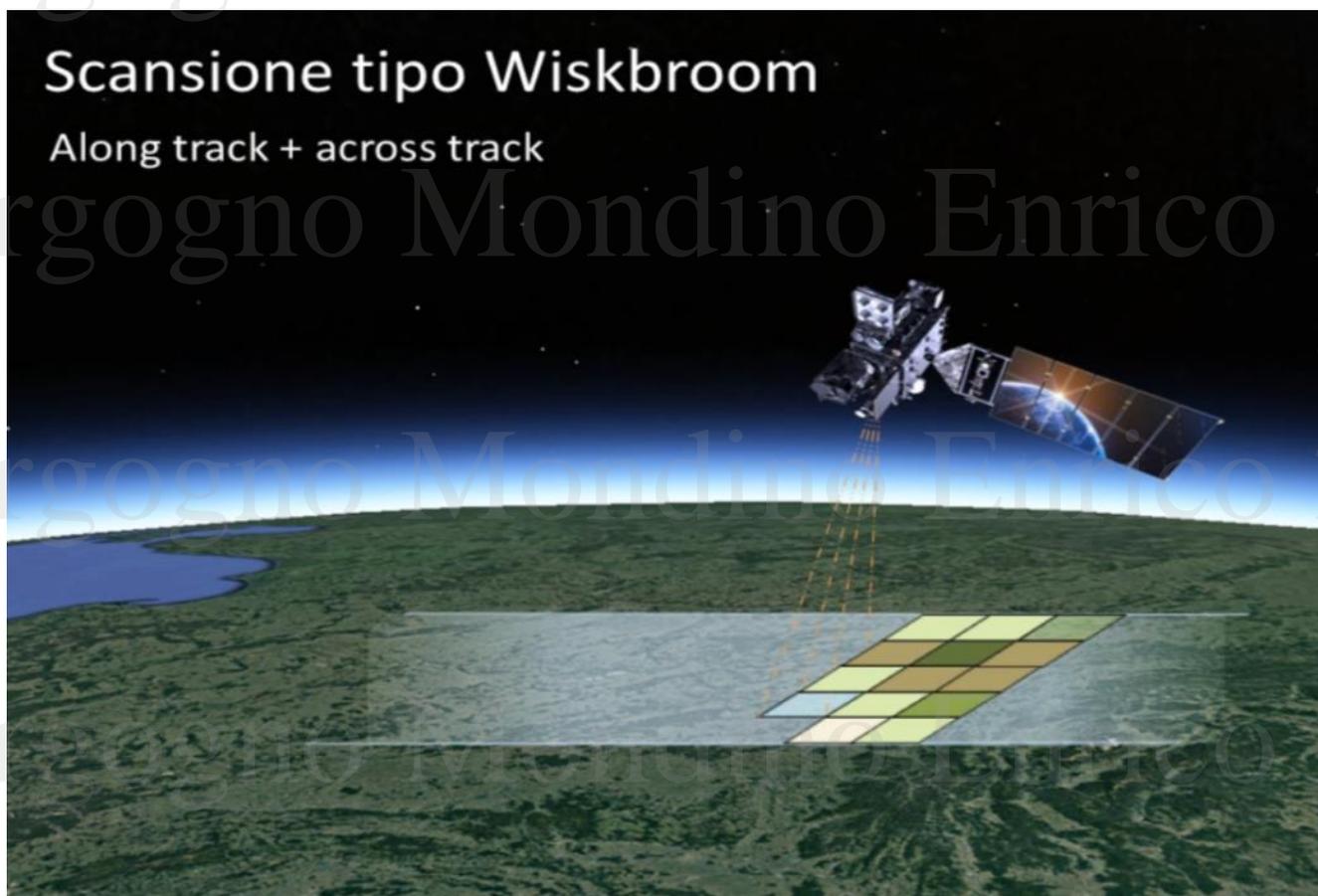


DAL SEGNALE ANALOGICO ALL'IMMAGINE DIGITALE

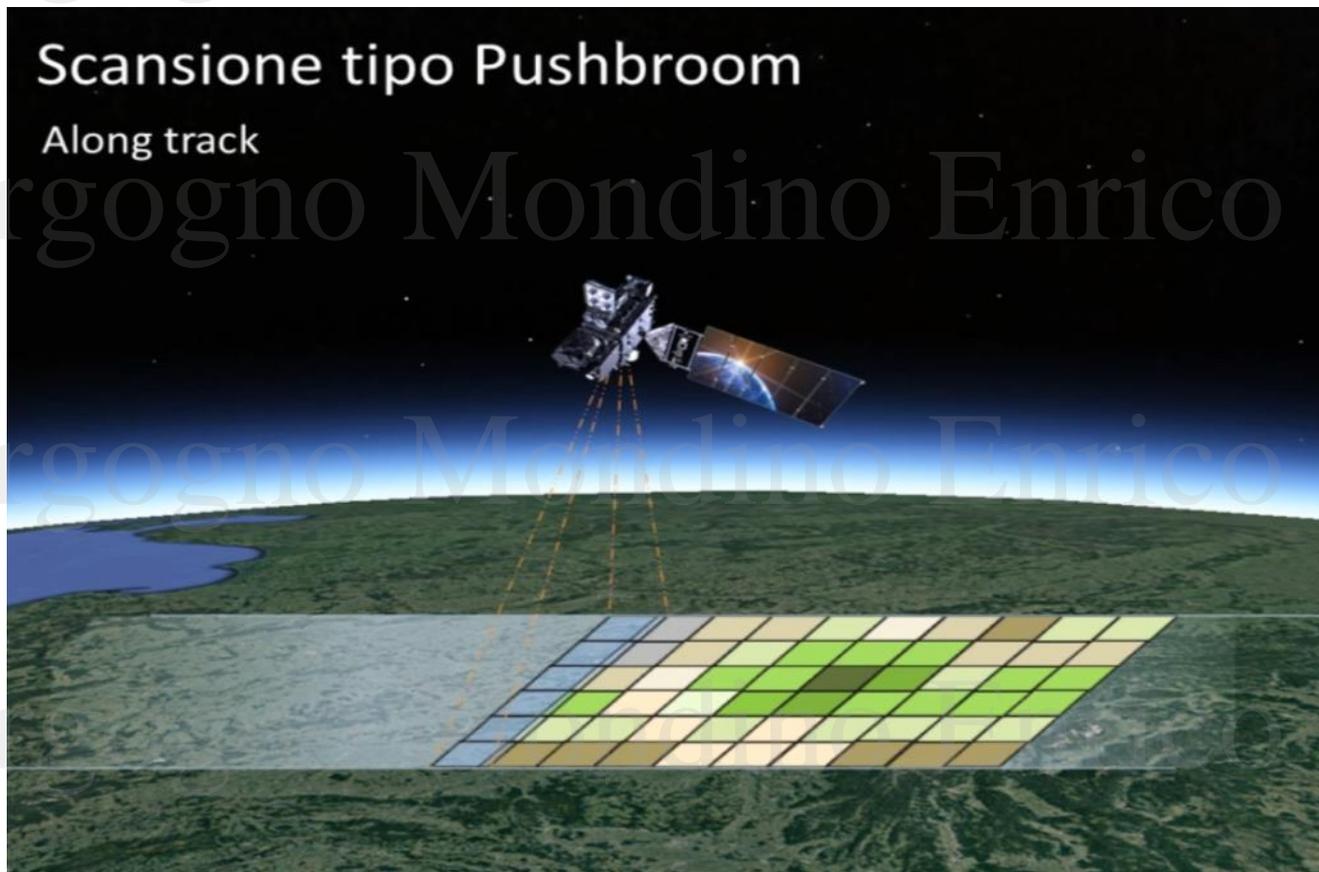


L'IMMAGINE DIGITALE MULTISPETTRALE (lo STACK di bande)

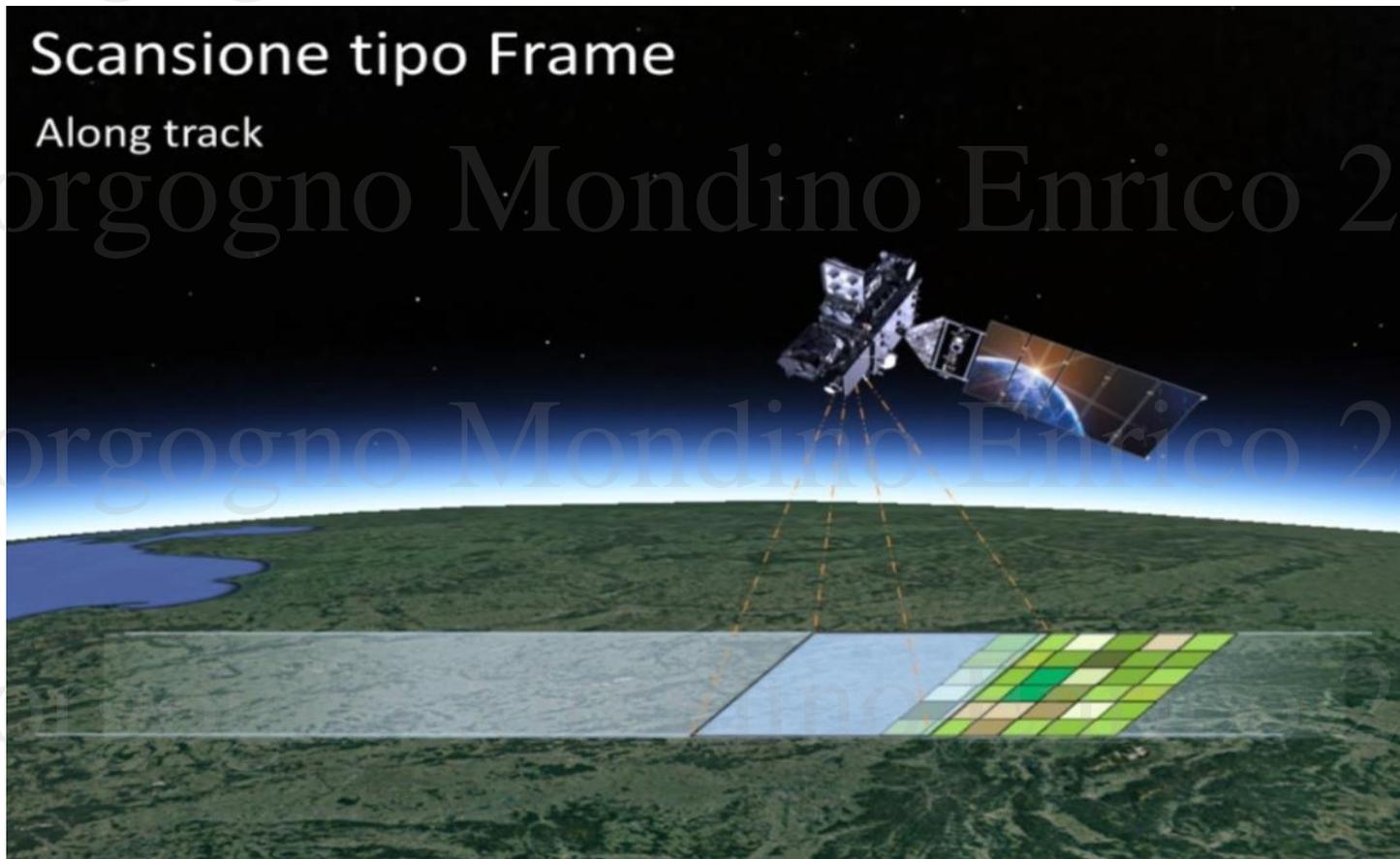




- a) Viene acquisita una cella alla volta (1 rilevatore per banda)
- b) La scansione della scena avviene:
 - a) **Across-Track** per effetto dello specchio (Oscillante o Rotante) a IFOV costante
 - b) **Along-Track** per effetto del movimento del satellite

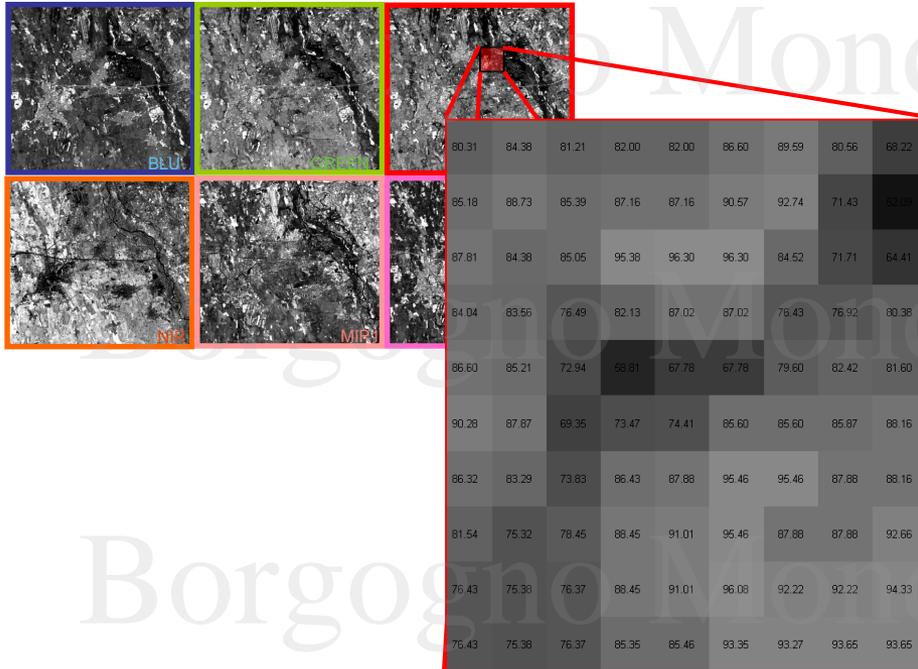


- a) Viene acquisita una riga alla volta (riga di rilevatori)
- b) Le distorsioni sull'immagine sono più contenute



- Tutta la scena viene acquisita istantaneamente
- Non è possibile oggi su sensori digitali per problemi di trasferimento dati
- Gli unici sensori satellitari FRAME sono di tipo analogico → FILM

Caratteristiche dell'immagine



L'elemento minimo dell'immagine che rappresenta la radianza registrata dal singolo rilevatore è detta **CELLA** → la sua rappresentazione a video è il **PIXEL**

A) RISOLUZIONE GEOMETRICA [m]

Dimensione al suolo della cella

B) RISOLUZIONE RADIOMETRICA [bit]

n. di bit necessari a descrivere la radianza della cella. Misura la sensibilità del sensore e definisce il minimo quantitativo di radianza necessario ad impressionare il rilevatore.

C) RISOLUZIONE SPETTRALE [n.bande]

n. di intervalli di λ a cui è sensibile lo strumento

D) RISOLUZIONE TEMPORALE [gg]:

periodo di rivisitazione, cioè distanza temporale tra due acquisizioni successive della stessa zona

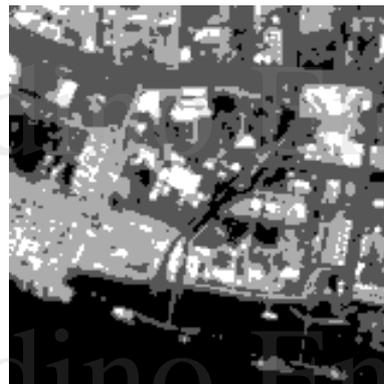
RISOLUZIONE RADIOMETRICA



8 bit
(256 livelli)



3 bit
(8 livelli)



2 bit
(4 livelli)



1 bit
(2 livelli)

RISOLUZIONE GEOMETRICA



Pixel: 10 m
160 x 160



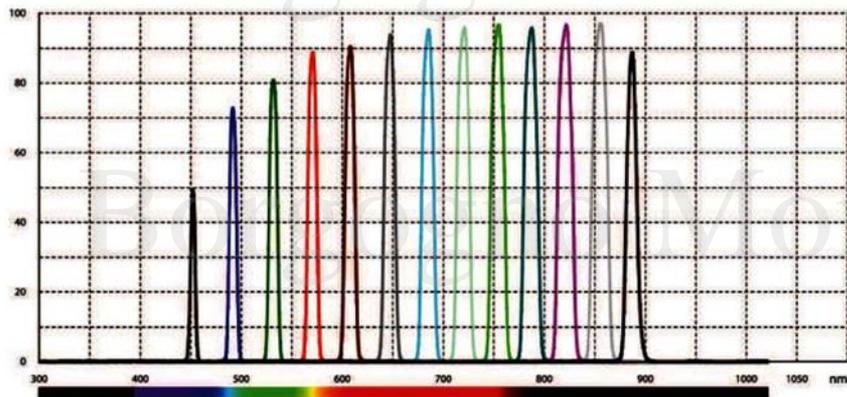
Pixel: 20 m
80 x 80



Pixel: 40 m
40 x 40



Pixel: 80 m
20 x 20



<https://maxmax.com/maincamerapage/hyperspectral>



Filtri a bande **ben separate** sono preferibili a quelli con bande parzialmente **sovrapposte**.

Bande larghe garantiscono una maggiore radianza al sensore.

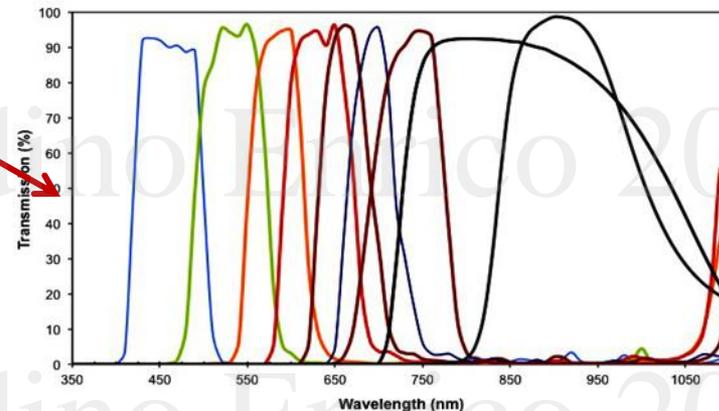
→ Più alta è la risoluzione spettrale del sensore, minore la sua risoluzione geometrica.

La dimensione del pixel a terra deve infatti aumentare per compensare la riduzione energetica che un più alto numero di bande determina nei confronti del segnale registrato.

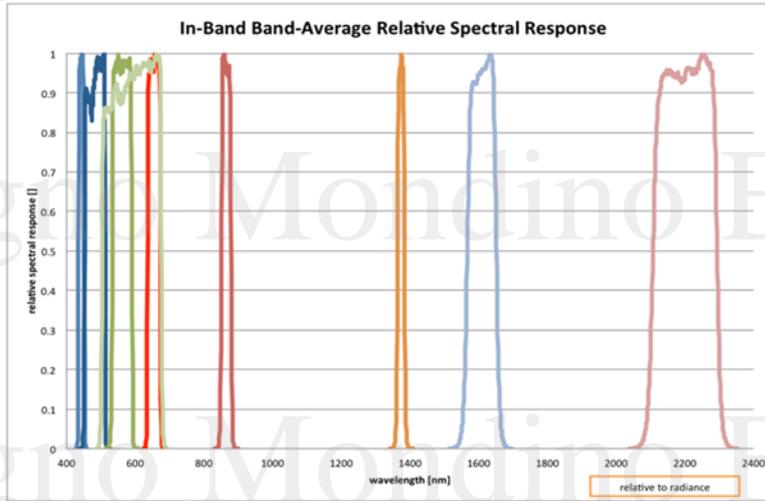
La tipologia di filtro può cambiare moltissimo a seconda del sensore e della sua risoluzione spettrale.

Il filtro opera su bande dello spettro in cui la radianza rilevabile sia sufficiente ad imprimere il sensore (questo dipende sia dalla curva di emissione solare, che dalla trasparenza atmosferica alle diverse lunghezze d'onda).

<https://www.si.edu/mciimagingstudio/multispectral>



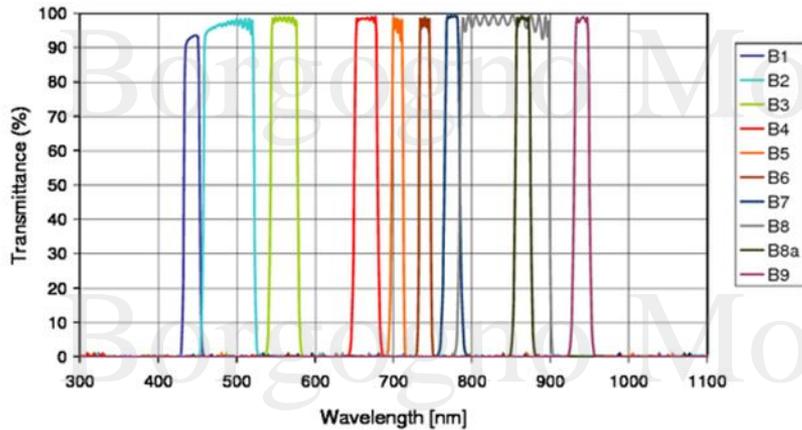
Landsat 8 OLI bands



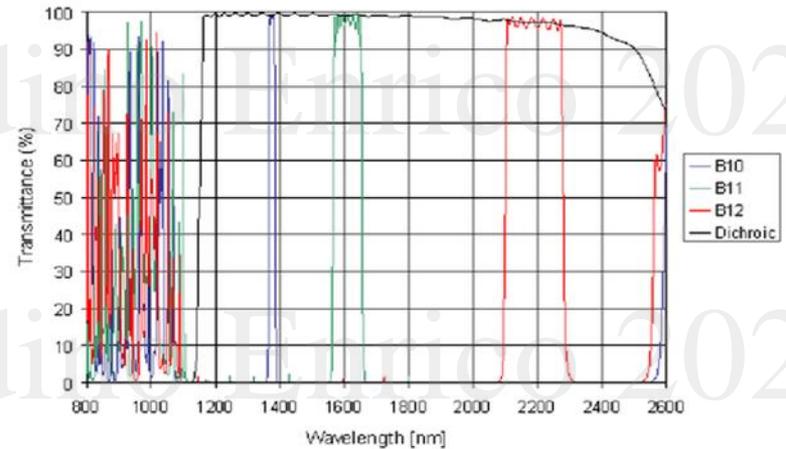
<https://landsat.gsfc.nasa.gov>

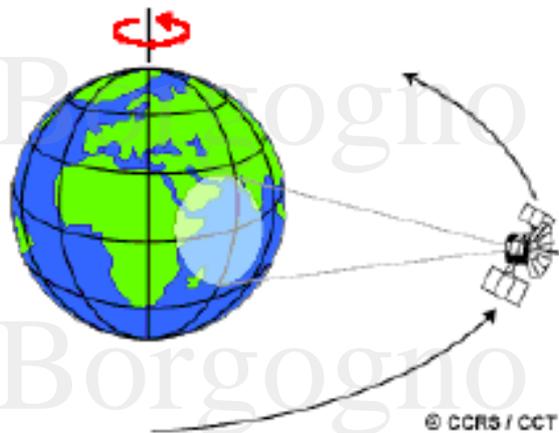
Sentinel 2 MSI bands

S2-VNIR-Filters - D2-Designs Overview



S2-SWIR-Filters - D3-Designs Overview



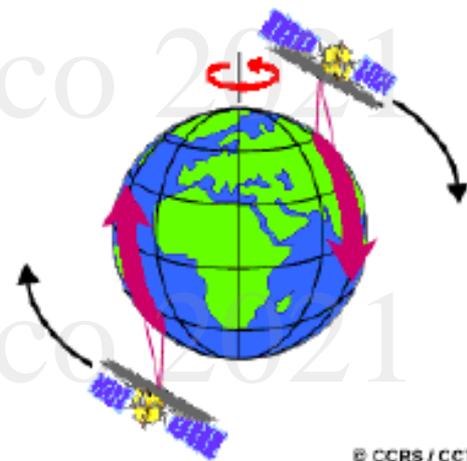
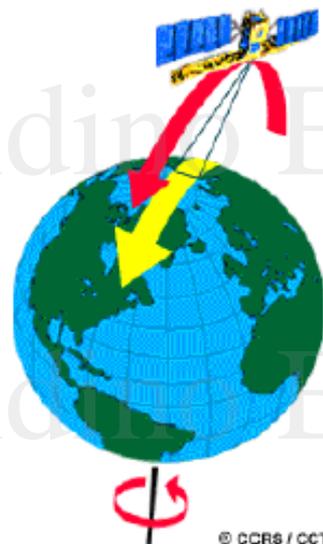


SATELLITI GEOSTAZIONARI

- 36.000 km di quota
- Inquadrano una zona FISSA (es. METEOSAT)

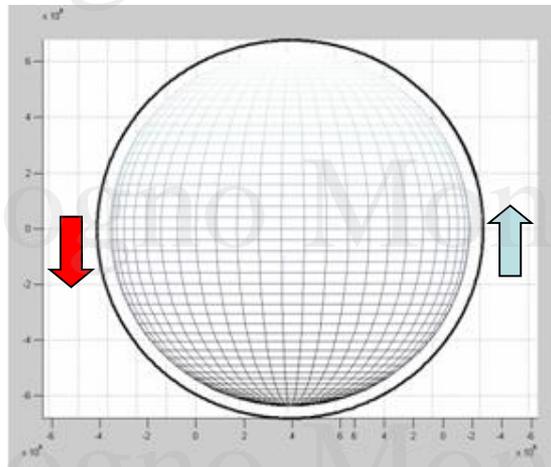
SATELLITI ELIOSINCRONI

- 400 – 800 km di quota
- Inquadrano successivamente tutta la superficie terrestre sfruttando il proprio moto combinato a quello terrestre
- Orbite quasi-polari
- Sorvolano la stessa area alla stessa ora locale.

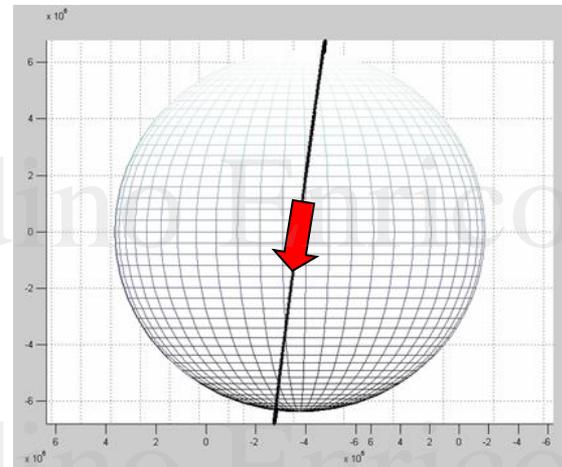


Sono principalmente SATELLITI ELIOSINCRONI

Geometria dell'orbita



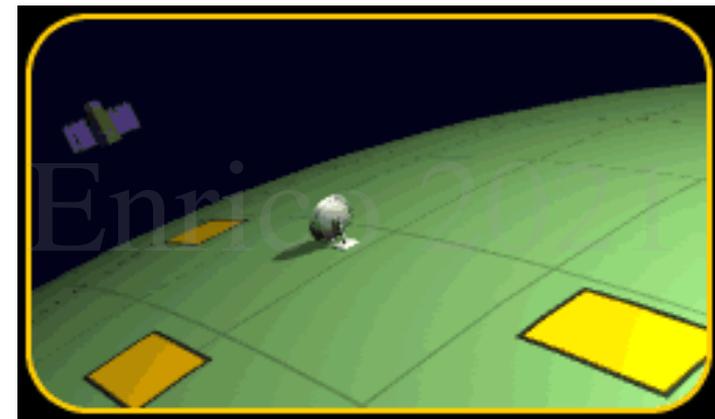
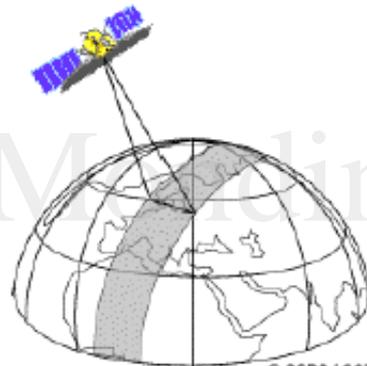
Vista laterale



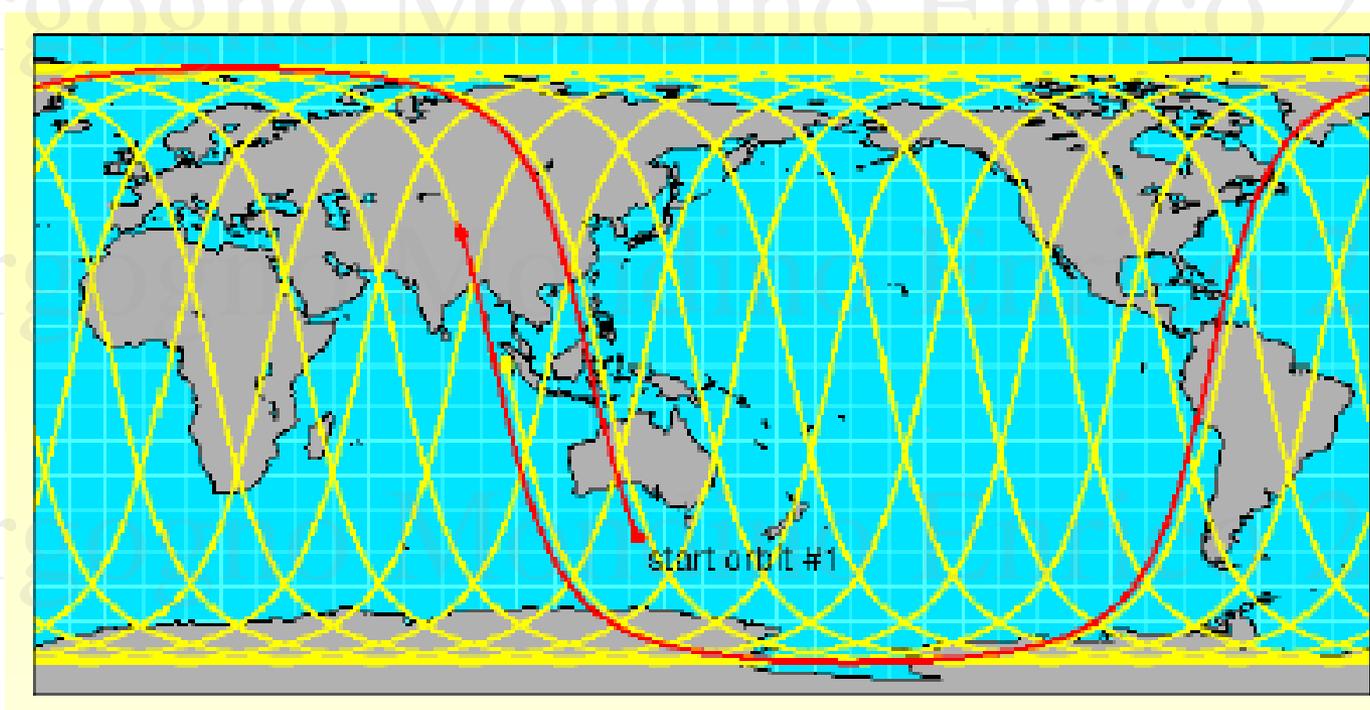
Vista frontale



Schema di
acquisizione generico



Ricoprimento globale del pianeta garantito dalle orbite eliosincrone quasi-polari





SPOT (CNES – FRANCIA)

**SPOT
1-2-3
(1986-
1990-1993)**

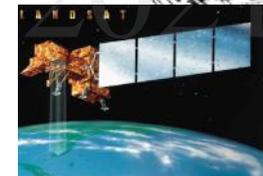
Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
10	8 bit	2 gg	822	60	610 – 680 nm	PUSHBROOM
20	8 bit	2 sensori HRV			V: 500 – 590 R: 610 – 680 NIR: 780 – 890	STEREO

**SPOT
4
(1998)**

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
10	8 bit	2 gg	822	60	610 – 680 nm	PUSHBROOM
20	8 bit	2 sensori HRVIR			V: 500 – 590 R: 610 – 680 NIR: 780 – 890	STEREO
20	8 bit				SWIR: 1580 - 1750	

**SPOT
5
(2002)**

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande (nm)	Tipo
2.5 m	8 bit	2 gg	822	60	480 – 710	PUSHBROOM
10 m	8 bit	2 sensori HRG			V: 500 – 590 R: 610 – 680 NIR: 780 – 890	STEREO
20 m	8 bit				SWIR: 1580 - 1750	



LANDSAT (NASA) - Scientifico Sensore TM, Thematic Mapper

**Landsat 5
TM
1984**

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande (µm)	Tipo
30	8 bit	16 gg	705	185	b1: 0.45 – 0.52 b2: 0.52 – 0.60 b3: 0.63 – 0.69 b4: 0.76 – 0.90 b5: 1.55 – 1.75 b7: 2.08 – 2.35	WHISKBROOM Multispettrale
120	8 bit				b6: 10.4 – 12.5	WHISKBROOM Termico

**Landsat 7
TM
1999**

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande (µm)	Tipo
15	8 bit	16 gg	705	183	0.520 - 0.900	WHISKBROOM PANCROMATICO
30	8 bit				b1: 0.45 – 0.515 b2: 0.525 – 0.605 b3: 0.630 – 0.690 b4: 0.750 – 0.900 b5: 1.550 – 1.750 b7: 2.090 – 2.350	WHISKBROOM Multispettrale
60	8 bit				b6: 10.4 – 12.5	WHISKBROOM

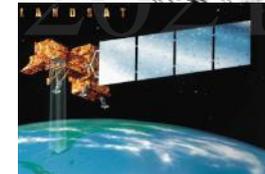


LANDSAT 8 (NASA) - Scientifico

Sensore TM, OLI (Operational Land Imager)

<p>Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)</p> <p>Launched February 11, 2013</p>	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

L8 OLI band	Wavelength [μm]	Sun Irradiance [$\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}^{-1}$]	Atmospheric transmittance
1	0.435 - 0.451	1972.253	0.5
2	0.452 - 0.512	2019.611	0.6
3	0.533 - 0.590	1861.055	0.65
4	0.636 - 0.673	1569.346	0.65
5	0.851 - 0.879	960.362	0.8
6	1.566 - 1.651	238.833	0.89
7	2.107 - 2.294	80.5	0.92



LANDSAT 7 e 8 a confronto

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

TERRA

Sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	bande	Quota (Km)	Swath (Km)	Tipo
250	12 bit	1-2 gg	1-2	705	2330	WHISKBROOM
500	12 bit		3-7			WHISKBROOM
1000	12 bit		8-36			WHISKBROOM

Bande MODIS 1/2

Numero di banda	Risoluzione geometrica (m)	Bande in riflessione (nm)	Bande in emissione (μm)	Applicazioni potenziali
1	250	620-670		Absolute Land Cover Transformation, Vegetation Chlorophyll
2	250	841-876		Cloud Amount, Vegetation Land Cover Transformation
3	500	459-479		Soil/Vegetation Differences
4	500	545-565		Green Vegetation
5	500	1230-1250		Leaf/Canopy Differences
6	500	1628-1652		Snow/Cloud Differences
7	500	2105-2155		Cloud Properties, Land Properties
8	1000	405-420		Chlorophyll
9	1000	438-448		Chlorophyll
10	1000	483-493		Chlorophyll
11	1000	526-536		Chlorophyll
12	1000	546-556		Sediments
13h	1000	662-672		Atmosphere, Sediments
13l	1000	662-672		Atmosphere, Sediments
14h	1000	673-683		Chlorophyll Fluorescence
14l	1000	673-683		Chlorophyll Fluorescence
15	1000	743-753		Aerosol Properties
16	1000	862-877		Aerosol Properties, Atmospheric Properties
17	1000	890-920		Atmospheric Properties, Cloud Properties
18	1000	931-941		Atmospheric Properties, Cloud Properties

Bande MODIS 2/2

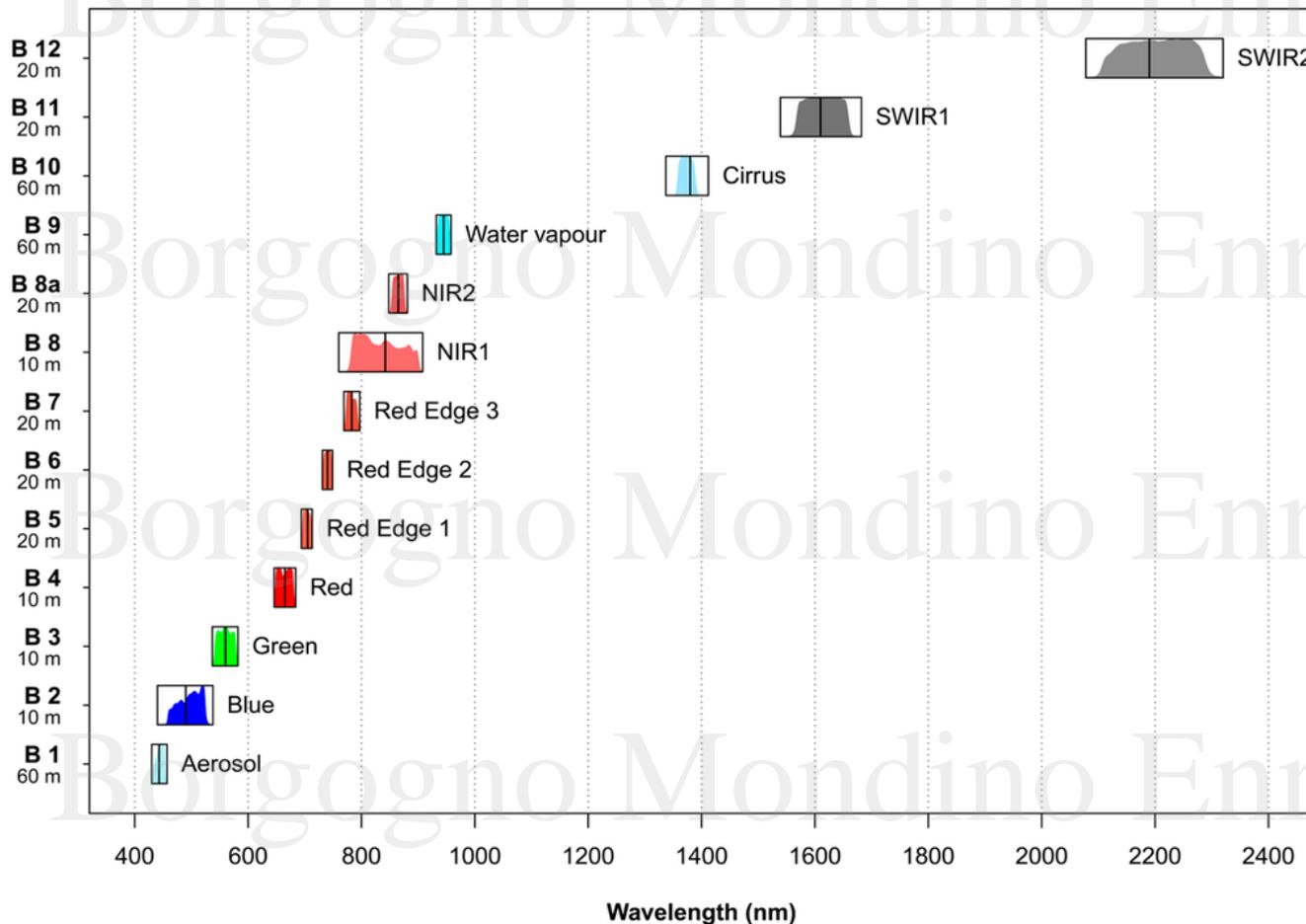
Numero di banda	Risoluzione geometrica (m)	Bande in riflessione (nm)	Bande in emissione (µm)	Applicazioni potenziali
19	1000	915-965		Atmospheric Properties, Cloud Properties
20	1000		3.660-3.840	Sea Surface Temperature
21	1000		3.929-3.989	Forest Fires & Volcanoes
22	1000		3.929-3.989	Cloud Temperature, Surface Temperature
23	1000		4.020-4.080	Cloud Temperature, Surface Temperature
24	1000		4.433-4.498	Cloud Fraction, Troposphere Temperature
25	1000		4.482-4.549	Cloud Fraction, Troposphere Temperature
26	1000	1360-1390		Cloud Fraction (Thin Cirrus), Troposphere Temperature
27	1000		6.535-6.895	Mid Troposphere Humidity
28	1000		7.175-7.475	Upper Troposphere Humidity
29	1000		8.400-8.700	Surface Temperature
30	1000		9.580-9.880	Total Ozone
31	1000		10.780-11.280	Cloud Temperature, Forest Fires & Volcanoes, Surface Temp.
32	1000		11.770-12.270	Cloud Height, Forest Fires & Volcanoes, Surface Temperature
33	1000		13.185-13.485	Cloud Fraction, Cloud Height
34	1000		13.485-13.785	Cloud Fraction, Cloud Height
35	1000		13.785-14.085	Cloud Fraction, Cloud Height
36	1000		14.085-14.385	Cloud Fraction, Cloud Height

SENTINEL 2

Da Autunno 2015



European Space Agency



Ris. geometrica nadirale:

10-20-60 m

Ris. radiometrica:

12 bit

Risoluzione temporale:

Circa 5 gg con due satelliti
(2A e 2B)

Quota: 786 km

Swath: 290 km

Tipo: Pushbroom

SENTINEL 2 (2A e 2B)

Da Autunno 2015



European Space Agency

Bande a 10 m

Band number	S2A		S2B		L_{ref} (reference radiance) ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$)	SNR @ L_{ref}
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)		
2	496.6	98	492.1	98	128	154
3	560.0	45	559	46	128	168
4	664.5	38	665	39	108	142
8	835.1	145	833	133	103	174

Bande a 20 m

Band number	S2A		S2B		L_{ref} (reference radiance) ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$)	SNR @ L_{ref}
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)		
5	703.9	19	703.8	20	74.5	117
6	740.2	18	739.1	18	68	89
7	782.5	28	779.7	28	67	105
8a	864.8	33	864	32	52.5	72
11	1613.7	143	1610.4	141	4	100
12	2202.4	242	2185.7	238	1.5	100

Bande a 60 m

Band number	S2A		S2B		L_{ref} (reference radiance) ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$)	SNR @ L_{ref}
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)		
1	443.9	27	442.3	45	129	129
9	945.0	26	943.2	27	9	114
10	1373.5	75	1376.9	76	6	50

SENTINEL 2 (2A e 2B)

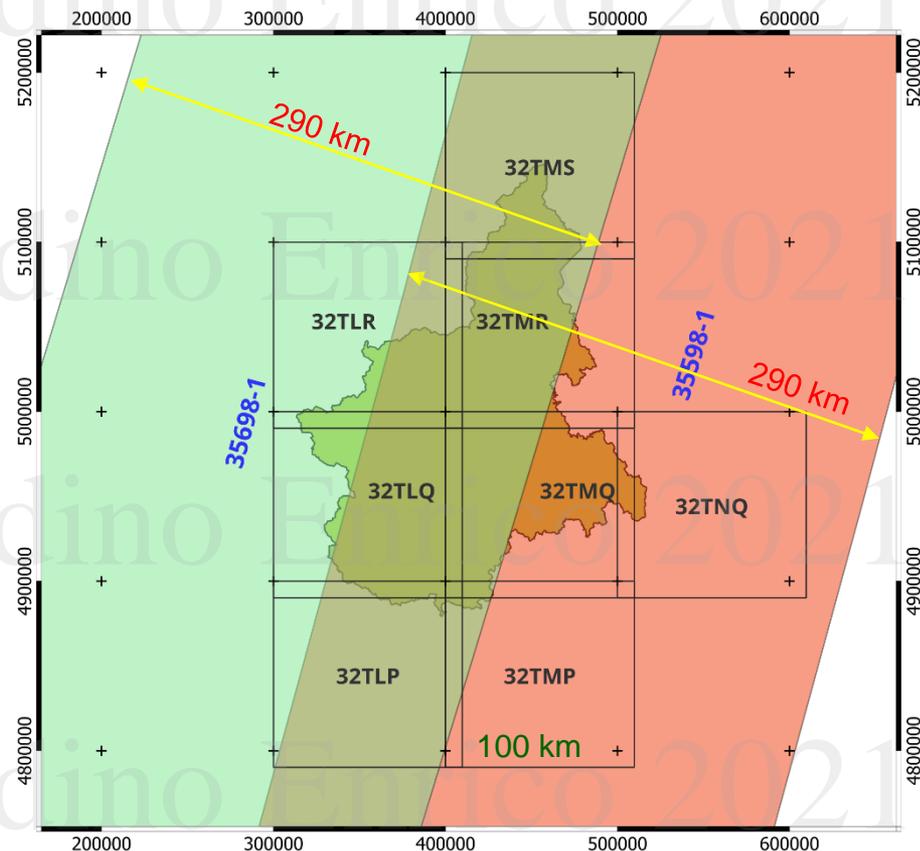
CODIFICA TILE

TRACCE ORBITALI (SWATH = 290 km)

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/copernicus/sentinel-2/acquisition-plans>

TILES (100 km x 100 km)

https://sentinel.esa.int/documents/247904/1955685/S2A_OPER_GIP_TILPAR_MPC_20151209T095117_V20150622T000000_21000101T000000_B00.kml



Bande Sentinel 2:

Bande Landsat 8:

B1: 0.435 – 0.451 μm

B2: 0.452 – 0.512 μm

B3: 0.533 – 0.590 μm

B4: 0.636 – 0.673 μm

B5: 0.851 – 0.879 μm

B6: 1.566 – 1.651 μm

B7: 2.107 – 2.294 μm

B1: 0.429 – 0.457 μm

B2: 0.447 – 0.545 μm

B3: 0.537 – 0.583 μm

B4: 0.645 – 0.683 μm

B5: 0.693 – 0.712 μm

B6: 0.731 – 0.749 μm

B7: 0.768 – 0.796 μm

B8: 0.762 – 0.907 μm

B8a: 0.847 – 0.881 μm

B9: 0.932 – 0.958 μm

B10: 1.336 – 1.411 μm

B11: 1.541 – 1.685 μm

B12: 2.081 – 2.323 μm

Costal/Aerosol

Blue

Green

Red

RE_1

RE_2

RE_3

NIR_Wide

RE_4 (NIR)

Water Vapour

Cirrus

MIR1

MIR2



Possibili applicazioni

Applicazioni	Bande
Vegetazione: produzione di indici correlabili a parametri di campo per il monitoraggio delle caratteristiche biofisiche (vigore vegetativo, contenuto di clorofilla, superficie fogliare, stress idrico, biomassa, ecc...)	GREEN, RED, NIR
Contenuto idrico: stima del contenuto idrico/umidità superficiale	GREEN, MIR
Stima dell'evapotraspirazione reale	TIR, VNIR, MIR
Geologia: caratterizzazione del substrato roccioso	MIR
Incendi: severità degli incendi	NIR, MIR

	Landsat 1-3 MSS	Landsat 4-5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI	Sentinel-2	MODIS	AVHRR	ASTER
Risoluzione geometrica	60 m	30 m – VNIR 120 m – TIR	30 m – VNIR 15 m – PAN 60 m – TIR	30 m – VNIR 15 m – PAN 100 m – TIR	10 m – VNIR 20 m – NIR 60 m – UV/NIR	250 m – RED, NIR 500 m – VNIR/MIR 1000 m – VNIR/TIR	1000 m – VNIR/TIR	15 m – VNIR 30 m – MIR 90 m – TIR
Risoluzione temporale	18 giorni	16 giorni	16 giorni	16 giorni	5 giorni	1 giorno	1 giorno	16 giorni
Risoluzione spettrale	4 bande – VNIR	6 bande – VNIR 1 banda – TIR	7 bande – VNIR 1 banda – PAN 1 banda – TIR	8 bande – VNIR 1 banda – PAN 2 bande – TIR	4 bande – VNIR 6 bande – NIR 3 bande – UV/NIR	36 bande – VNIR/MIR/TIR	4 – 6 bande	4 bande – VNIR 6 SWIR – MIR 5 bande – TIR
Regione dello spettro indagata	0.50-1.10 μm	0.44- 2.35 μm 10.40- 12.50 μm	0.44- 2.35 μm 10.31- 12.36 μm	0.44- 2.29 μm 10.60-12.51 μm	0.43-2.28 μm	0.44- 2.16 μm 3.66- 14.39 μm	0.58- 1.64 μm 3.55- 3.93 μm 10.30- 12.50 μm	0.52- 2.43 μm 8.13- 11.65 μm
Periodo di acquisizione	1972 – 1992	1982 – 2012	1999 – 2003	2013 – oggi	2015 – oggi	2000 – oggi	1979 – 1996	2000 – oggi
Scala cartografica Equivalente*	1:250000	1:150.000 1:500000	1:150.000	1:150.000 1:500000	1:50000 1:100000	1:1250000 1:2500000 1:5.000.000	1:5.000.000	1:75000 1:100000 1:500000

*la scala cartografica equivalente viene calcolata sulla base della risoluzione geometrica assumendola pari alla precisione della carta (0.2 mm) a meno del fattore di scala