



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**CENTRO  
PROTEZIONE  
CIVILE**



REGIONE DEL VENETO

# L'interferometria *radar* satellitare: aspetti teorici e principi generali

Matteo DEL SOLDATO

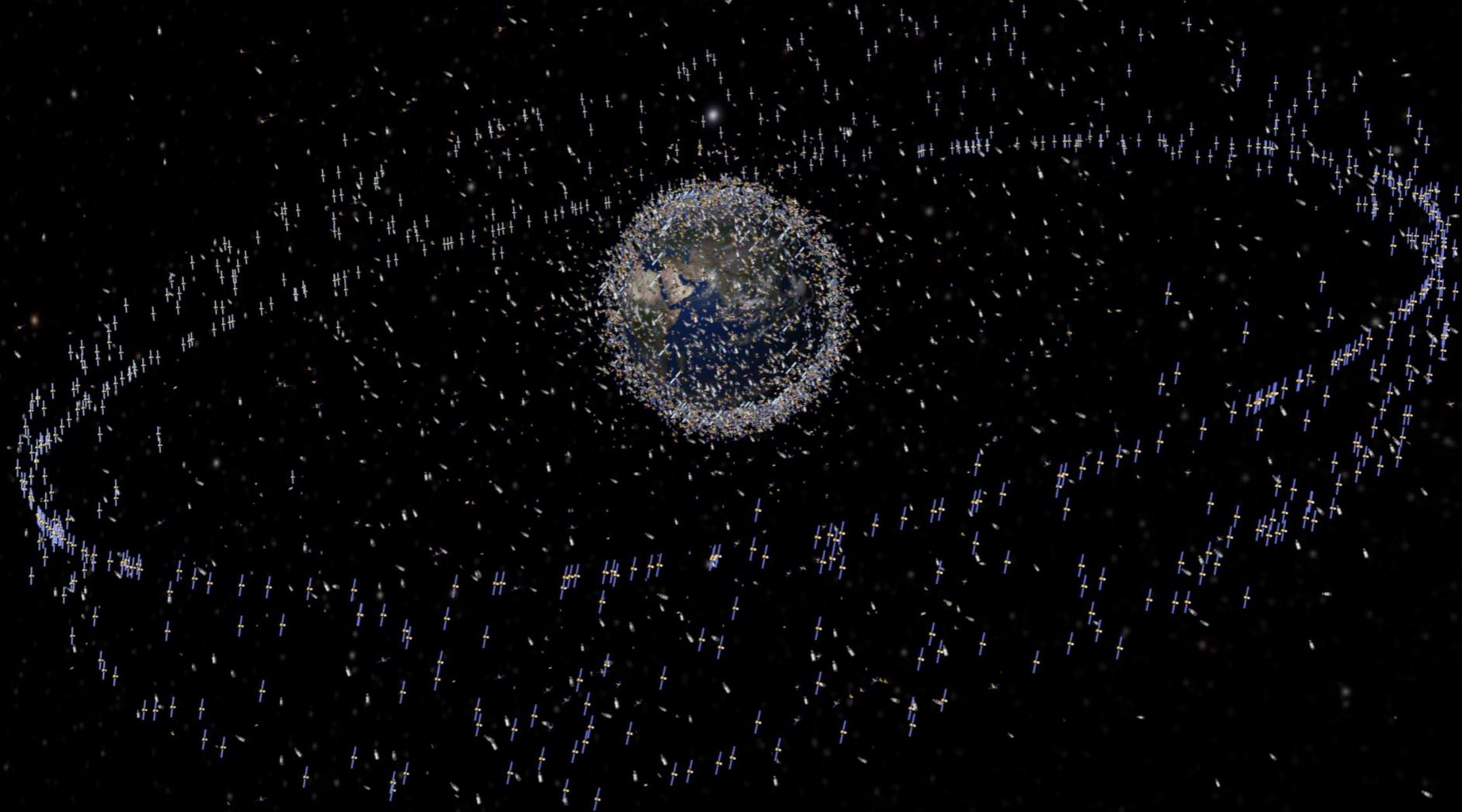
# Contenuti

- Il segnale *radar*
- I sistemi *radar* satellitari
- Immagini *radar*: caratteristiche & problematiche
- Analisi a singolo interferogramma (DInSAR)
- Analisi multi-interferogramma (PSInSAR & SqueeSAR)

Ottobre 1957: lancio del primo satellite, Sputnik 1

Dal 1957 sono stati lanciati da vari paesi e compagnie private, circa 14000 satelliti (al 2015)

Di questi, il 78% non è più in funzione.



La maggior parte dei satelliti operativi intorno alla Terra sono in una fascia che è tra i 160 ed i 2000 km di altezza rispetto alla superficie della Terra.



I satelliti orbitanti possono avere diverse funzioni, da quelle di servizio, quali satelliti per le telecomunicazioni, a quelle di servizio civile e militare

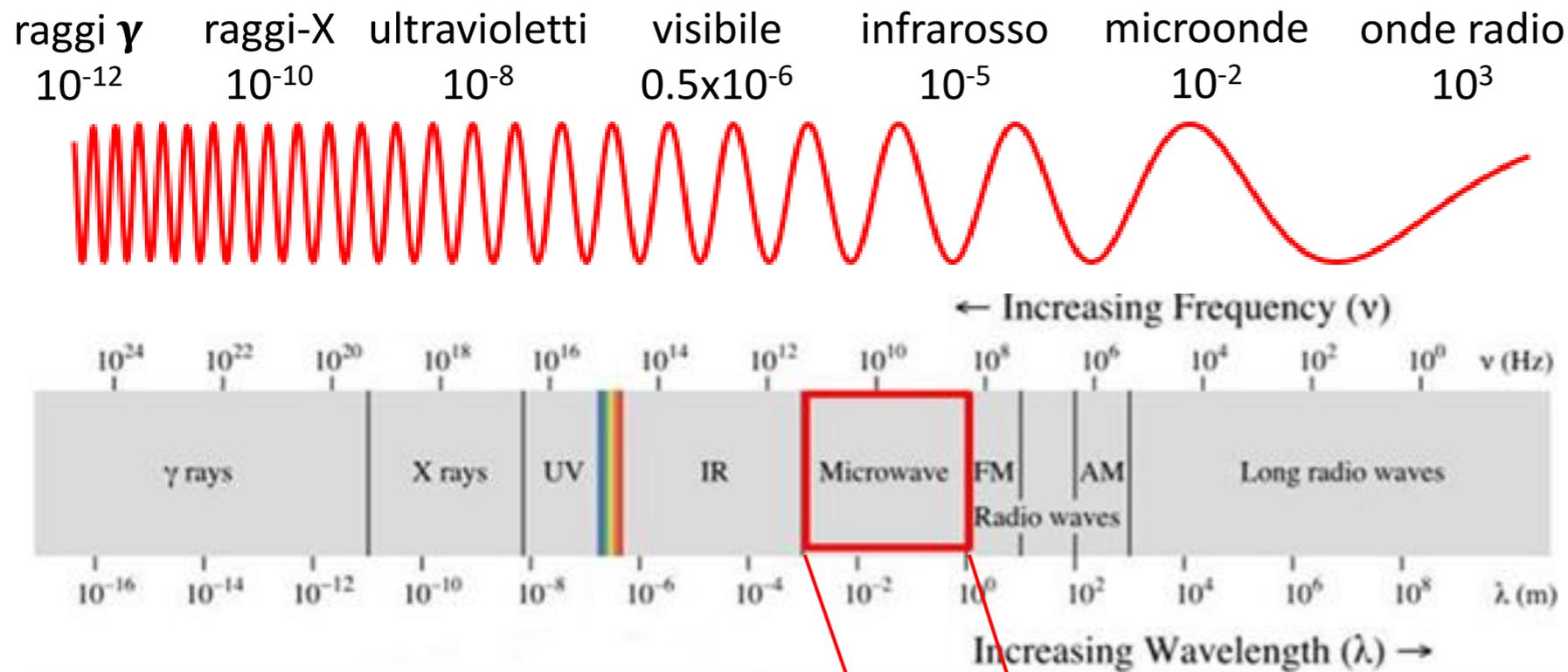
Il segnale *radar*

# Perché telerilevamento *radar*?



- E' un sensore attivo: non necessita di una sorgente di illuminazione esterna come il Sole
- Può acquisire sia durante il giorno che la notte
- Può acquisire in ogni condizione meteorologica (sereno, nuvoloso, ecc.)
- Lavora nelle frequenze d'onda delle microonde che permettono di passare attraverso nuvole, pioggia e nebbia, per ottenere informazioni del terreno
- Illumina sempre in una direzione (destra) e può avere geometria fissa o variabile
- E' un sistema coerente che permette misurazioni molto precise di distanza e sue variazioni attraverso la tecnica interferometrica

# Spettro elettromagnetico

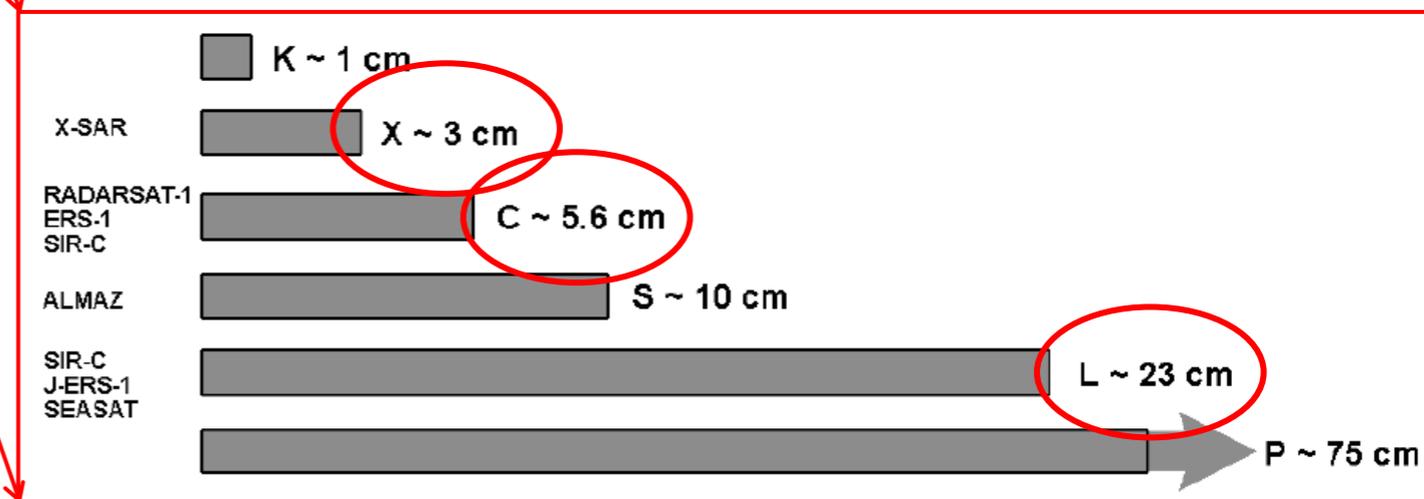


Lo spettro elettromagnetico indica l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche.

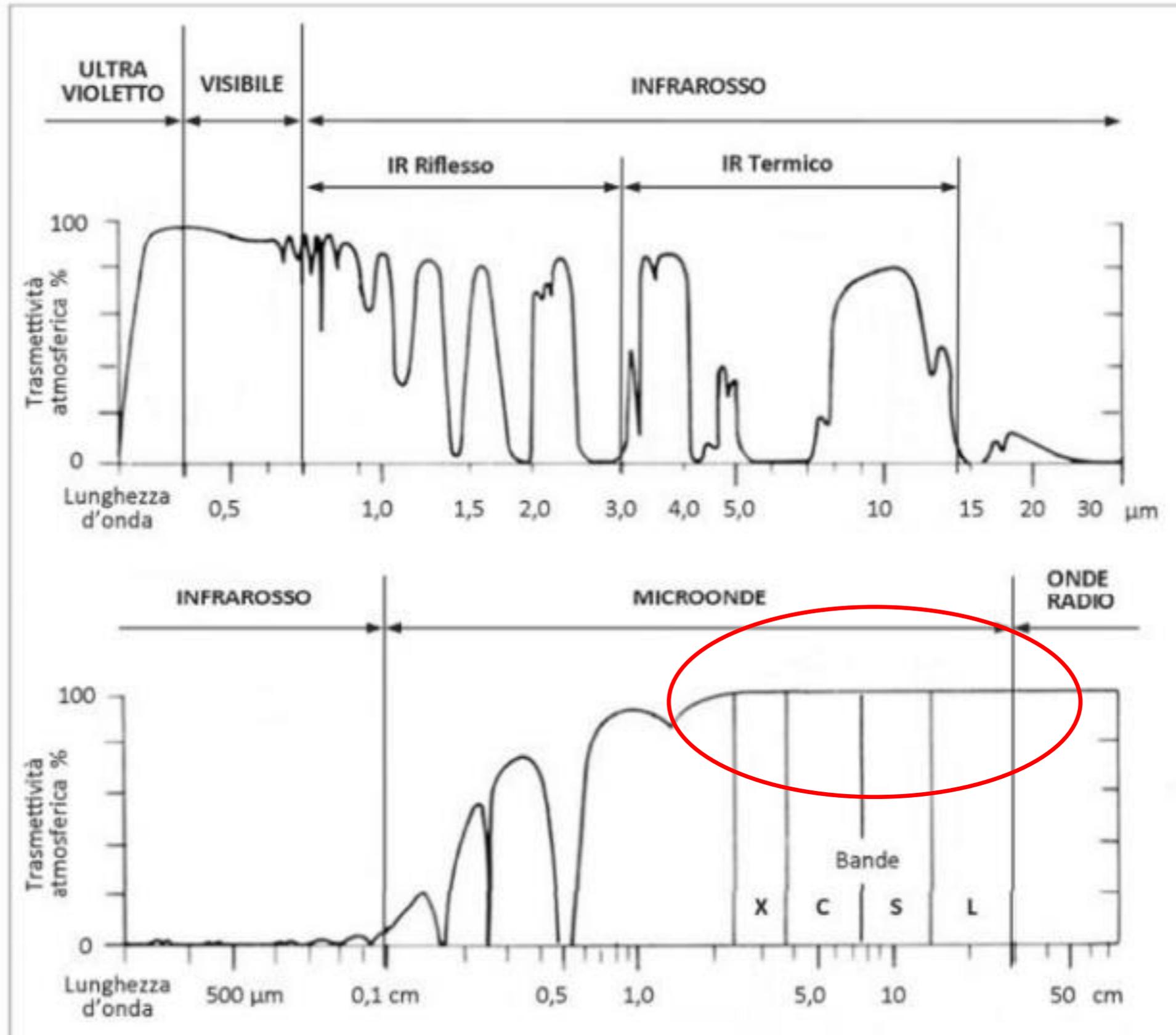
Pur essendo lo spettro continuo, è possibile una suddivisione in vari intervalli o bande di frequenza.

Le microonde comunemente utilizzate sono comprese tra 1 m, che corrisponde alla frequenza di circa 0.1 GHz ( $10^8$  Hz), e 1 mm, che corrisponde a circa 300 GHz.

I satelliti acquisiscono il segnale a diverse lunghezze d'onda secondo le loro caratteristiche spettrali e spaziali.



# Trasmittività atmosferica

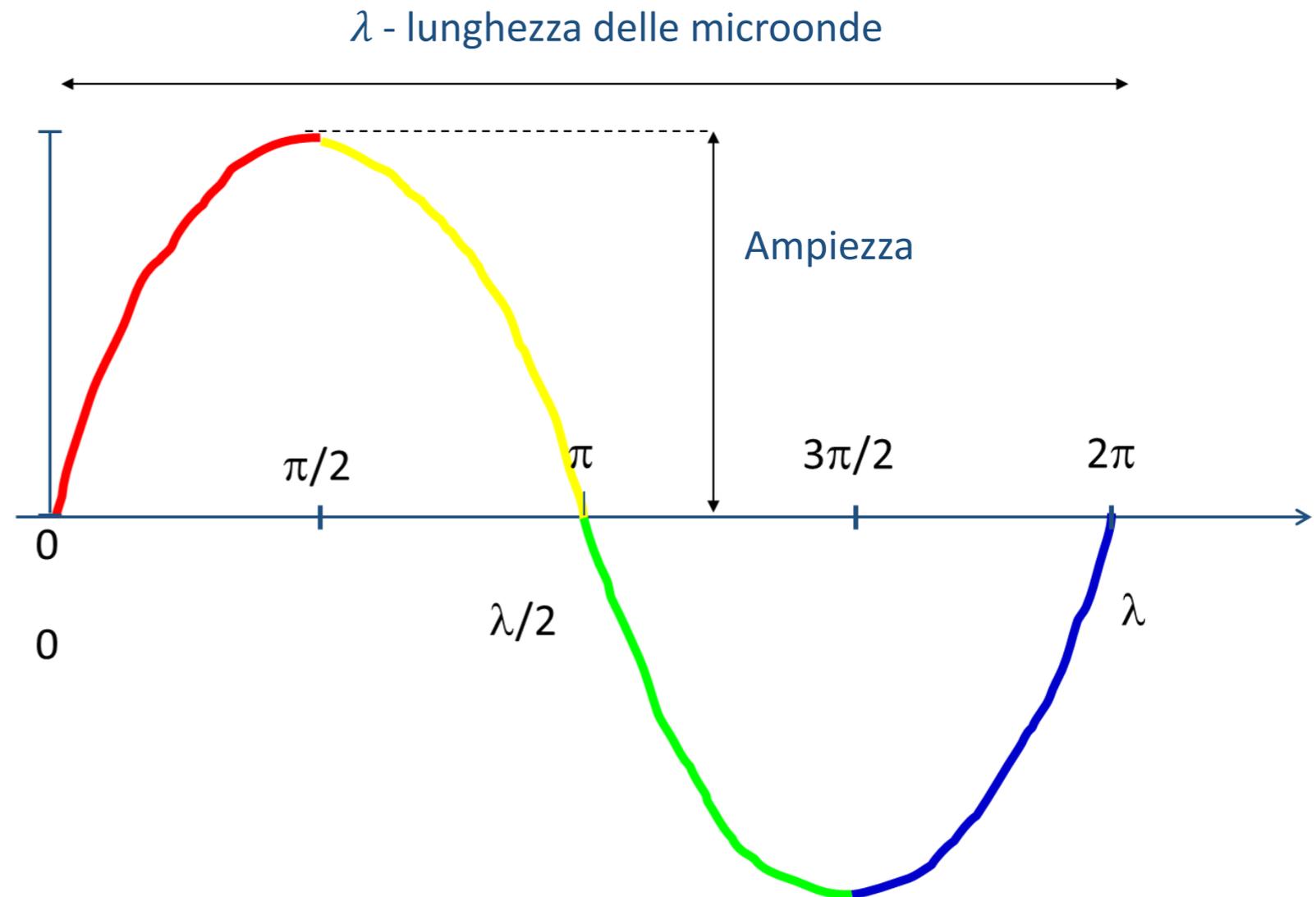


# L'onda elettromagnetica

L'onda elettromagnetica rappresenta la variazione spaziale e temporale di un campo elettrico e magnetico nello spazio.

Per caratterizzarla si usano l'**ampiezza** e la **lunghezza d'onda**.

- **Ampiezza:** è la misura della variazione periodica
- **Lunghezza d'onda** o frequenza (fase): la distanza oltre la quale la forma dell'onda si ripete.



# Concetto *radar*: approccio intuitivo

Se da una barca vicino ad una scogliera gridiamo, la scogliera rifletterà l'onda del suono. Dopo un certo tempo, sarà sentito un'eco (non) esattamente identico al suono emesso. La differenza tra il suono emesso e ricevuto sarà dipendente dal materiale riflettente.



# Sistema radar

Il radar (*RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*ING*) è una tecnica basata sulle microonde che permette di determinare la posizione di elementi fissi e la velocità di spostamento di oggetti in movimento con una precisione elevata.

**LOS, Line Of Sight** - linea di vista del satellite

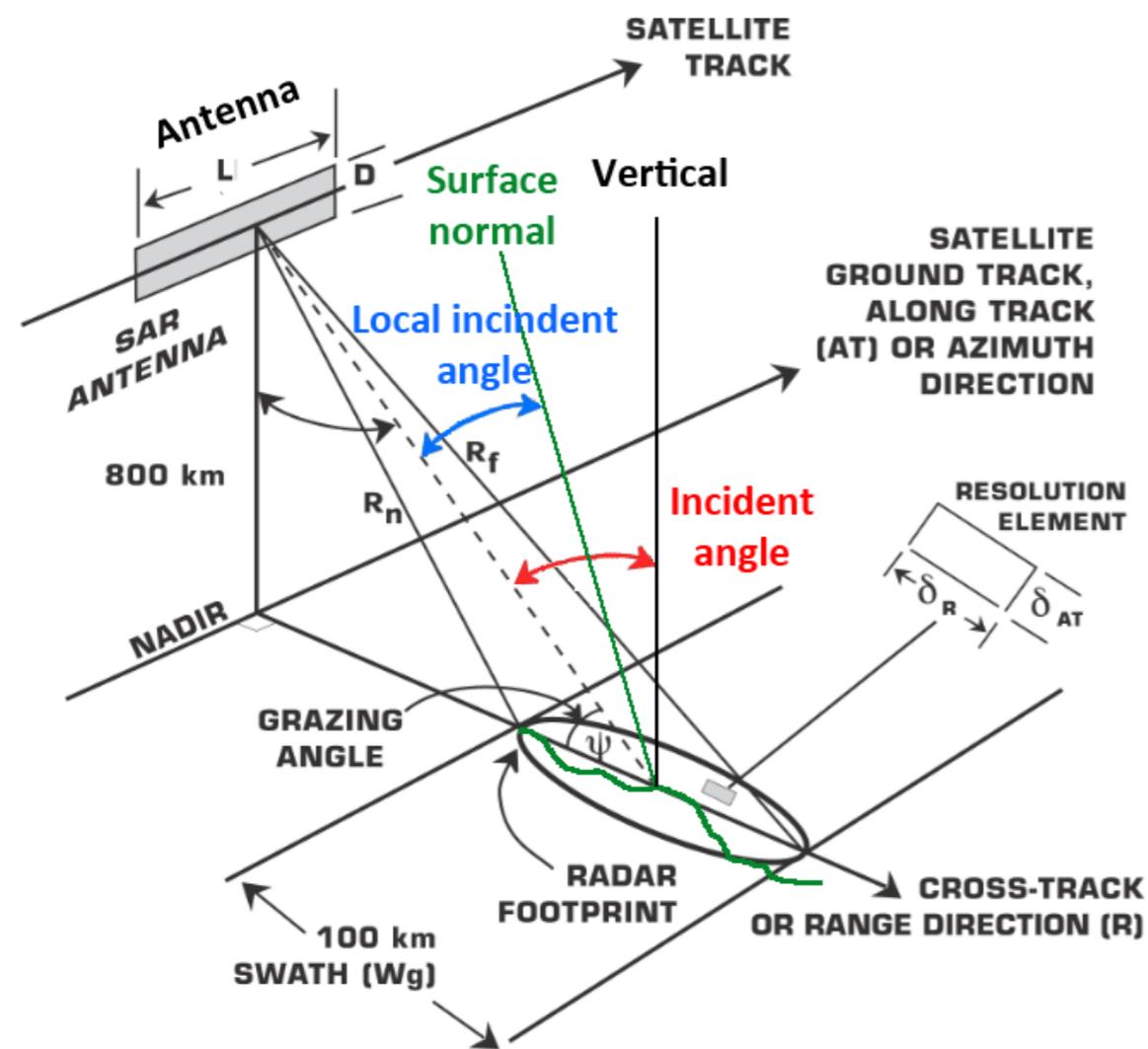
**SWATH** - area sulla superficie terrestre illuminata dal fascio di microonde (lungo la LOS)

**Azimuth** (along-track) è la direzione della traiettoria del satellite

**Range** (across-track) è la direzione perpendicolare alla direzione di Azimuth

**Incident angle** è l'angolo tra l'onda *radar* e la verticale

**Local incident angle** è l'angolo tra l'onda *radar* e la normale rispetto alla superficie terrestre illuminata

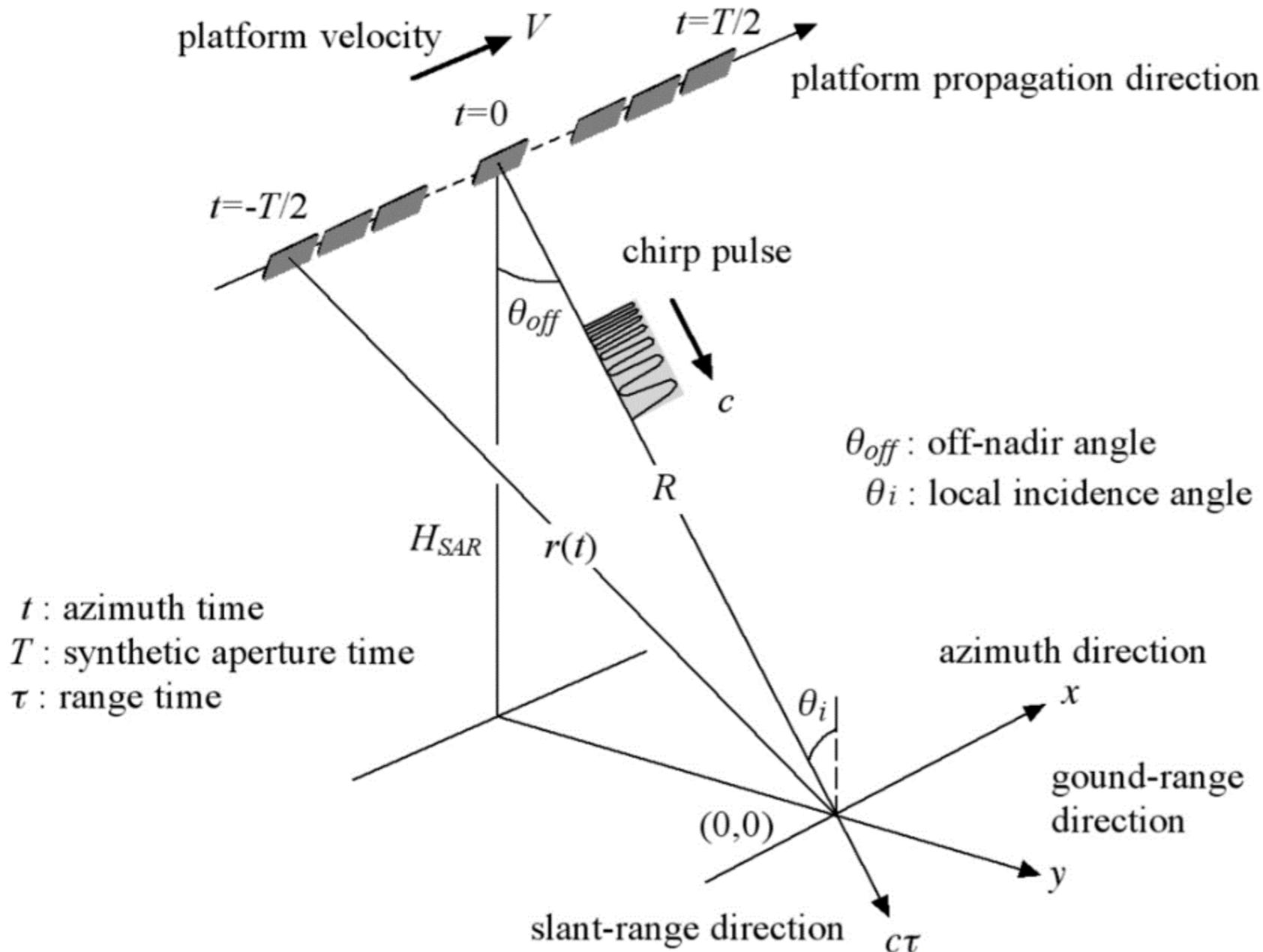


Il ricevitore è in grado di valutare l'intensità e la quantità fisica (ampiezza) del segnale riflesso (*backscattered*) dall'oggetto (*target*).

# Synthetic Aperture Radar (SAR)

*Synthetic Aperture Radar (SAR) - Radar ad Apertura Sintetica*

Le immagini coprono aree molto vaste, quindi i sensori per catturarle avrebbero bisogno di un'antenna chilometrica, per questo viene **sintetizzata una grande antenna**.



$H_{SAR}$  : altitudine della piattaforma SAR

$c$  : impulso dell'onda

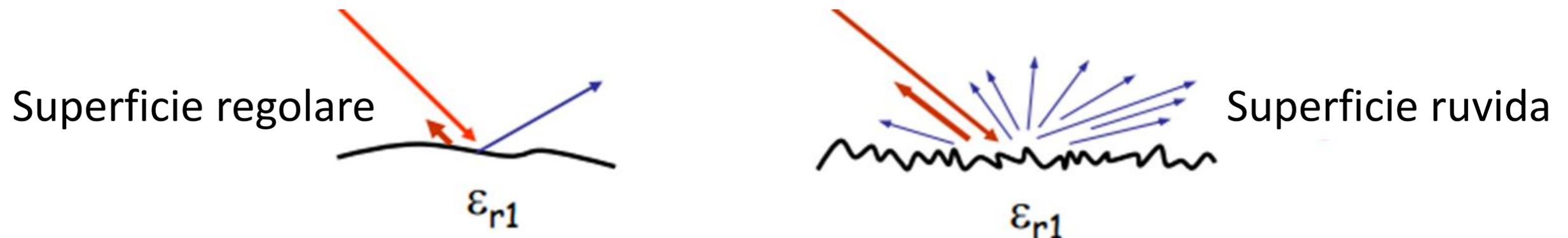
$r(t)$  : distanza *slant-range* al tempo  $t$

$R$  : distanza *slant-range* rispetto all'azimuth quando l'antenna è nel punto più vicino al target, origine del segnale riflesso alle coordinate X e Y.

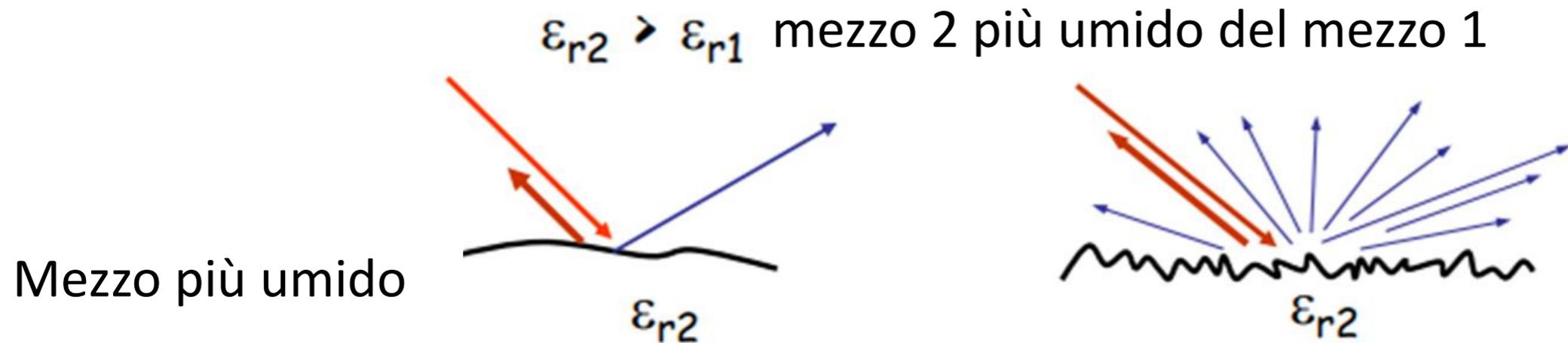
Vaste aree vengono "illuminate" con acquisizioni in continuo sommando i segnali di ritorno degli stessi elementi *target*.

# Riflessione del segnale *radar*

- Il *radar* invia onde elettromagnetiche in forma di impulso e registra l'eco riflesso (*backscattered*) da oggetti sulla superficie su cui l'onda va a scontrarsi
- L'eco è modificato rispetto all'impulso inviato, in base al tipo di oggetto riflettente.



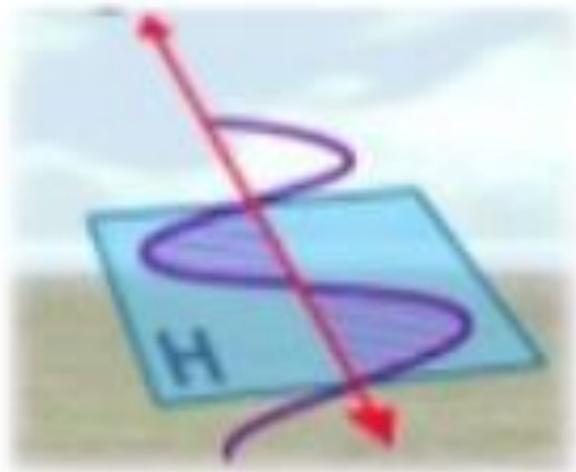
La ruvidità della superficie rispetto alla lunghezza d'onda governa il *pattern* di riflessione



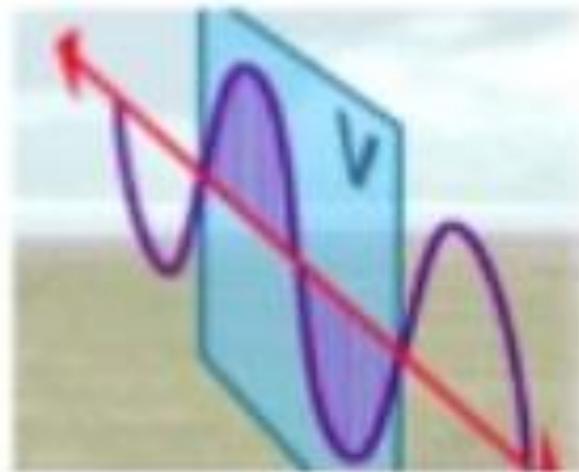
La costante dielettrica (dipendente dal contenuto di umidità) del mezzo governa la potenza del segnale riflesso

# Polarizzazione

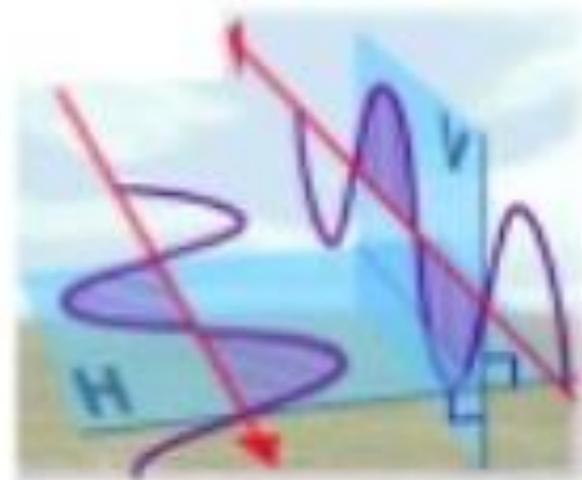
- I sensori SAR registrano segnali in differenti polarizzazioni (HH, VV, HV/VH) potendo controllare la polarizzazione dell'onda sia in fase di trasmissione che di ricezione
- La polarizzazione si riferisce all'orientazione nel piano nella quale l'onda elettromagnetica trasmessa oscilla
- Esaminando la forza del segnale derivante da polarizzazioni differenti trasporta informazioni sulle strutture della superficie in base ai diversi tipi di diffusione



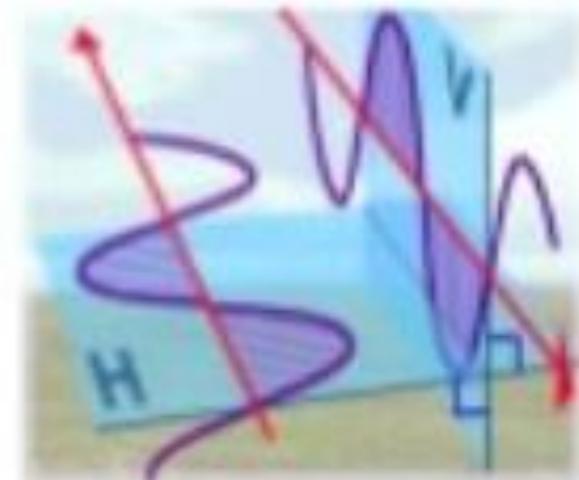
HH



VV



HV



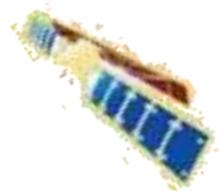
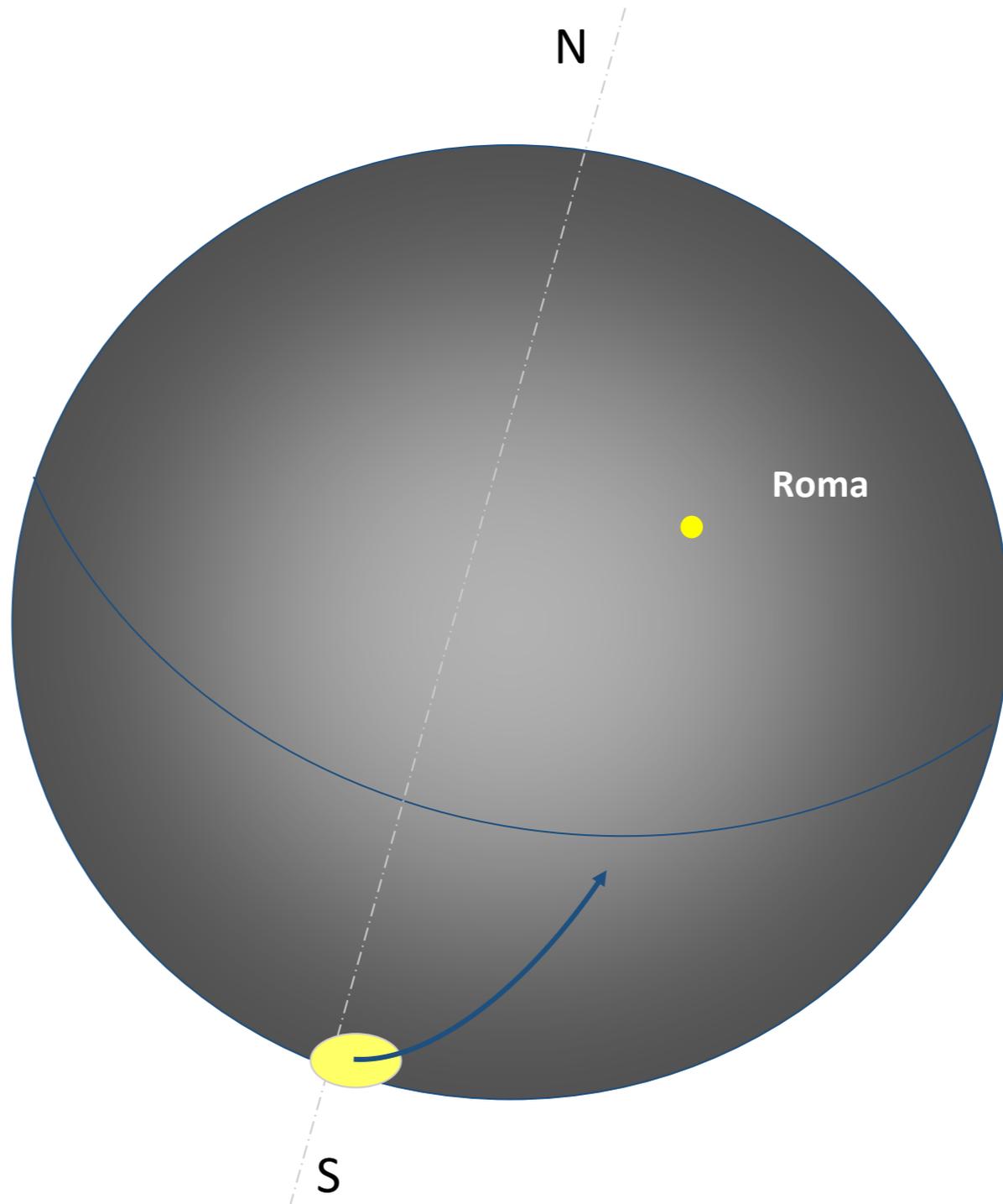
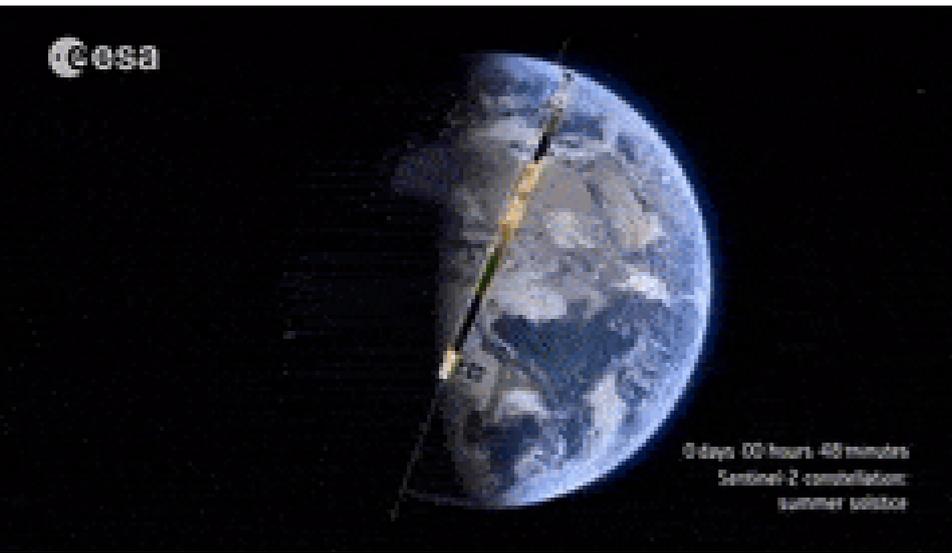
VH

# I sistemi *radar* satellitari

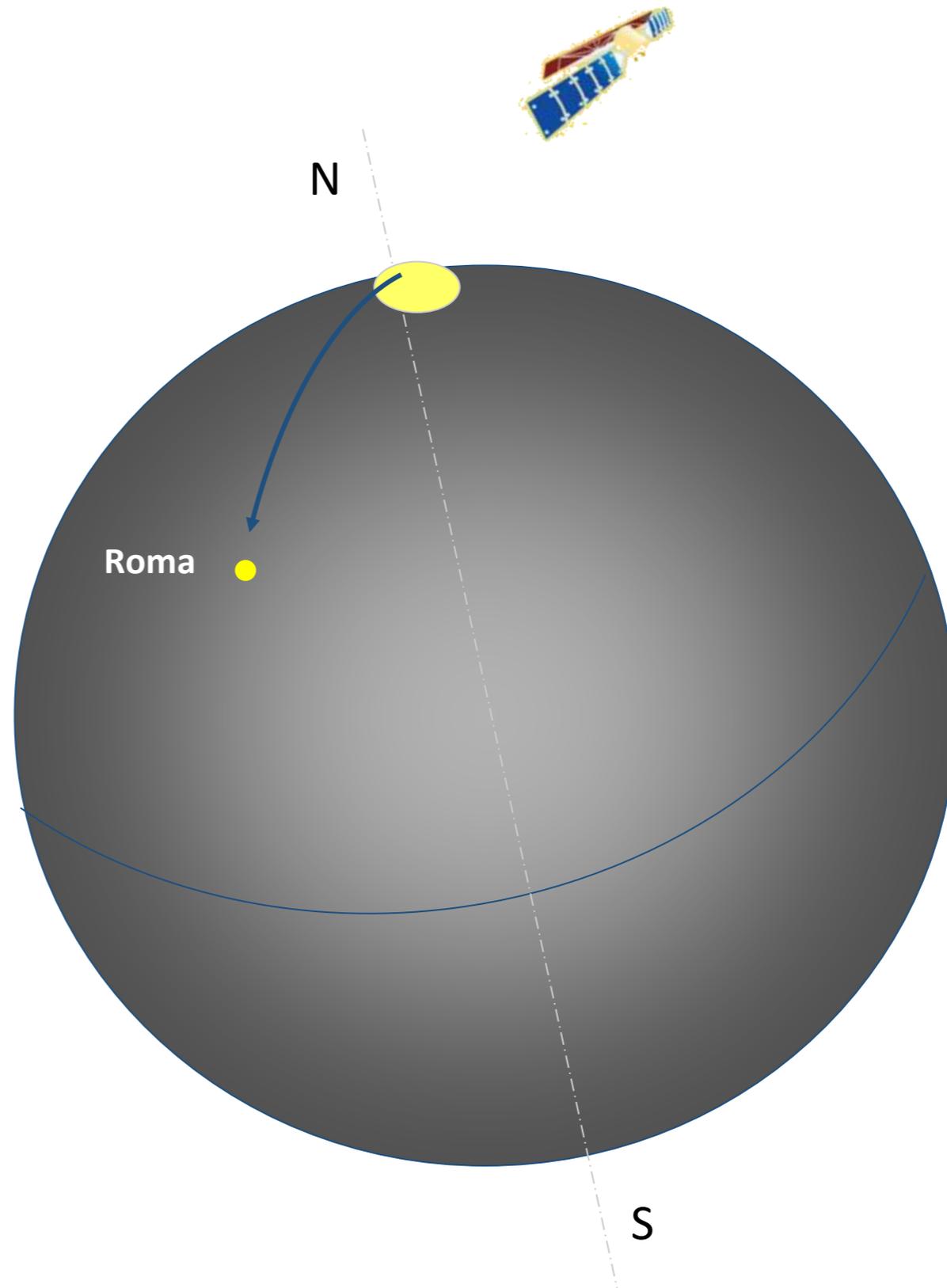
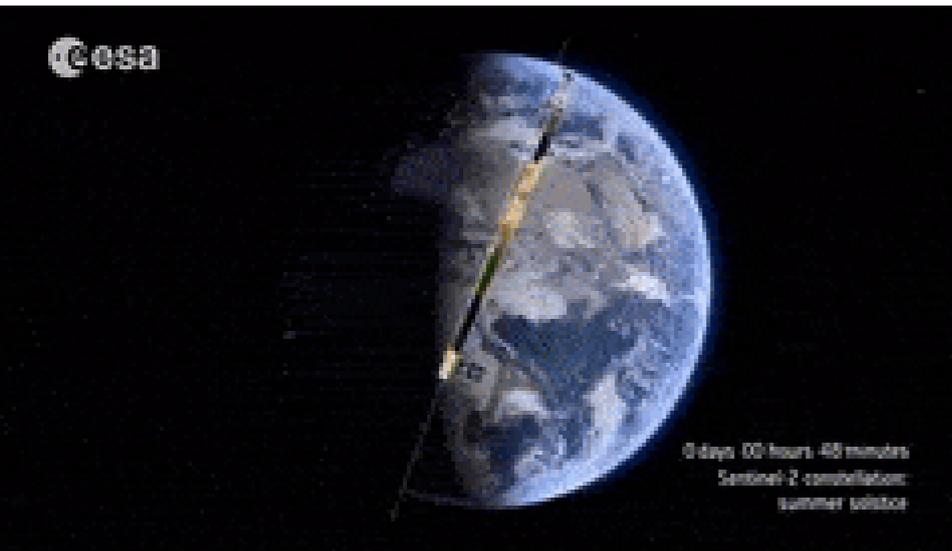
# ESA SAR products for Interferometry

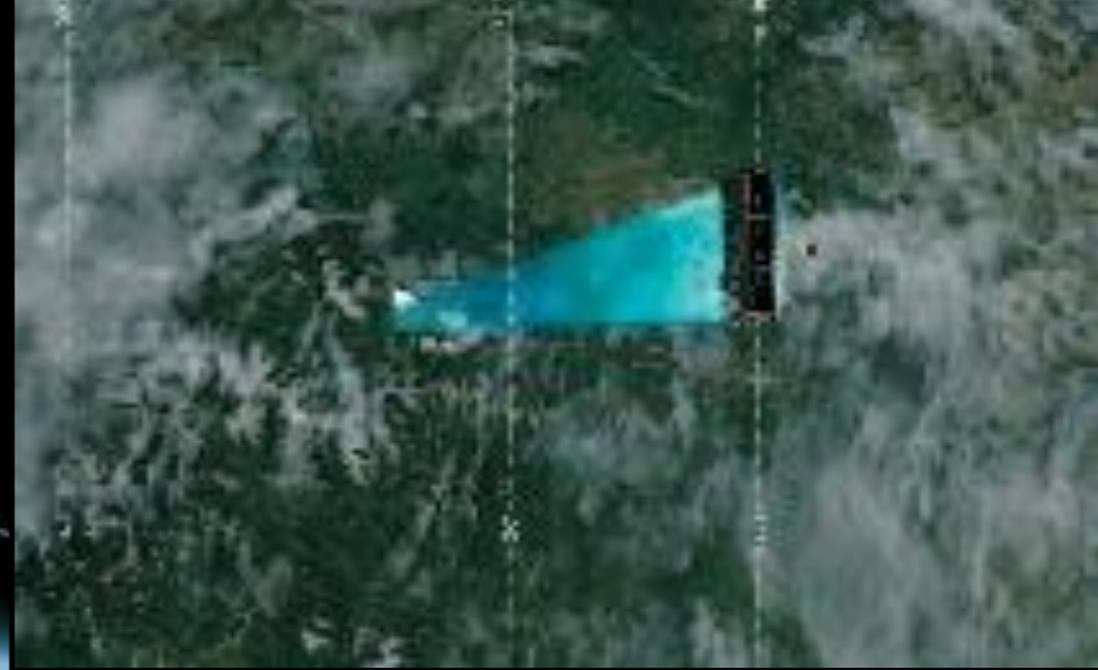
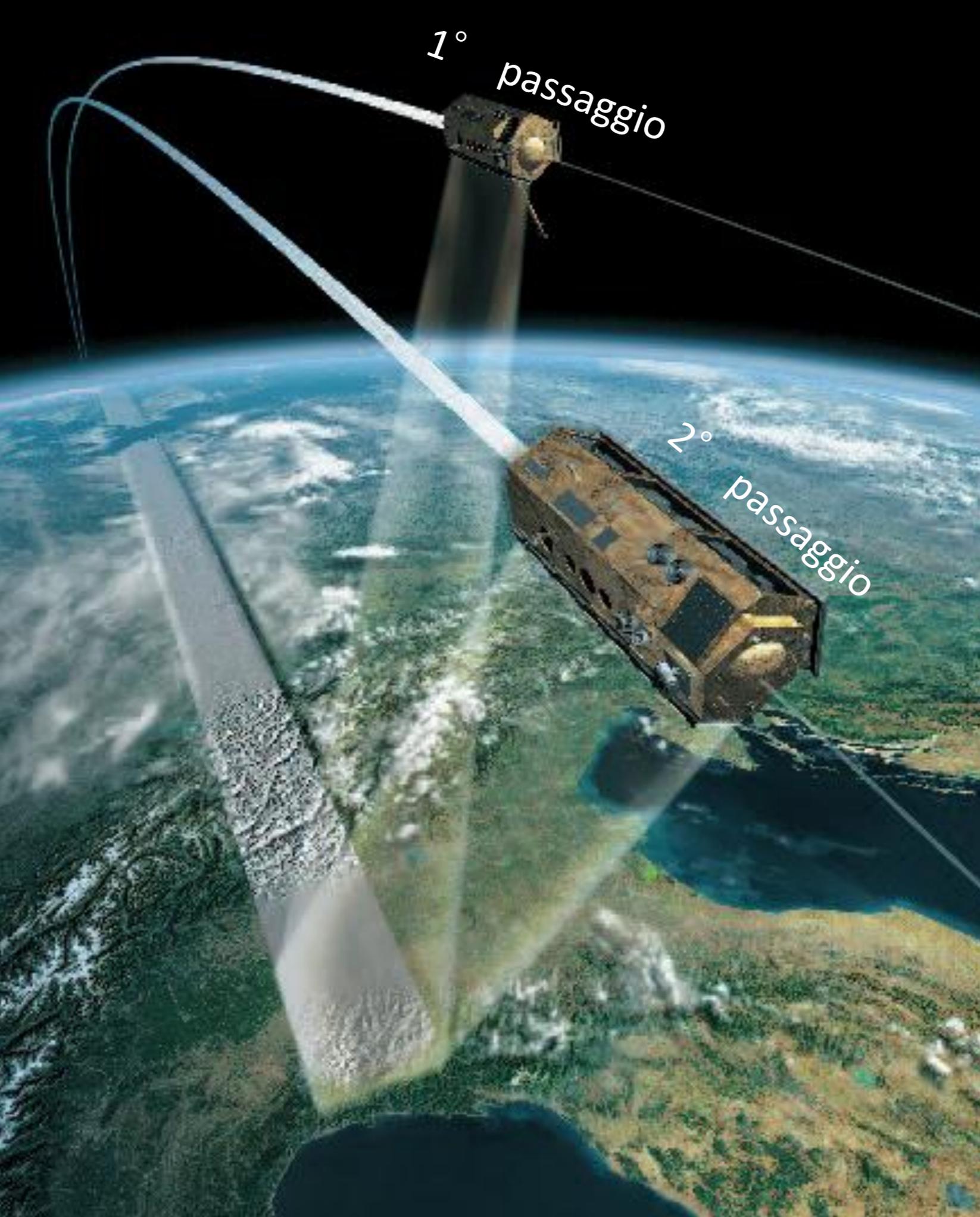


# Orbita ascendente



# Orbita discendente



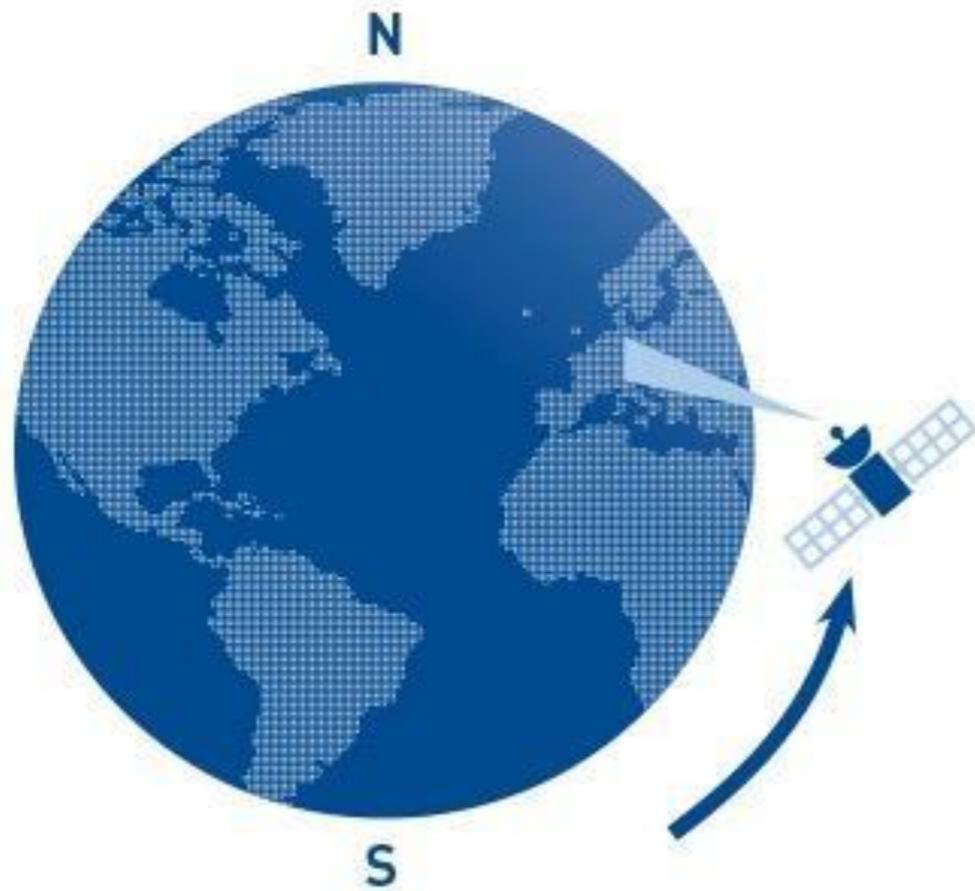


# Cattura immagini satellitari



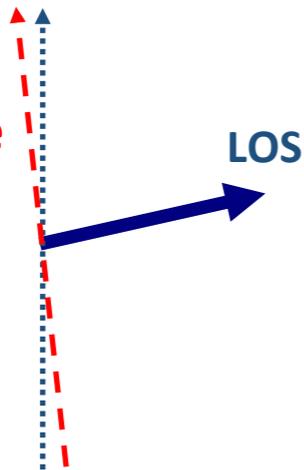
# Line of Sight (LOS)

ASCENDING



Direzione  
del satellite

LOS



Geometria ASCENDENTE

DESCENDING



LOS

Direzione  
del satellite



Geometria DISCENDENTE



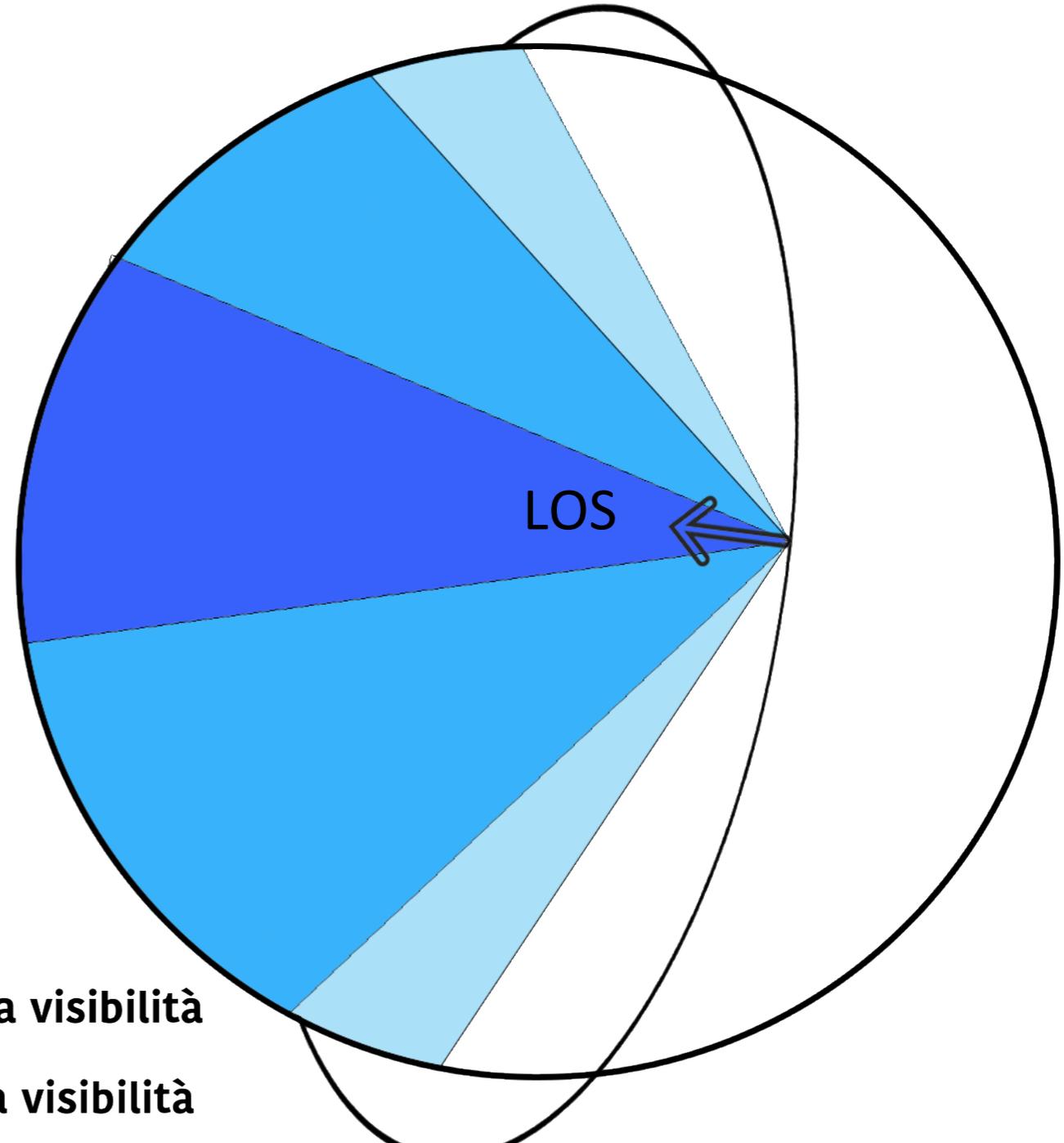
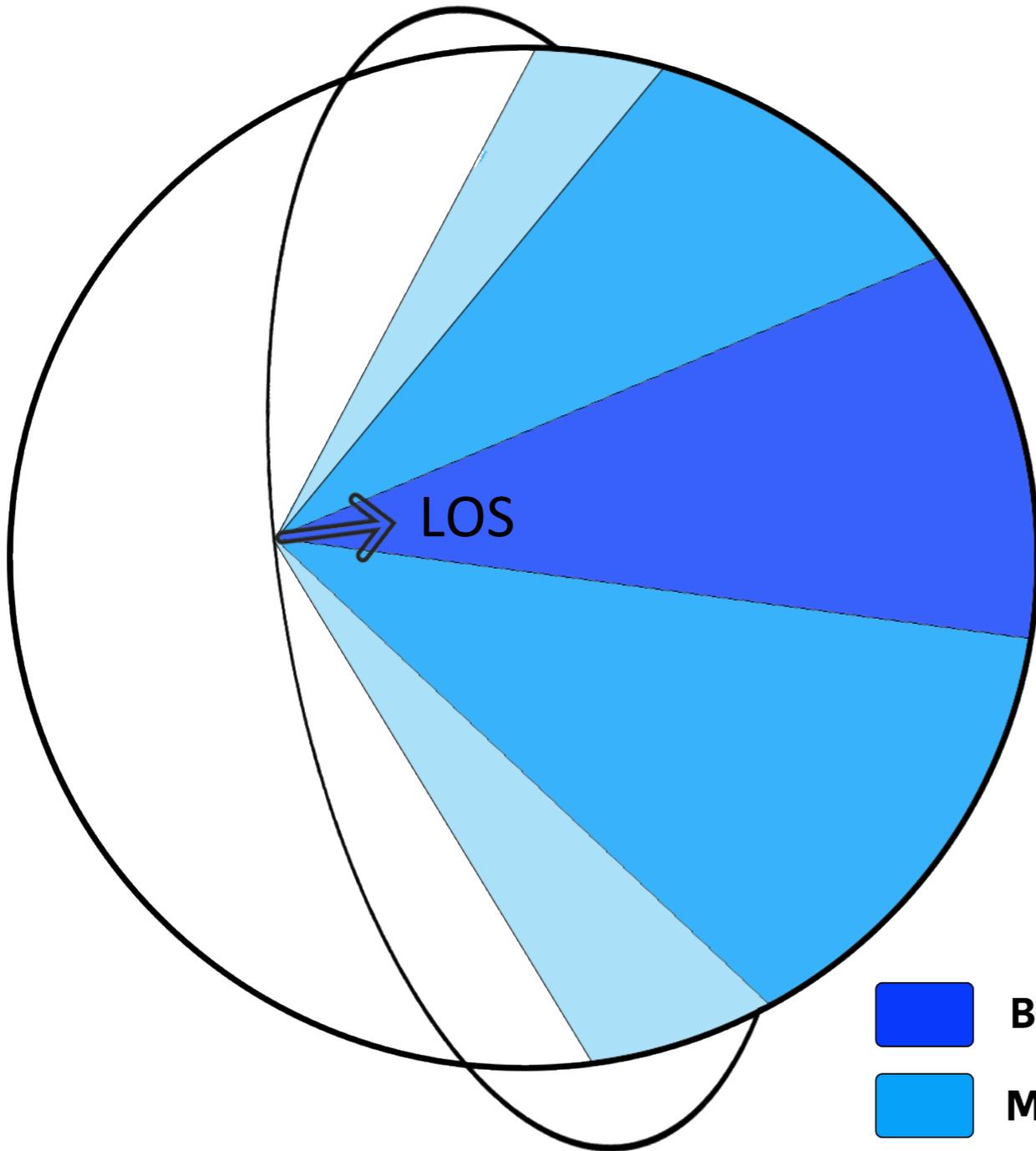
# Visibilità dei satelliti

Geometria ASCENDENTE

Geometria DISCENDENTE

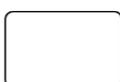
Nord

Nord



Sud

Sud

-  Buona visibilità
-  Media visibilità
-  Bassa visibilità
-  No visibilità

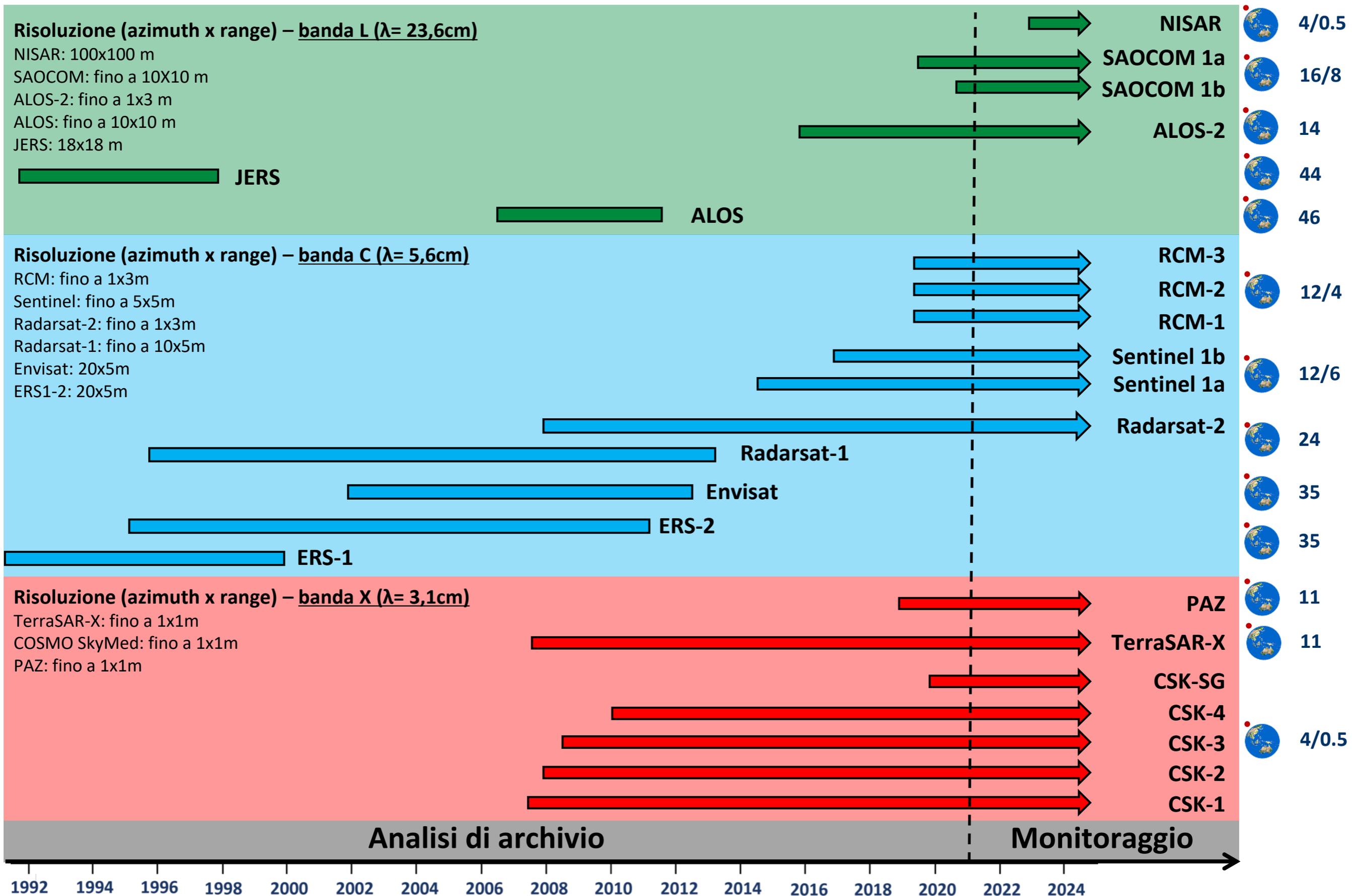
# Segnale radar

I satelliti possono acquisire informazioni in diverse lunghezze d'onda in base al tipo di sensore montato sul satellite, alle sue caratteristiche spettrale e spaziali.

Band	Wavelength ( $\lambda$ , cm)	Frequency (f, MHz)	Satellites
Ka	0.75 - 1.1	40,000 - 26,500	Telecomunication satellites (Hot Bird constellation)
K	1.1 - 1.67	26,500 - 18,000	
Ku	1.67 - 2.4	18,000 - 12,500	
X	2.4 - 3.75 CF 3.1	12,500 - 8,000	<i>COSMO-SkyMed</i> <i>TerraSAR-X</i> <i>PAZ</i>
C	3.75 - 7.5 CF 5.6	8,000 - 4,000	<i>Sentinel-1 (A and B)</i> <i>Radarsat (1 and 2)</i> <i>ENVISAT</i> <i>ERS1/2</i>
S	7.5 - 15.0	4,000 - 2,000	Meteorological and comunication satellites ( <i>Chibolton weather satellite</i> <i>Sirius Satellite Radio</i> <i>XM Satellite Radio</i> )
L	15.0 - 30.0 CF 23.0	2,000 - 1,000	<i>JERS</i> <i>ALOS (1 And 2)</i>
P	30.0 - 100.0	1,000 - 300	

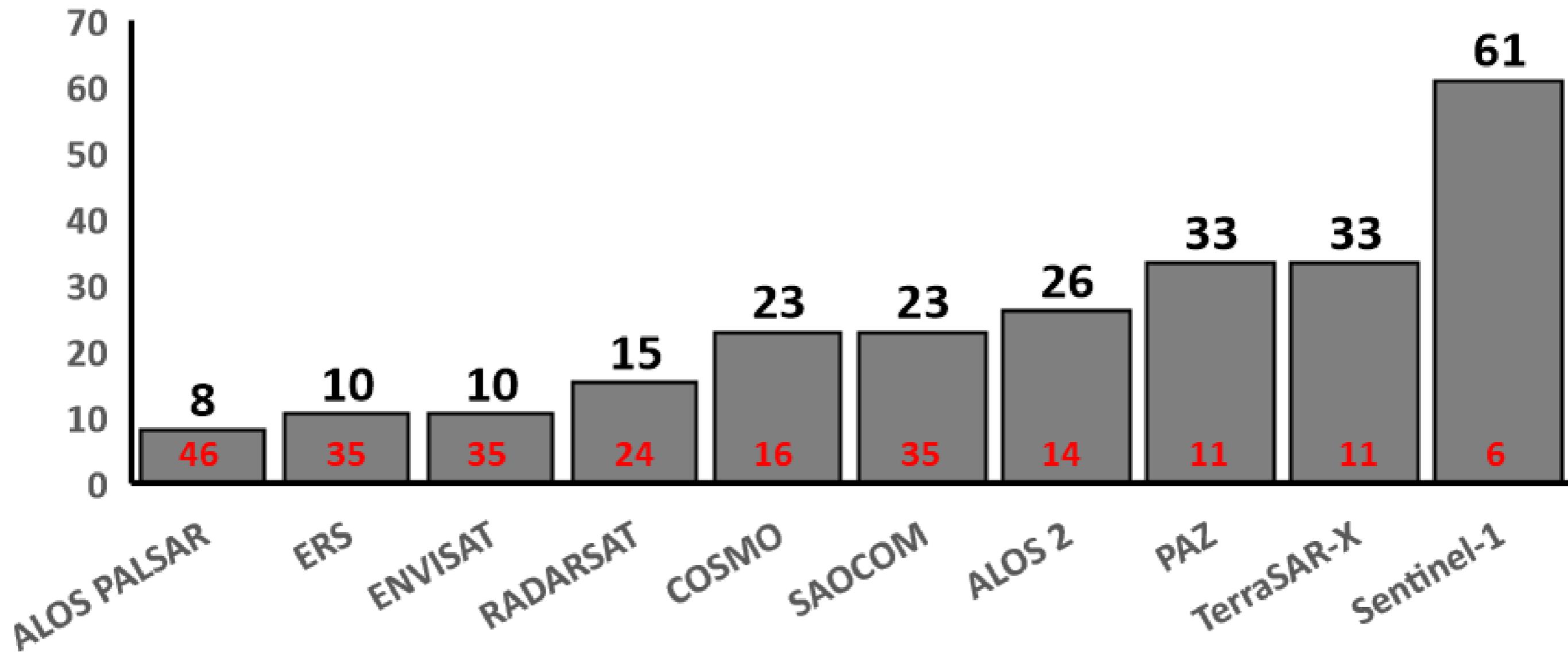


# Sensori SAR

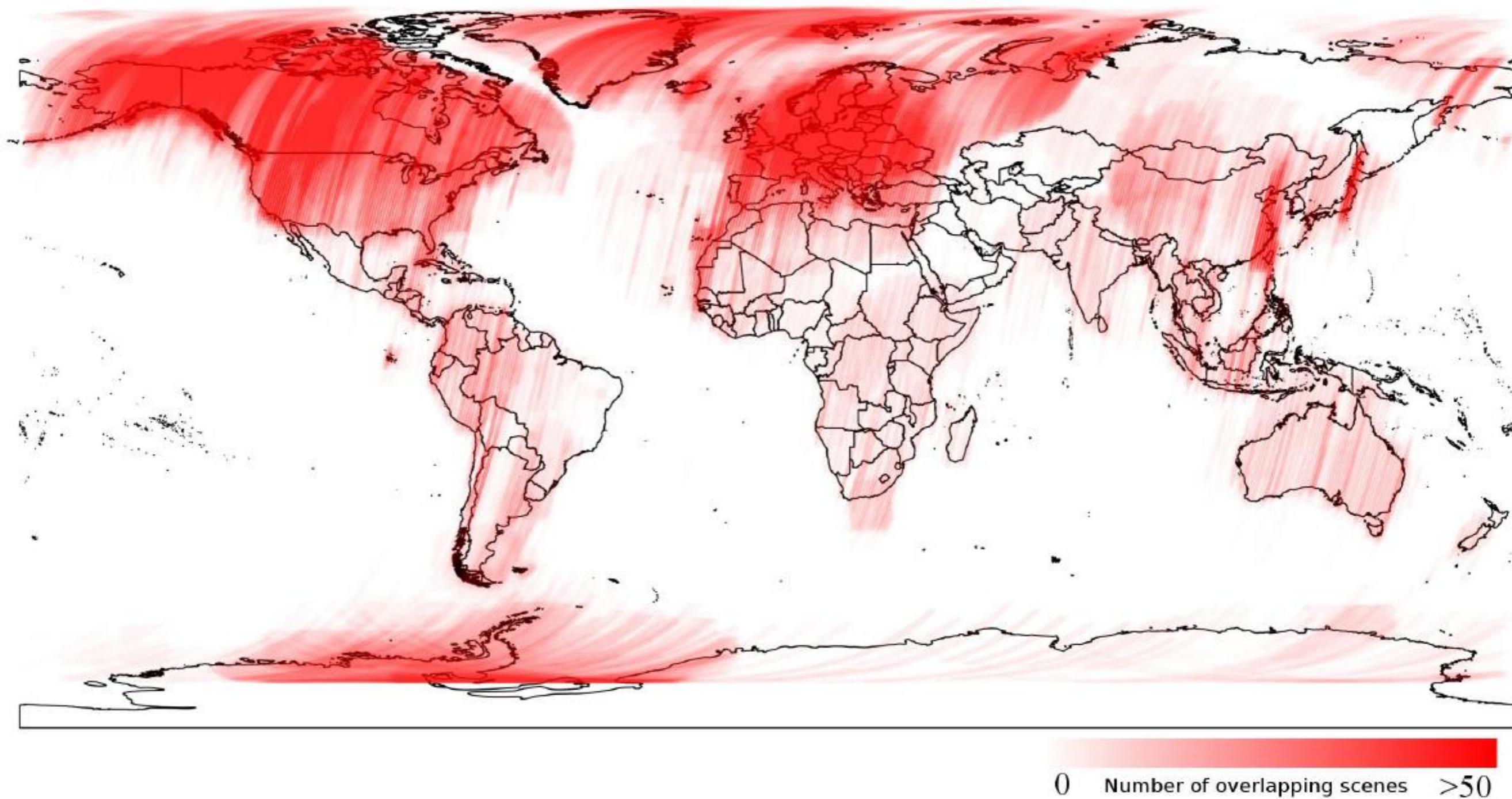


# Numero di acquisizioni in un anno

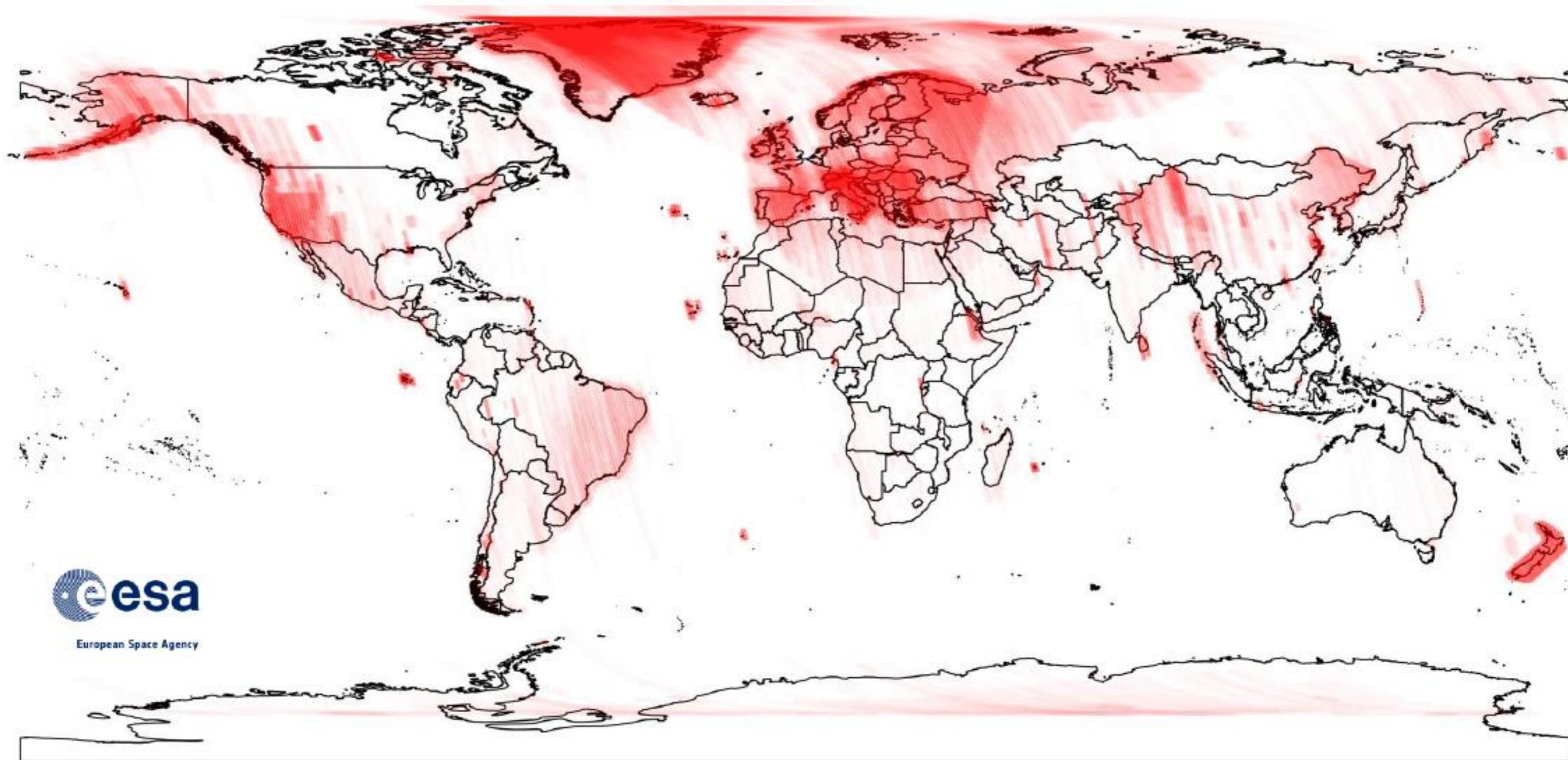
(tempo di rivisitazione)



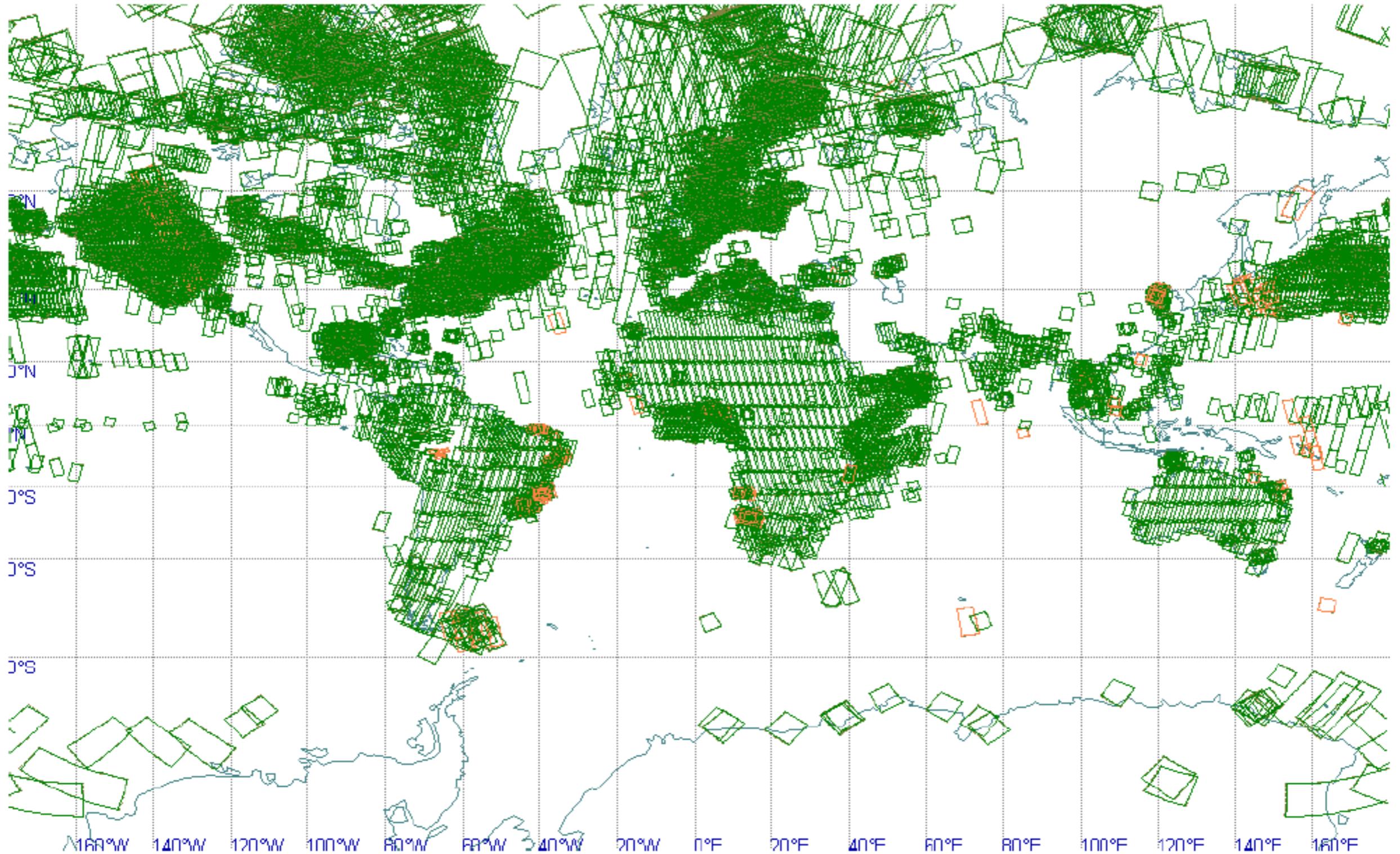
# ERS1-2 coverage



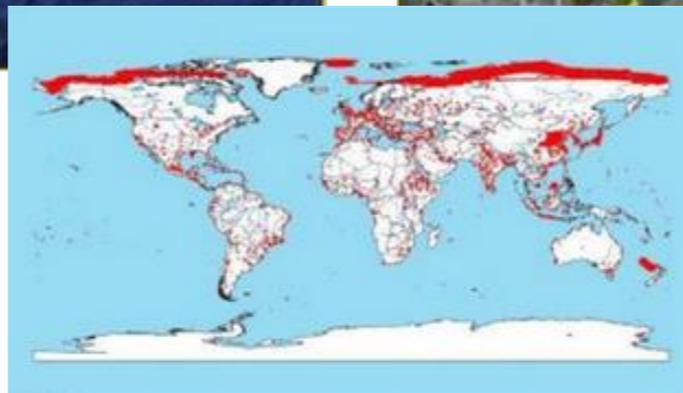
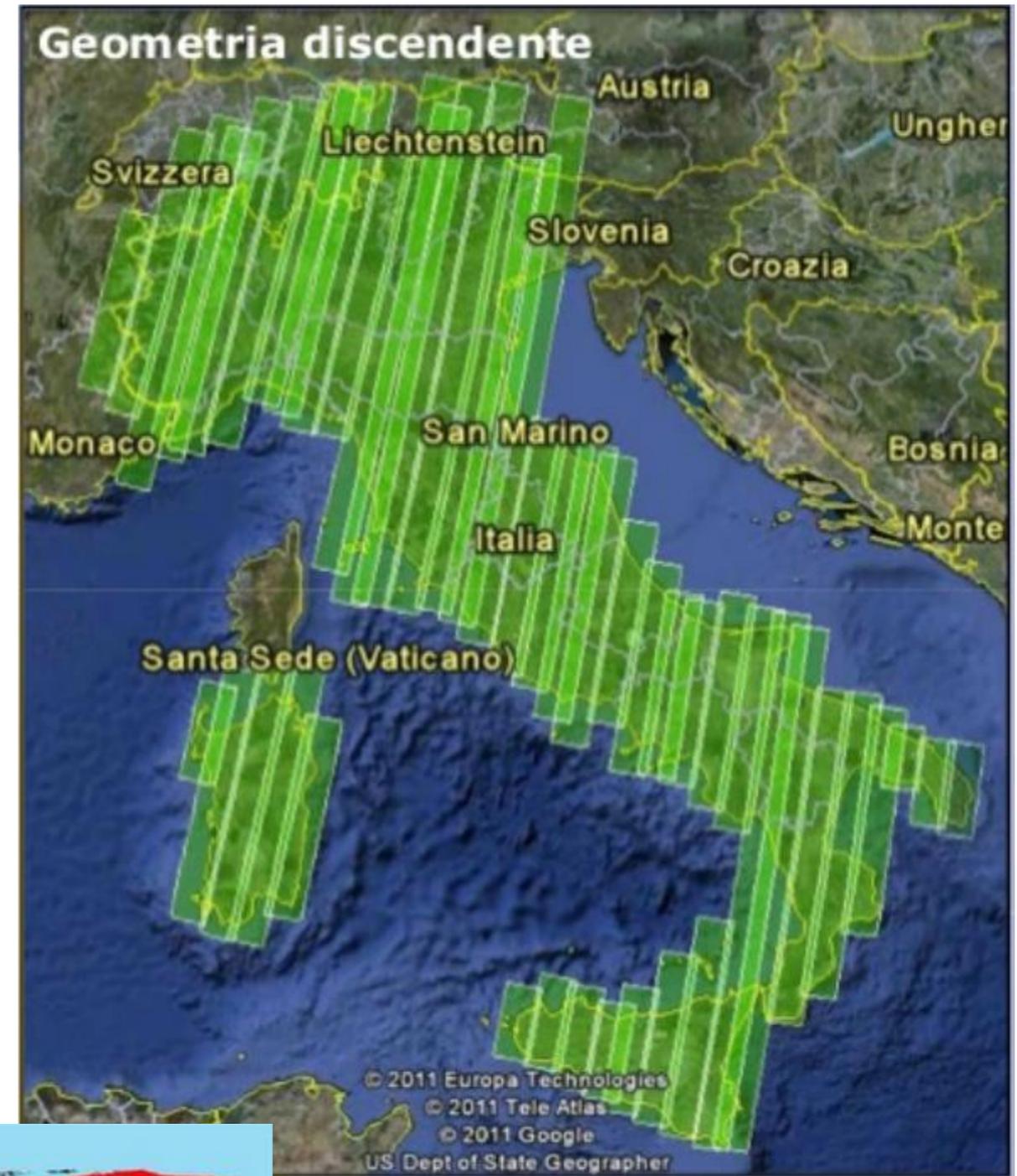
# ENVISAT coverage



# RADARSAT-2 coverage



# COSMO-SkyMed coverage

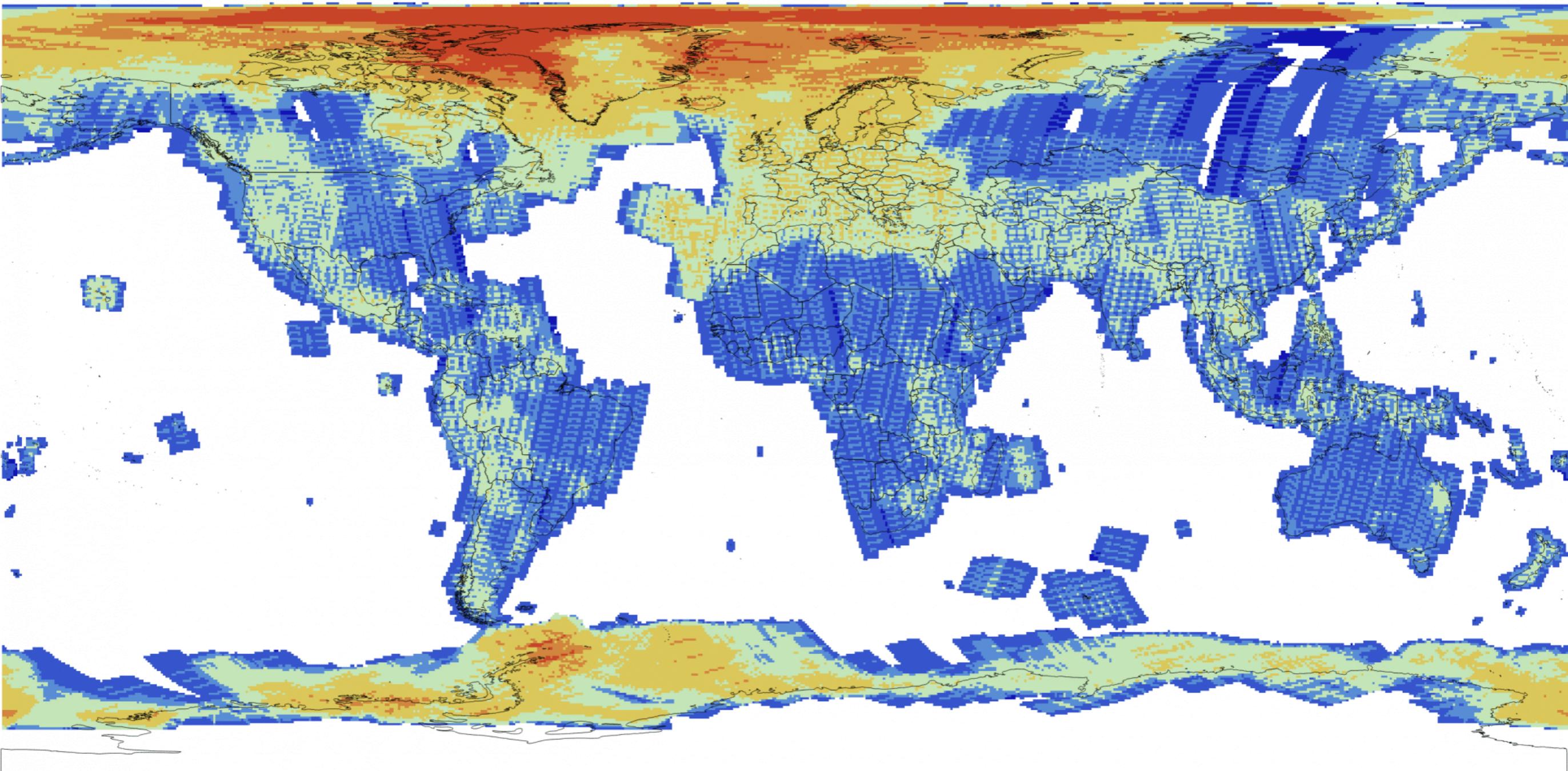


# TerraSAR-X coverage



# Sentinel-1 coverage (in acquisition)

January 2020 Sentinel-1A & 1B Acquisitions



## Legend

No. Observations

  $\leq 1$   
 2 - 25

 26 - 50  
 51 - 100

 101 - 250  
 251 - 500

 501 - 1000  
  $> 1000$

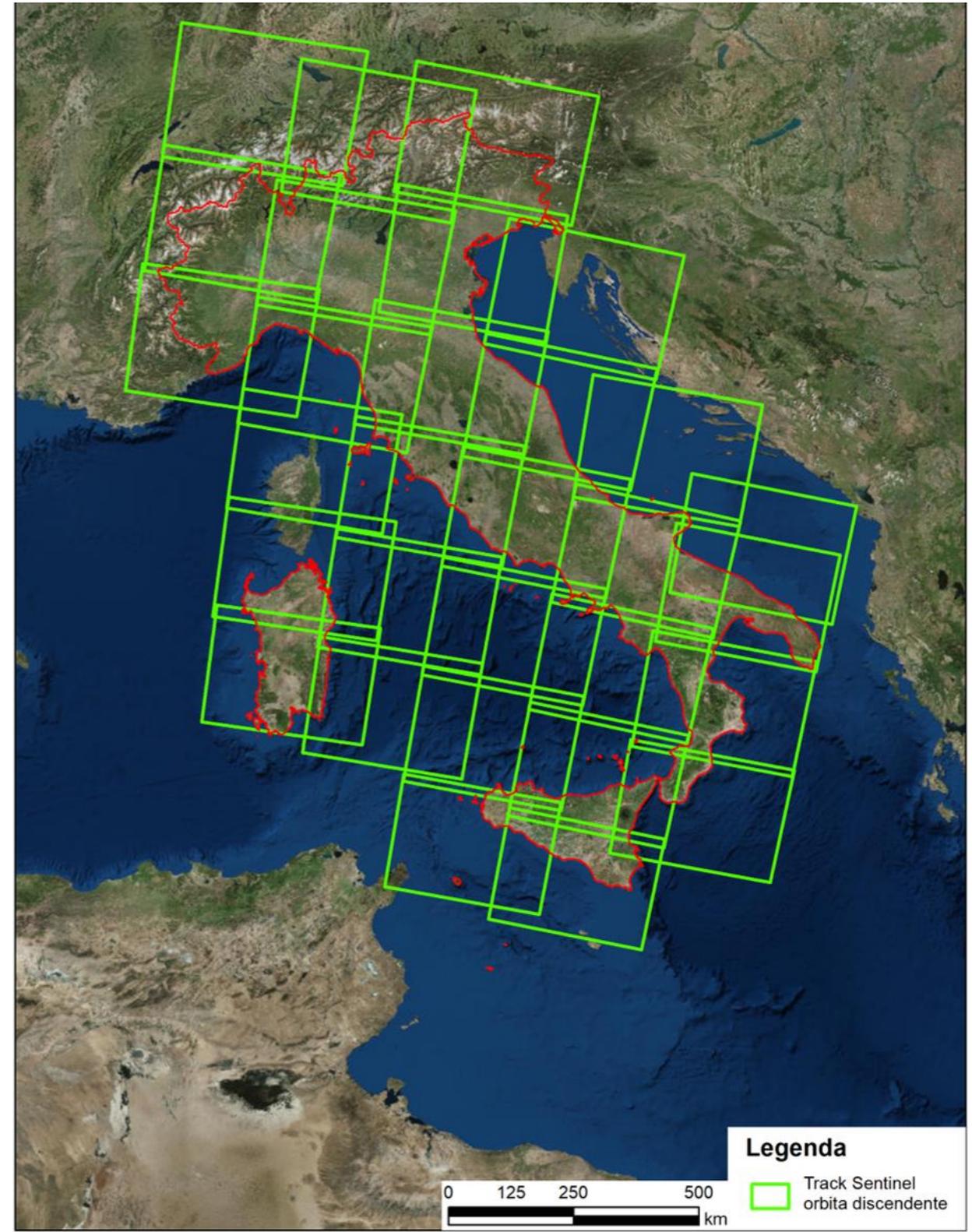
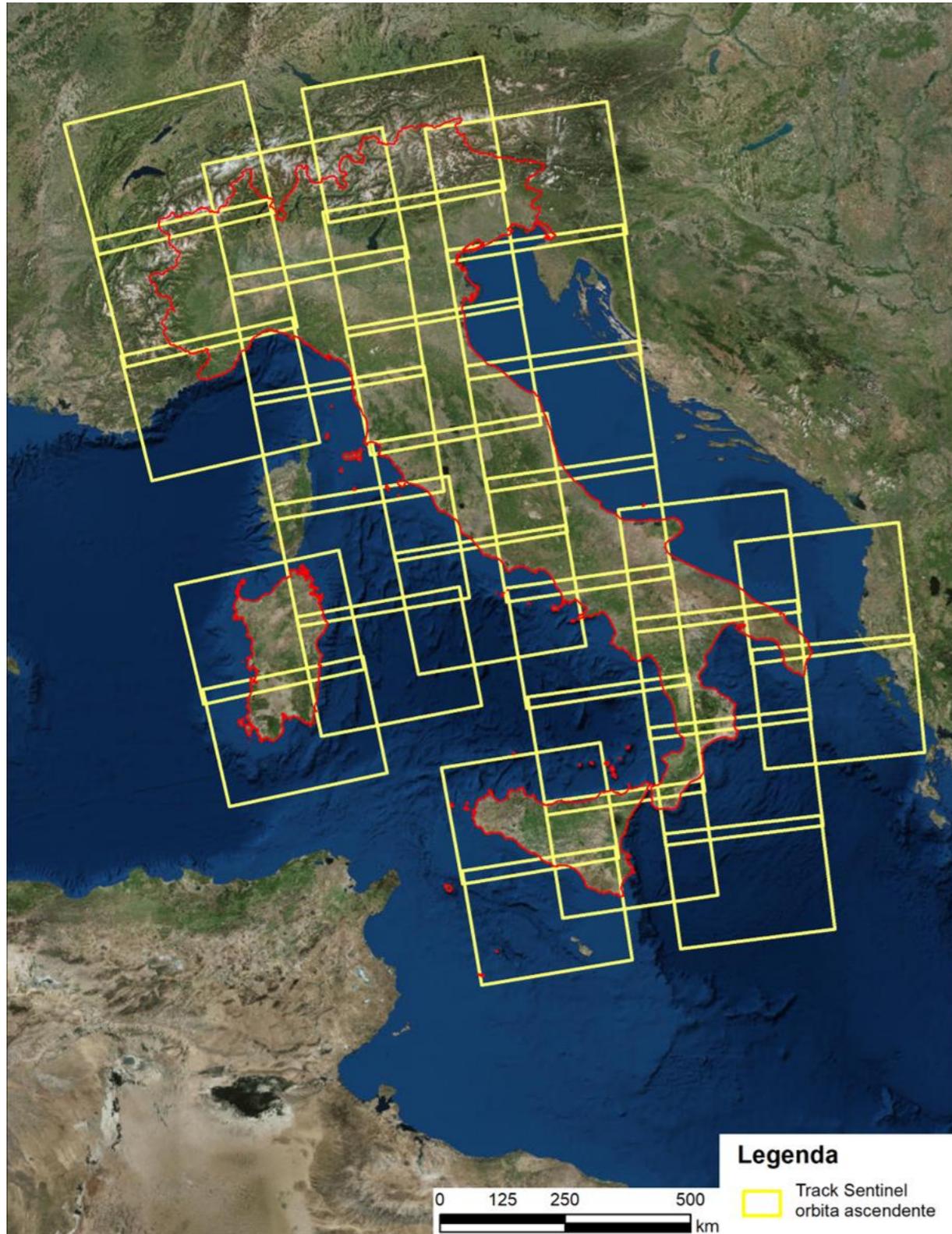
# Sentinel-1(A & B)



Satelliti gemelli ad alta risoluzione operanti in banda C su con tempo di rivisitazione di 6 giorni.

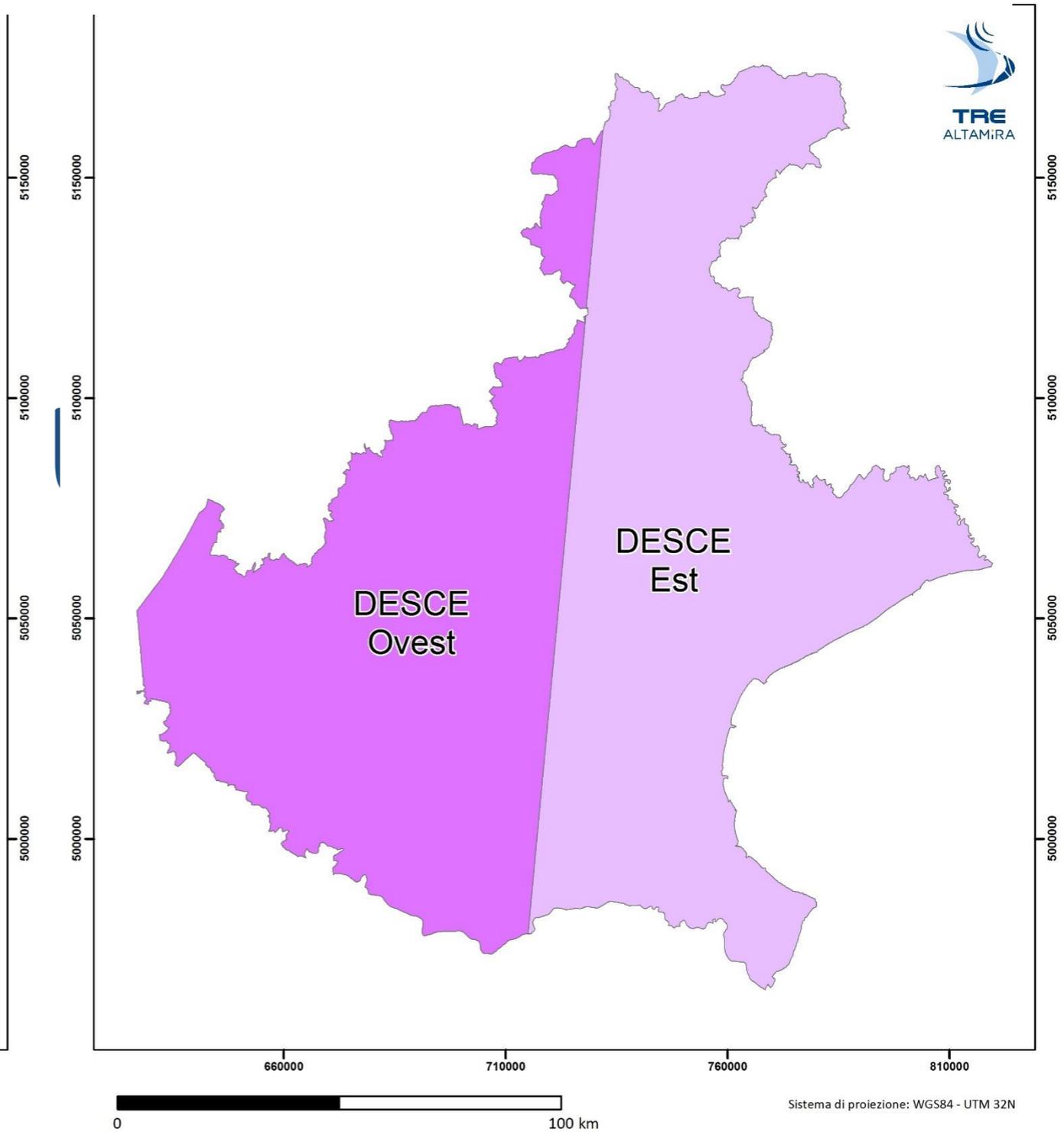
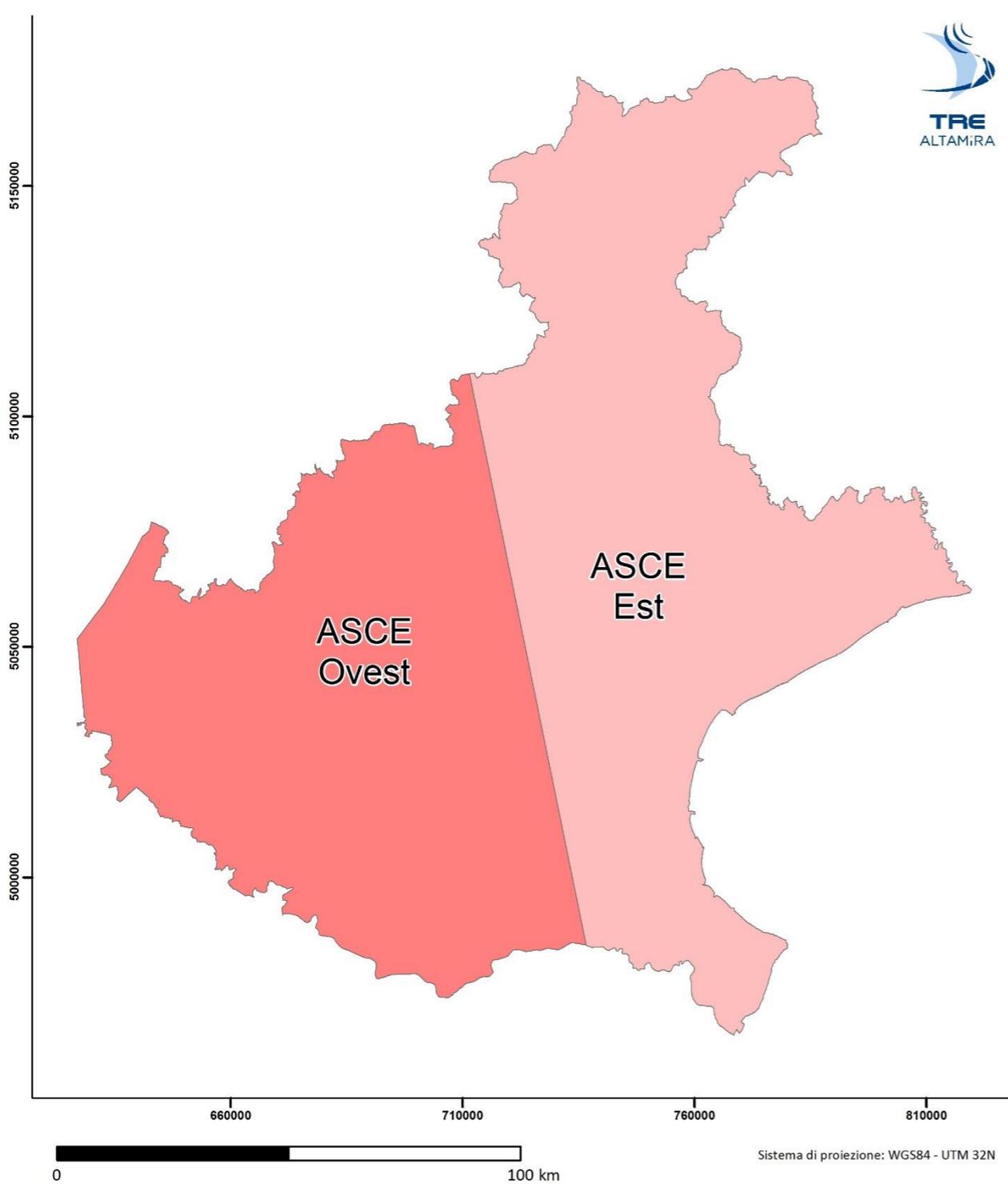
# Sentinel-1

## Copertura immagini sull'Italia



# Sentinel-1

## Copertura immagini sulla Regione Veneto



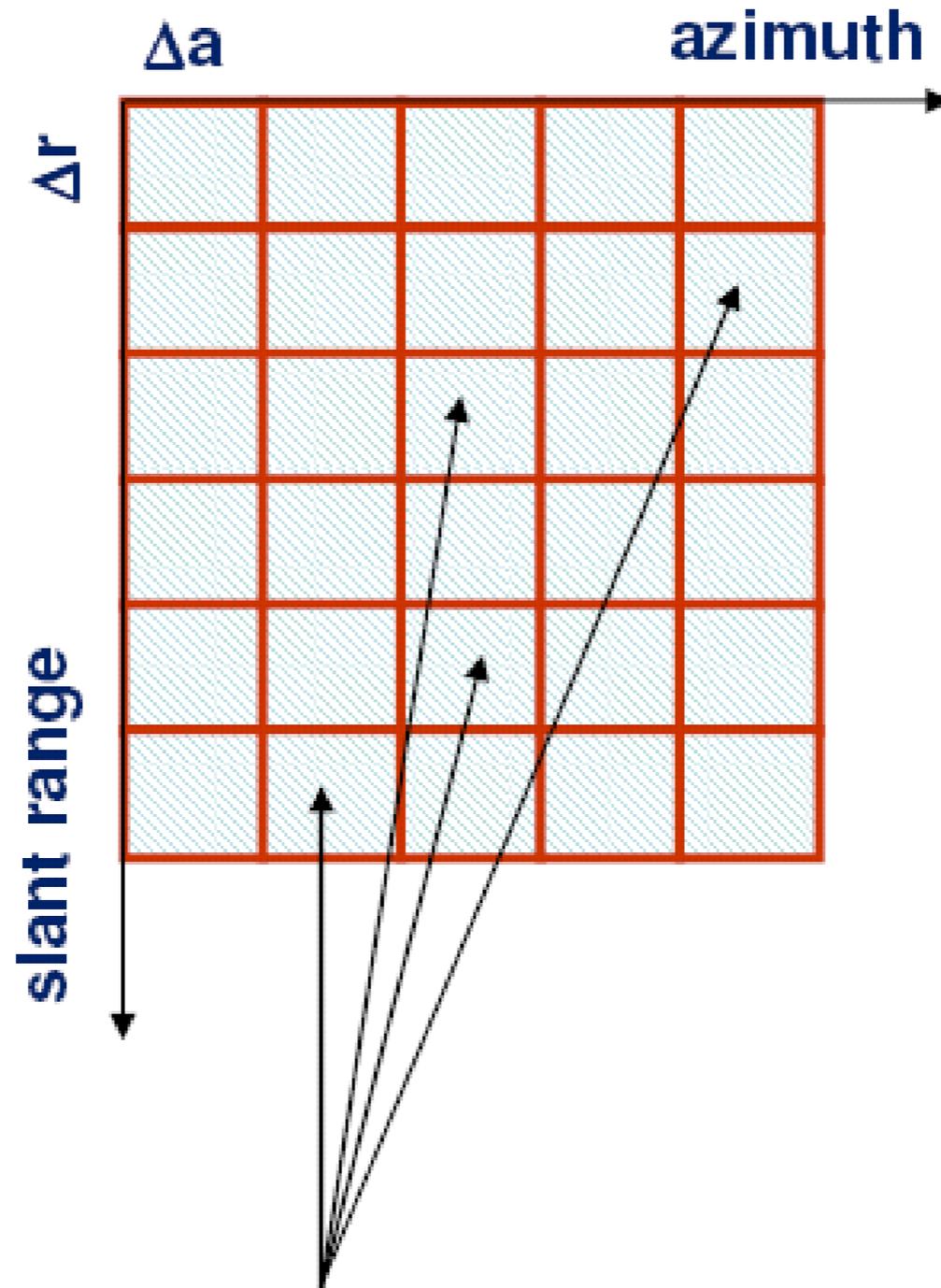
Immagini *radar*:  
caratteristiche & problematiche

# Immagine SAR

L'immagine *radar* è una matrice di pixels come una immagine ottica RGB

Ogni pixel ha determinate coordinate, dimensioni e contiene informazioni *radar*

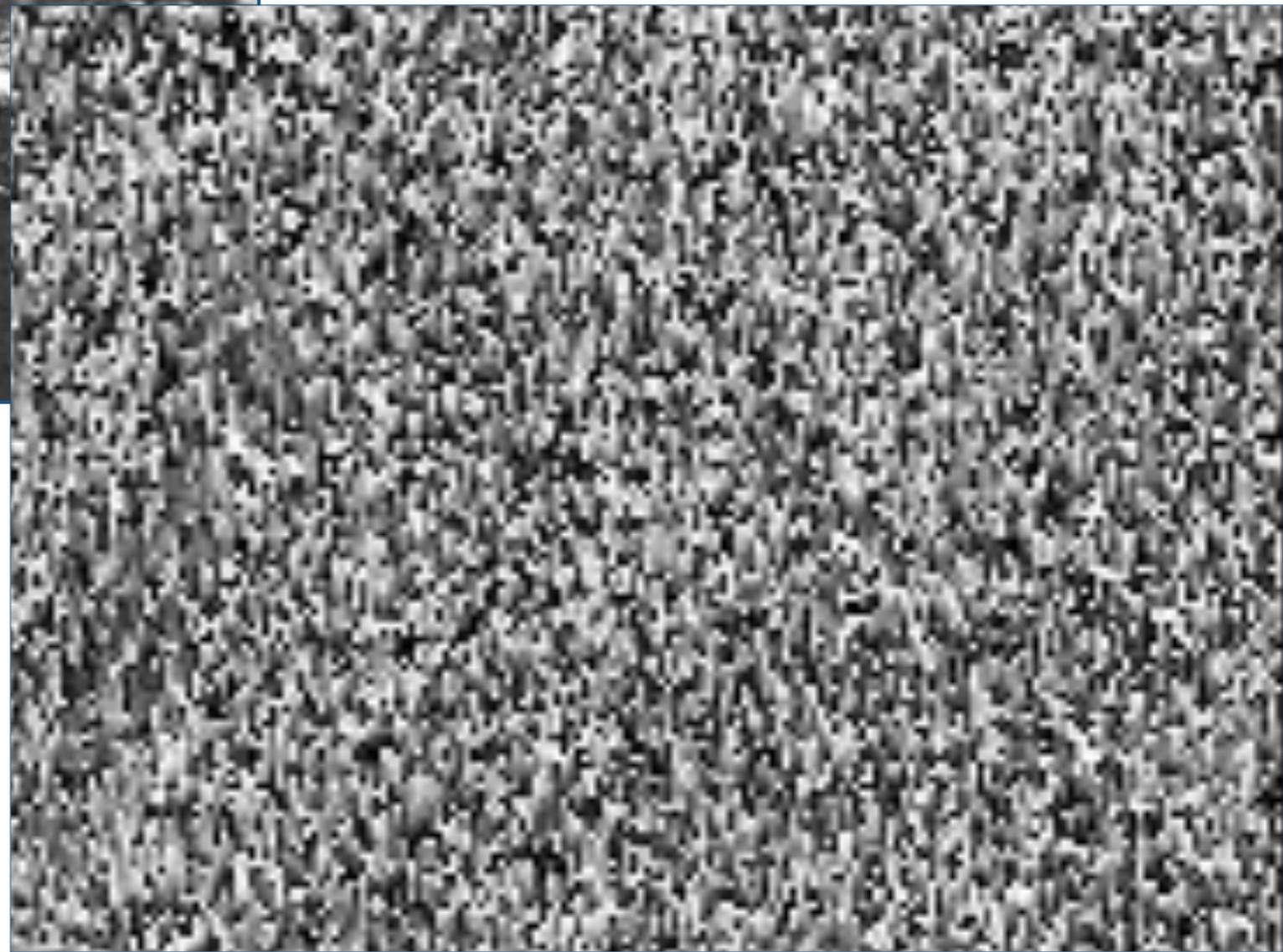
Ogni cella (pixel) contiene *ampiezza* e *fase* del segnale *radar* riflesso dai targets



# Immagini *radar*



**Ampiezza:** valore del pixel riferito a "quanto" il bersaglio riflette

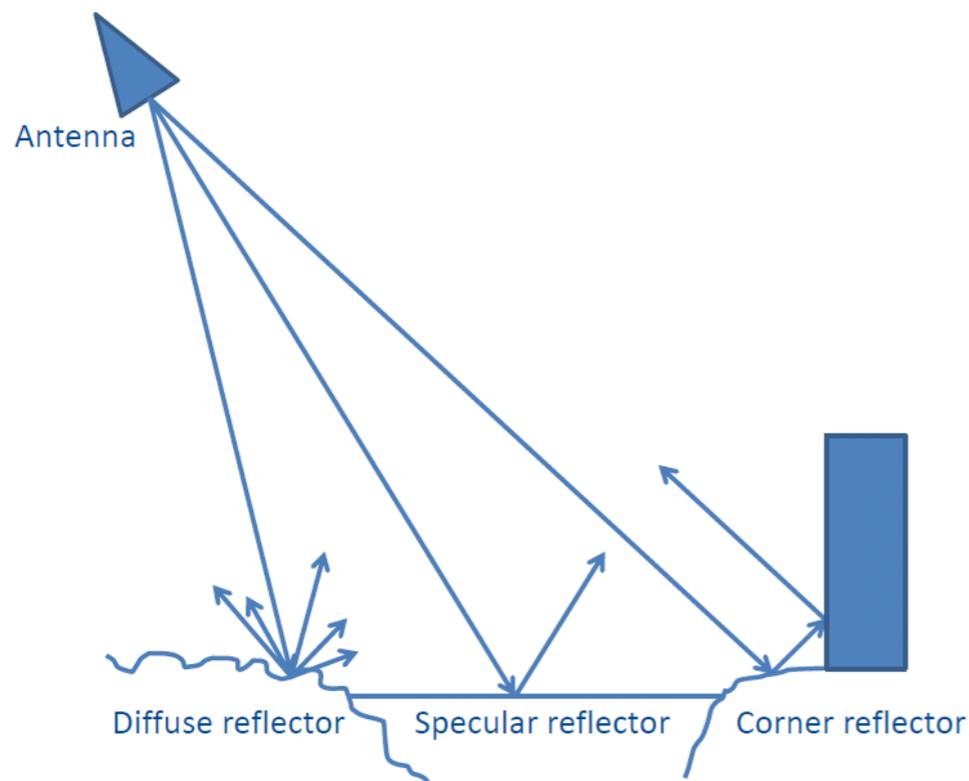


**Fase:** valore riferito alla distanza rispetto al bersaglio (misurato in  $\pi$ )

# Ampiezza

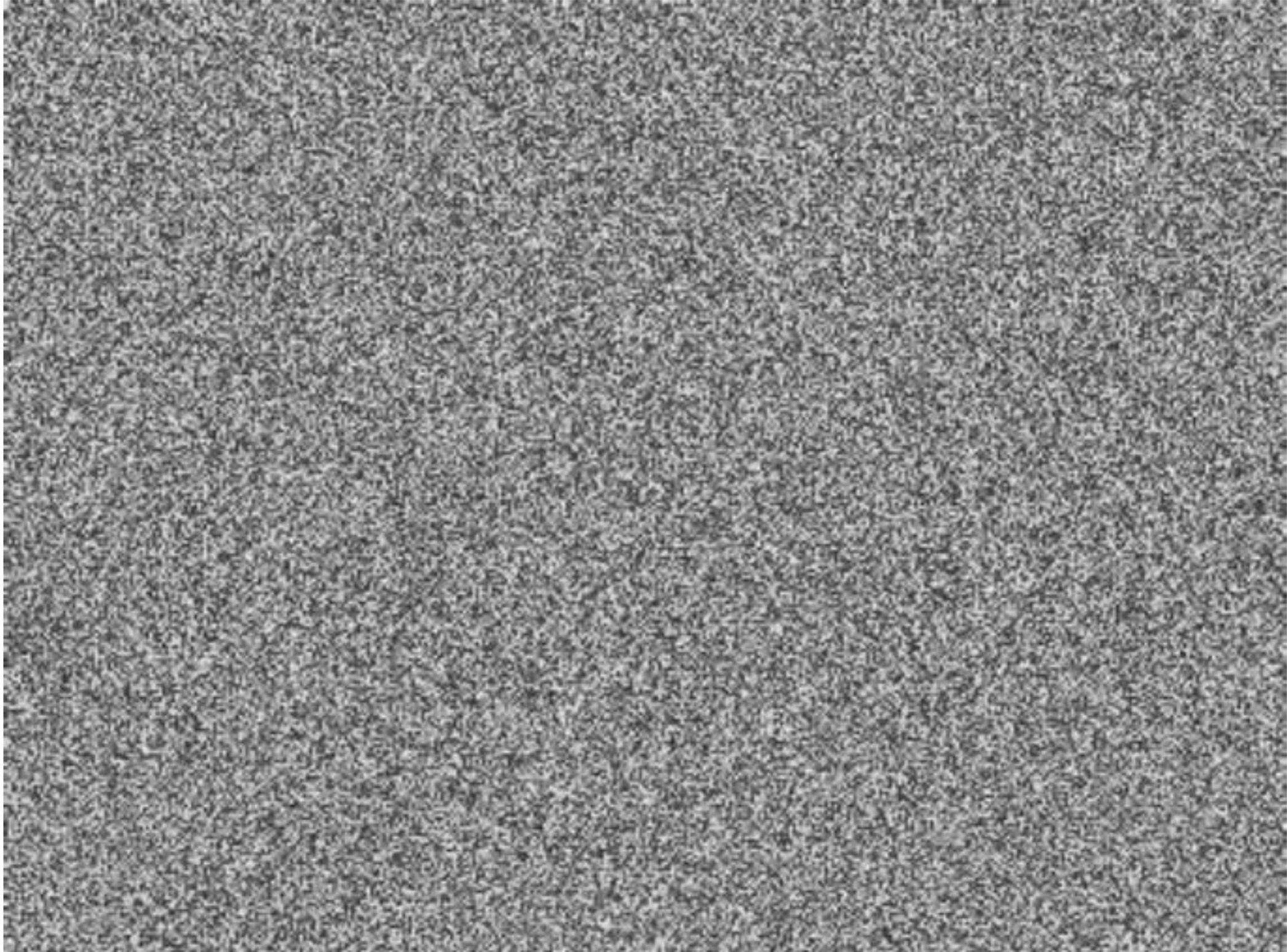
Ogni pixel dell'immagine SAR contiene il segnale riflesso influenzato dai target riflettenti per ogni cella. La riflettività (ampiezza riflessa) non è influenzata dalle condizioni meteorologiche e dalla illuminazione del sole.

L'intensità (ampiezza) del segnale riflesso dipende dal tipo di *targets* per ogni cella (geometria, temperatura e proprietà dielettriche).



# Immagine SAR (fase)

La fase (che si esprime in modulo  $2\pi$ ) assume valori non ordinati e non ha alcun significato fisico. La fase di un segnale *radar* è correlata alla distanza sensore-bersaglio.



# Fase

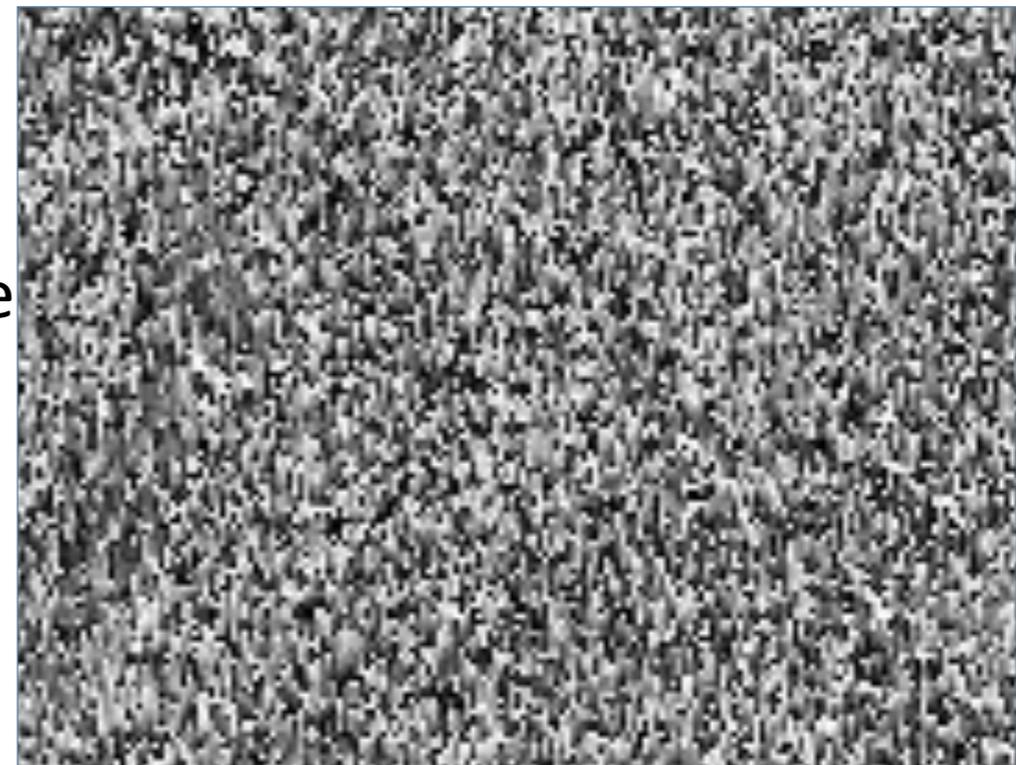
$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} r + \alpha + \nu$$

$\Psi$  Riflettività del bersaglio radar (materiale e geometria)

$4\pi r/\lambda$  “Propagatore”: dipende dalla distanza sensore bersaglio

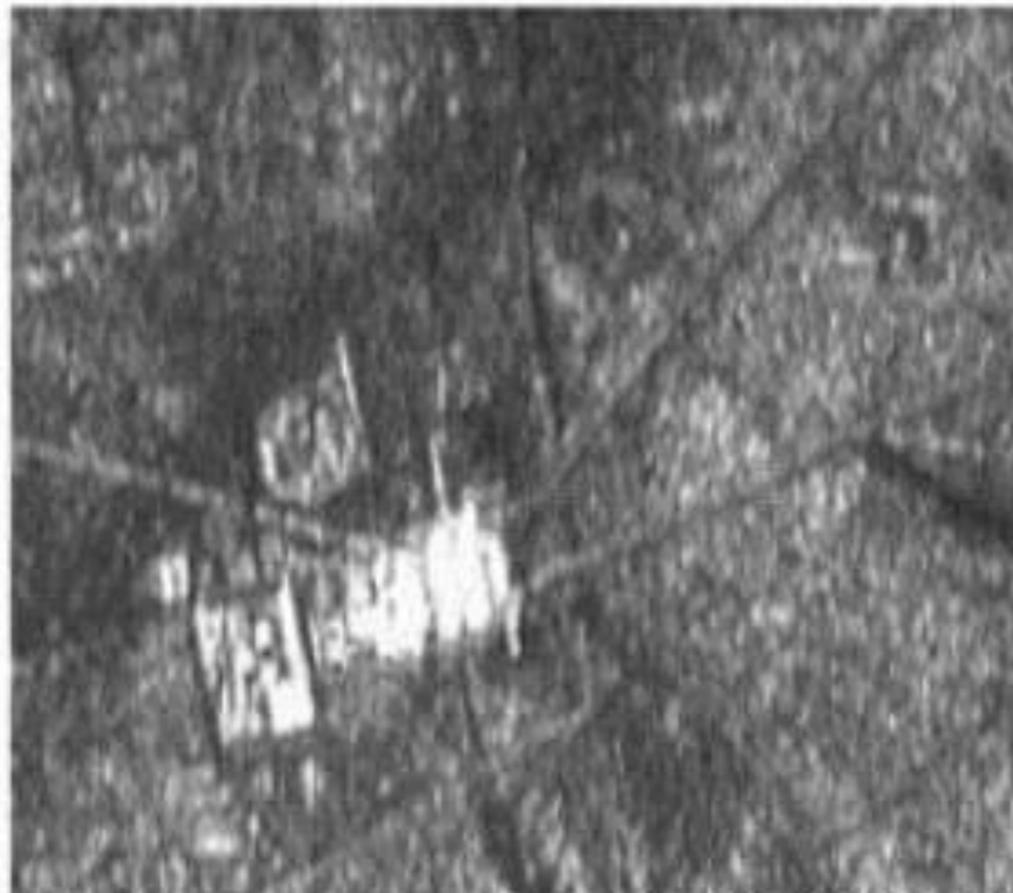
$\alpha$  APC, contributo atmosferico

$\nu$  Rumore proprio del sistema di acquisizione



Un'immagine SAR singola è priva di utilità pratica in quanto l'immagine non è di facile comprensione e non si possono distinguere i diversi fattori di contributo di fase dati da: riflettività del bersaglio, contributo atmosferico, effetto topografico e *noise* (rumore bianco).

# Caratteristiche dei sensori *radar*



**ENVISAT (C-band)**



**TerraSAR-X (X-band)**

Banda	Satellite (esempi)	Frequenza	Lunghezza d'onda	Caratteristiche	Range x Azimuth
L	Alos PALSAR	1-2 Ghz	15-30 cm	Swath ampia, Bassa risoluzione	10 x 5 m
C	ERS1/2 Envisat Sentinel-1	4-8 Ghz	5,6 cm	Swath variabile (100-250 km) ~10m di risoluzione	15 x 4 m
X	TerraSAR-X Cosmo SkyMed	8-12 Ghz	3,1 cm	Swath più piccoli, Risoluzione metrica	3 x 3 m

# Risoluzione dei sensori *radar*

ERS1/2 (Banda C)



TerraSAR-X (Banda X)

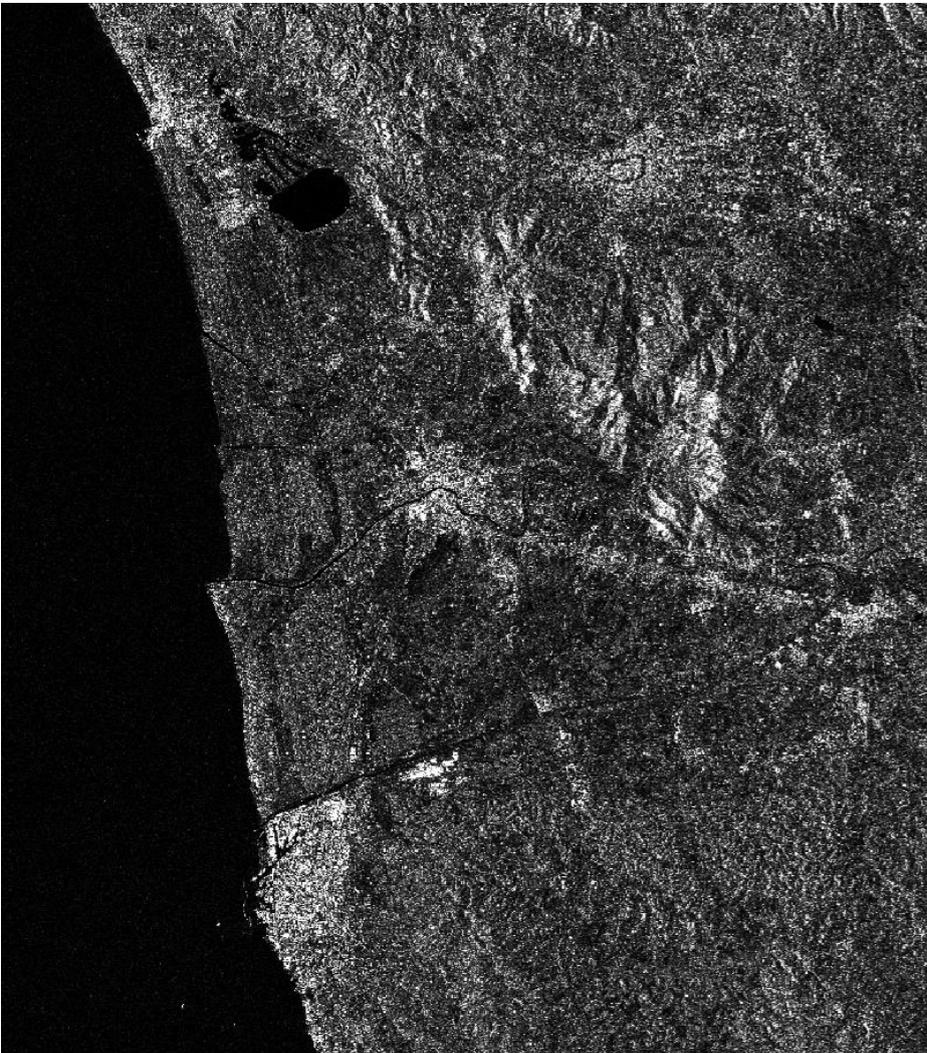


# Immagine SAR (georiferita)

## Sentinel-1

Banda C (5.6 cm)

Agenzia Spaziale Europea



## COSMO-SkyMed

Banda X (3.0 cm)

Agenzia Spaziale Italiana



## Sentinel-2

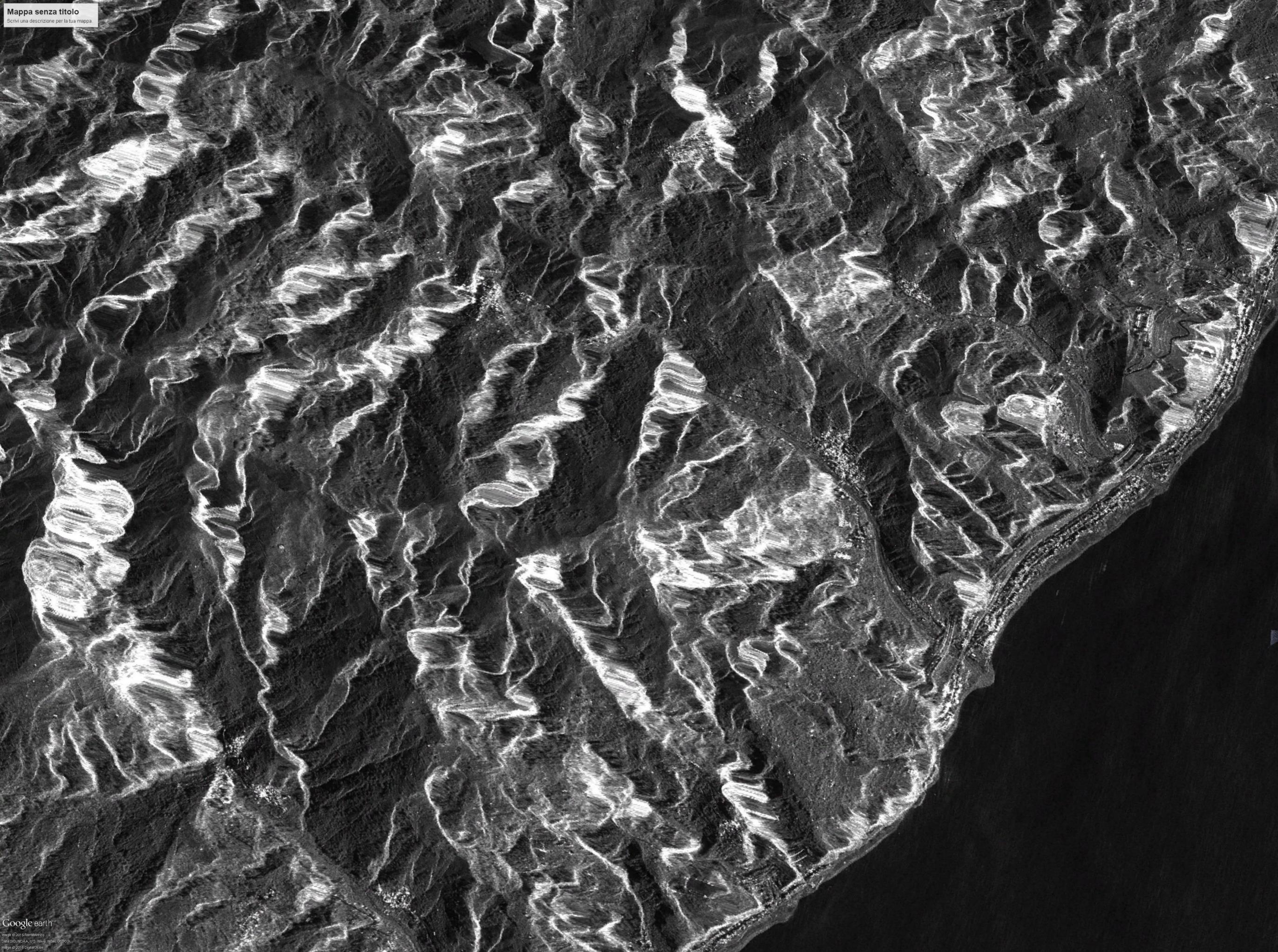
Immagine ottica(RGB)

Agenzia Spaziale Europea



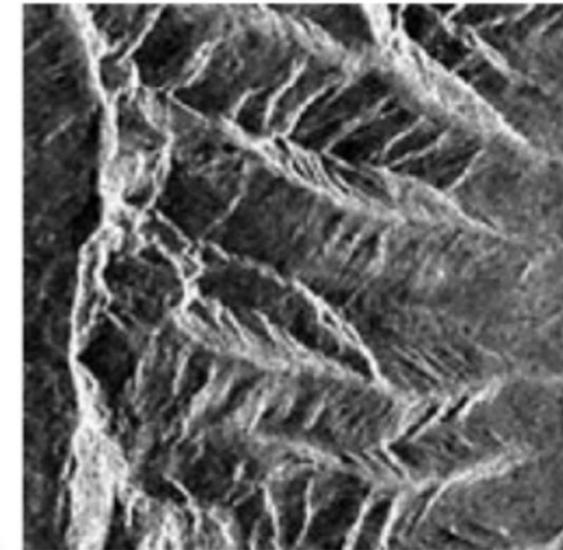
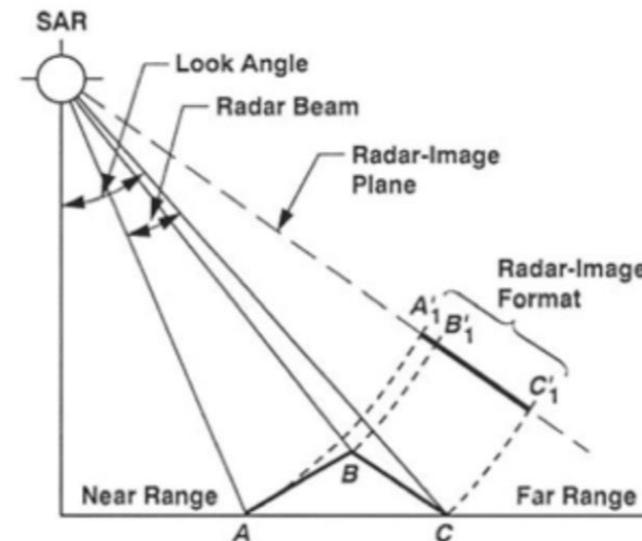
- NERO: riflessione speculare (ad esempio, ammassi d'acqua)
- SCALA DI GRIGI: vari elementi con differenti valori di riflettività
- BIANCO: alta riflettività (costruzioni, roccia affiorante, ecc.)



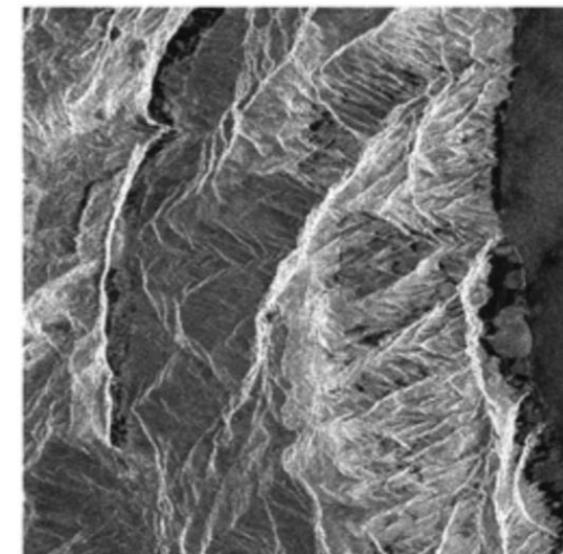
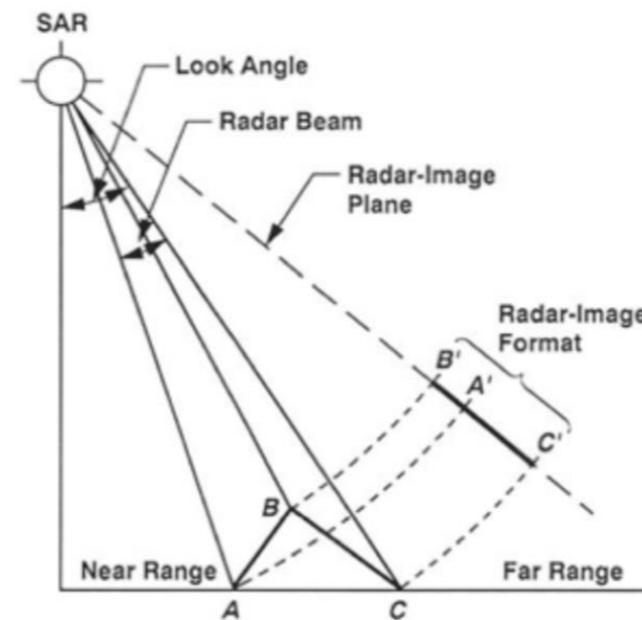


# Distorsione geometrica

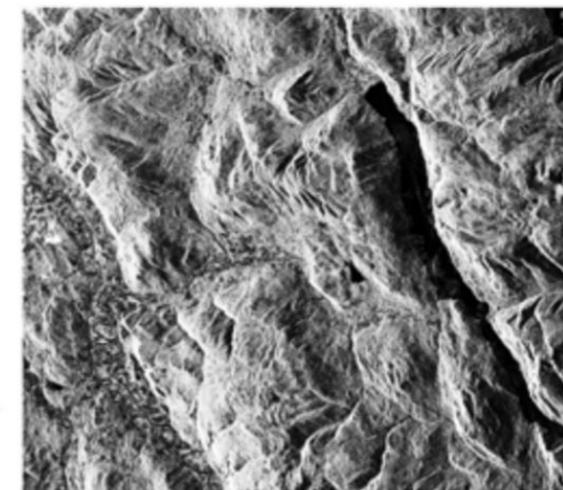
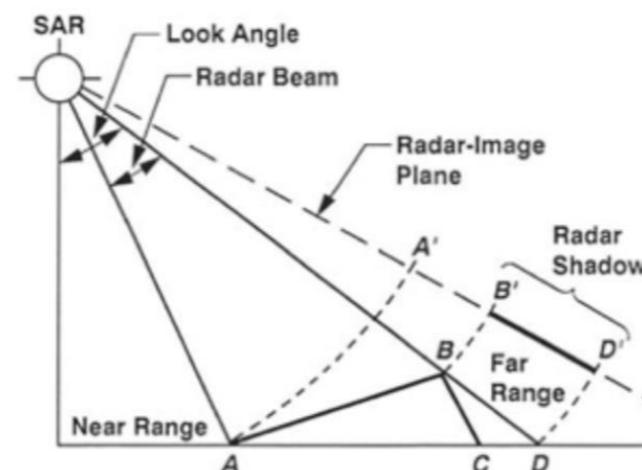
- **Foreshortening**: quando il fascio *radar* raggiunge la base di un elemento sviluppato in altezza (ad esempio una montagna) prima della cima. Si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla linea congiungente sensore-bersaglio, in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.



- **Layover**: quando il fascio *radar* raggiunge la cima di un elemento sviluppato in altezza (ad esempio una montagna) prima della base. La cima dell'elemento "lays over" (ricopre) la sua base nella proiezione rispetto alla superficie. Si verifica quando la pendenza del terreno è elevata; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.

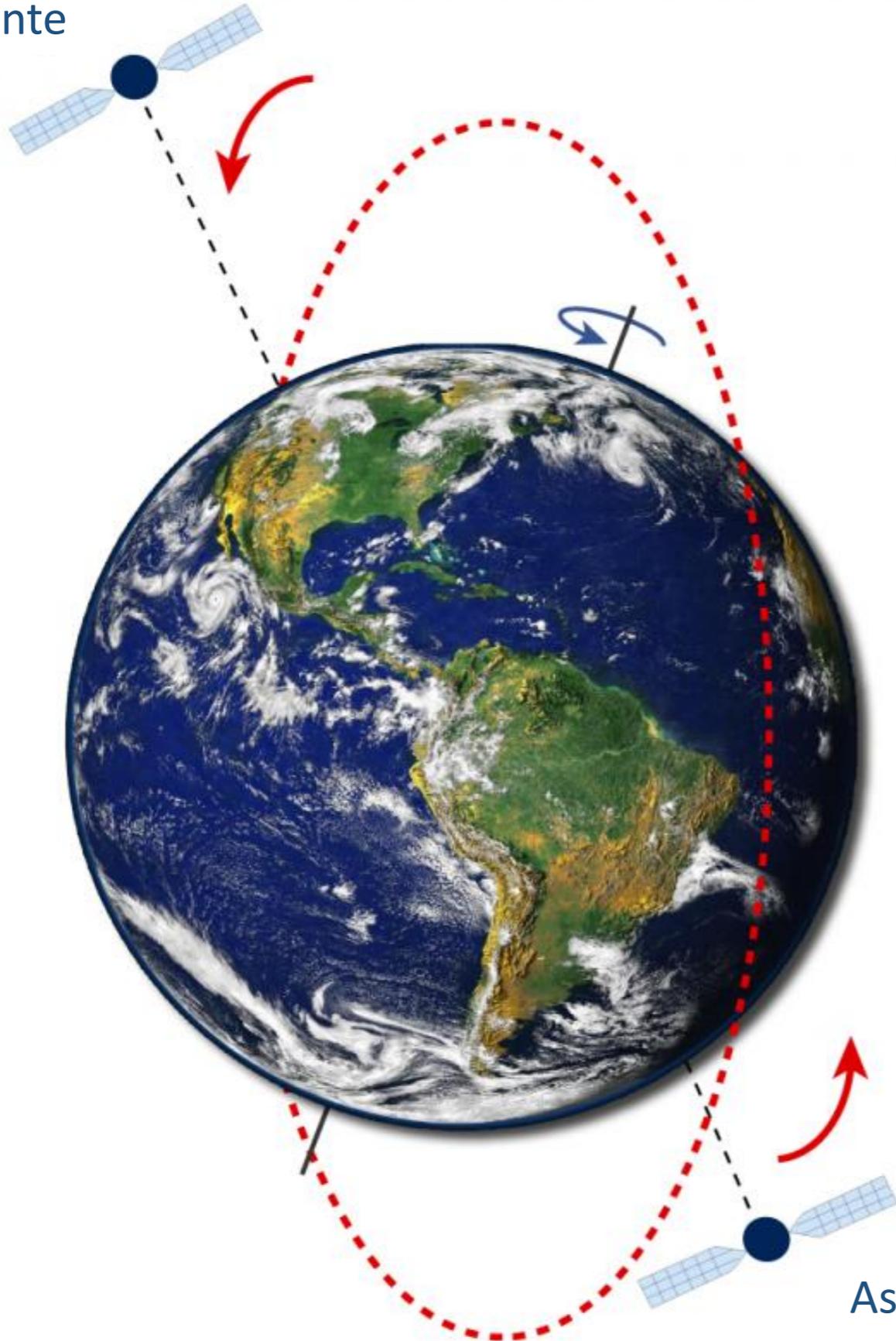


- **Shadowing**: quando il fascio *radar* non è in grado di illuminare una porzione di una scena (ad esempio la parte posteriore di un versante molto acclive o un elemento verticale). Questa porzione nascosta apparirà molto scura o nera.

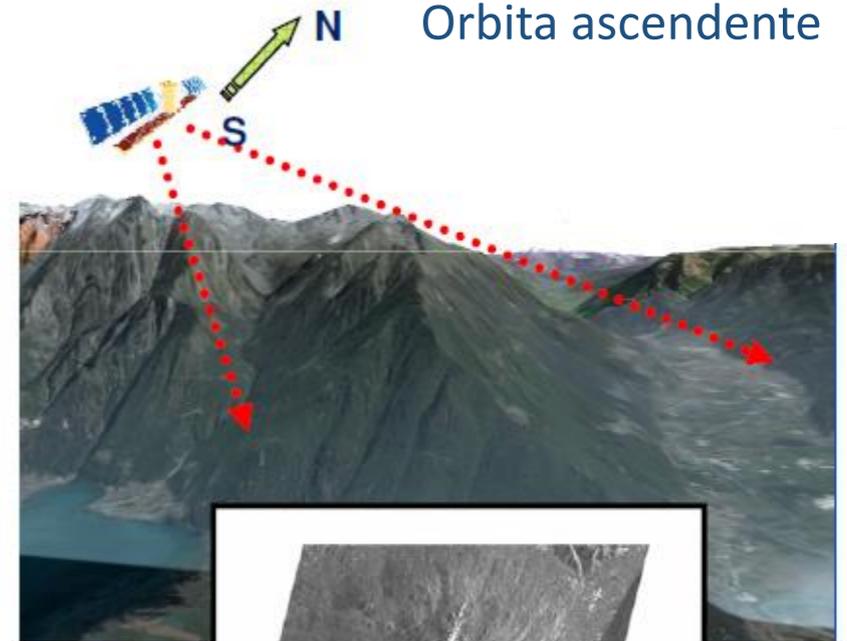


# Orbita VS distorsione geometrica

Discendente

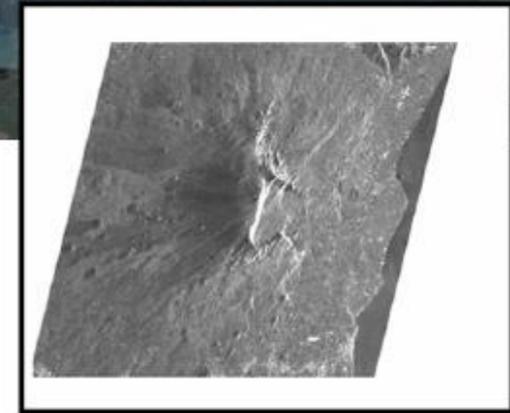


Orbita ascendente

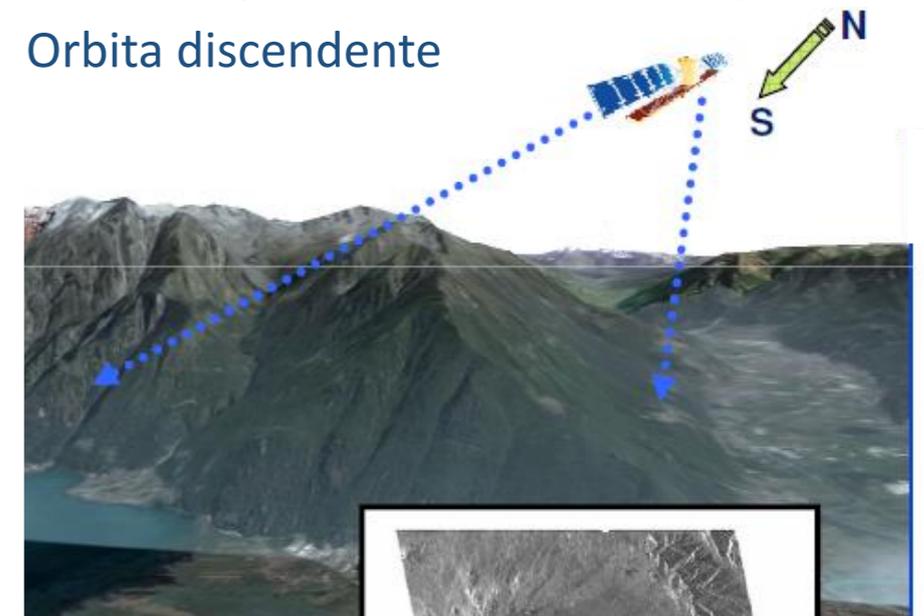


Ovest

Est

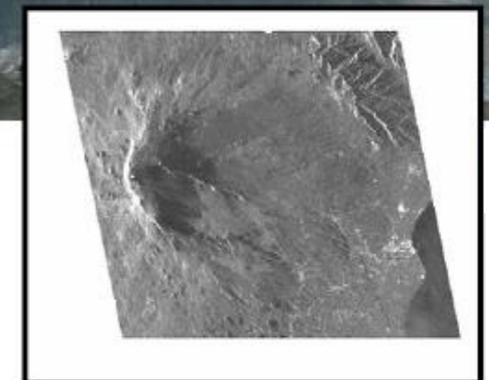


Orbita discendente



Ovest

Est

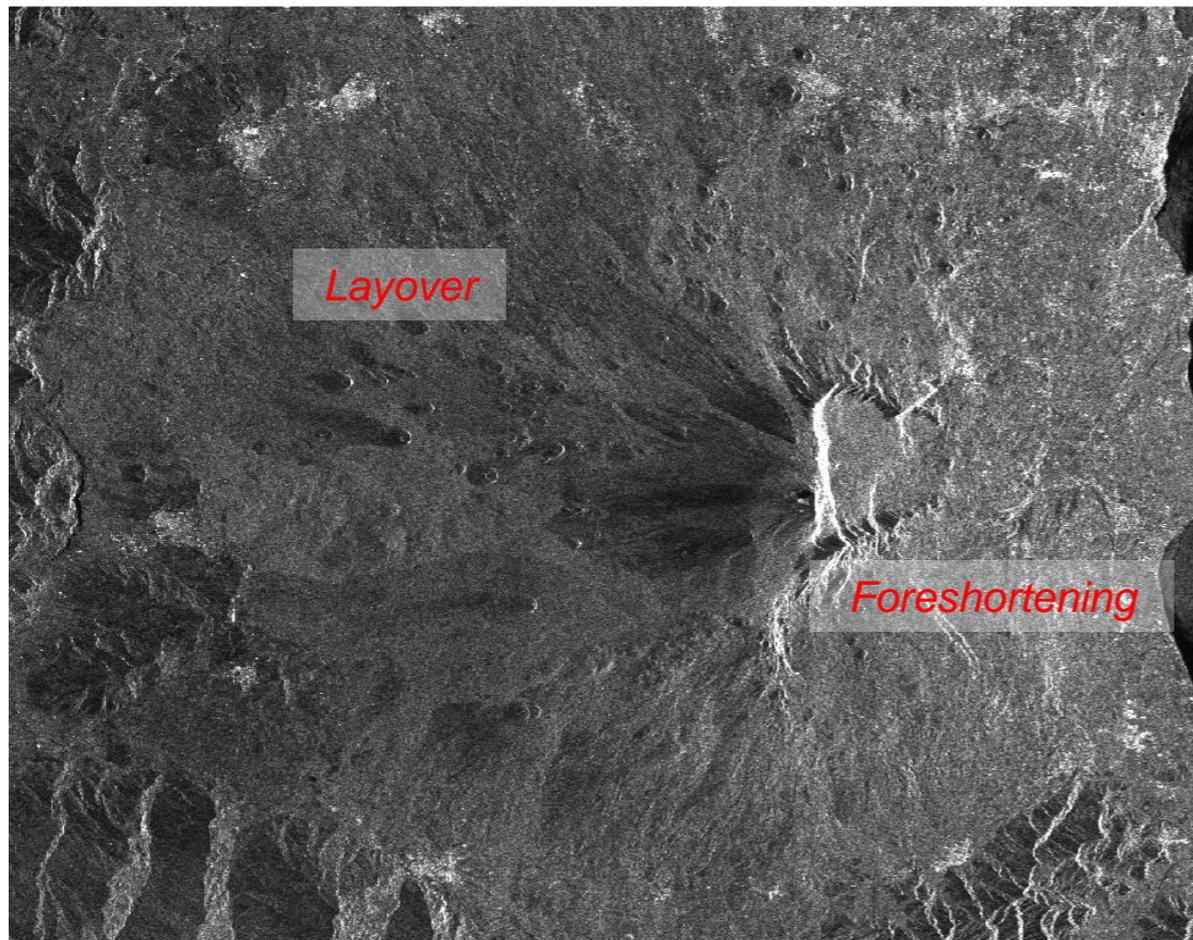


Ascendente

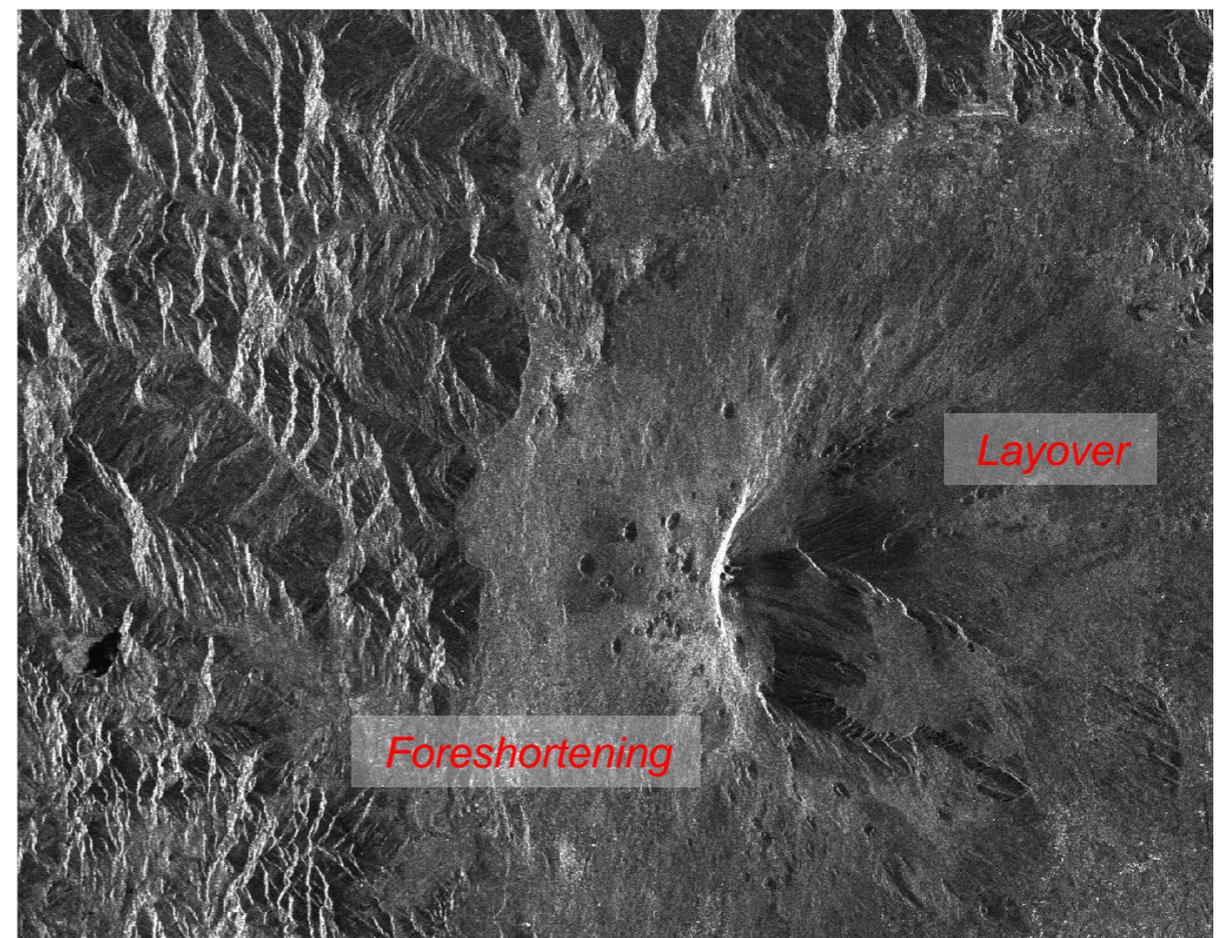
# Effetti della distorsione geometrica

Vulcano Etna Sicilia

**Sentinel-1 discendente**



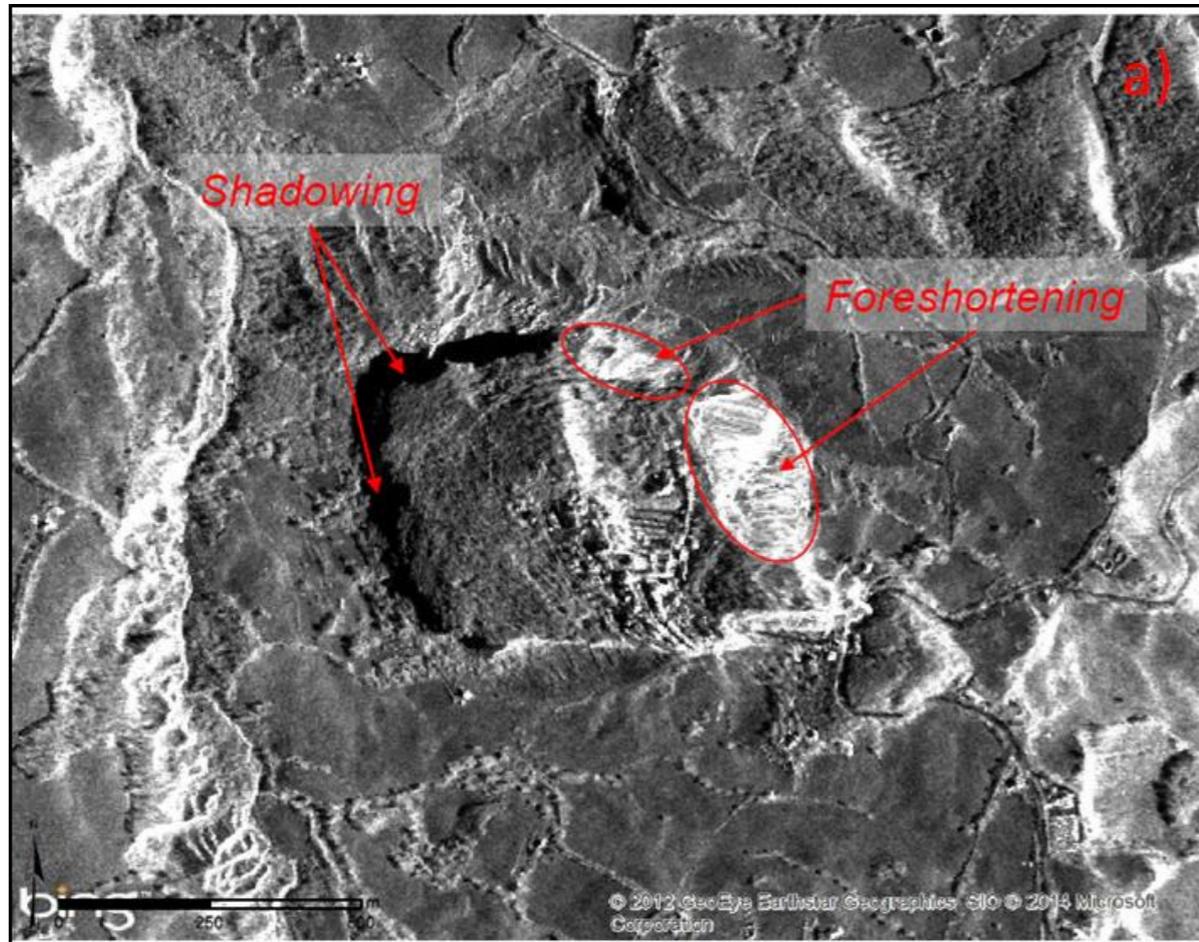
**Sentinel-1 ascendente**



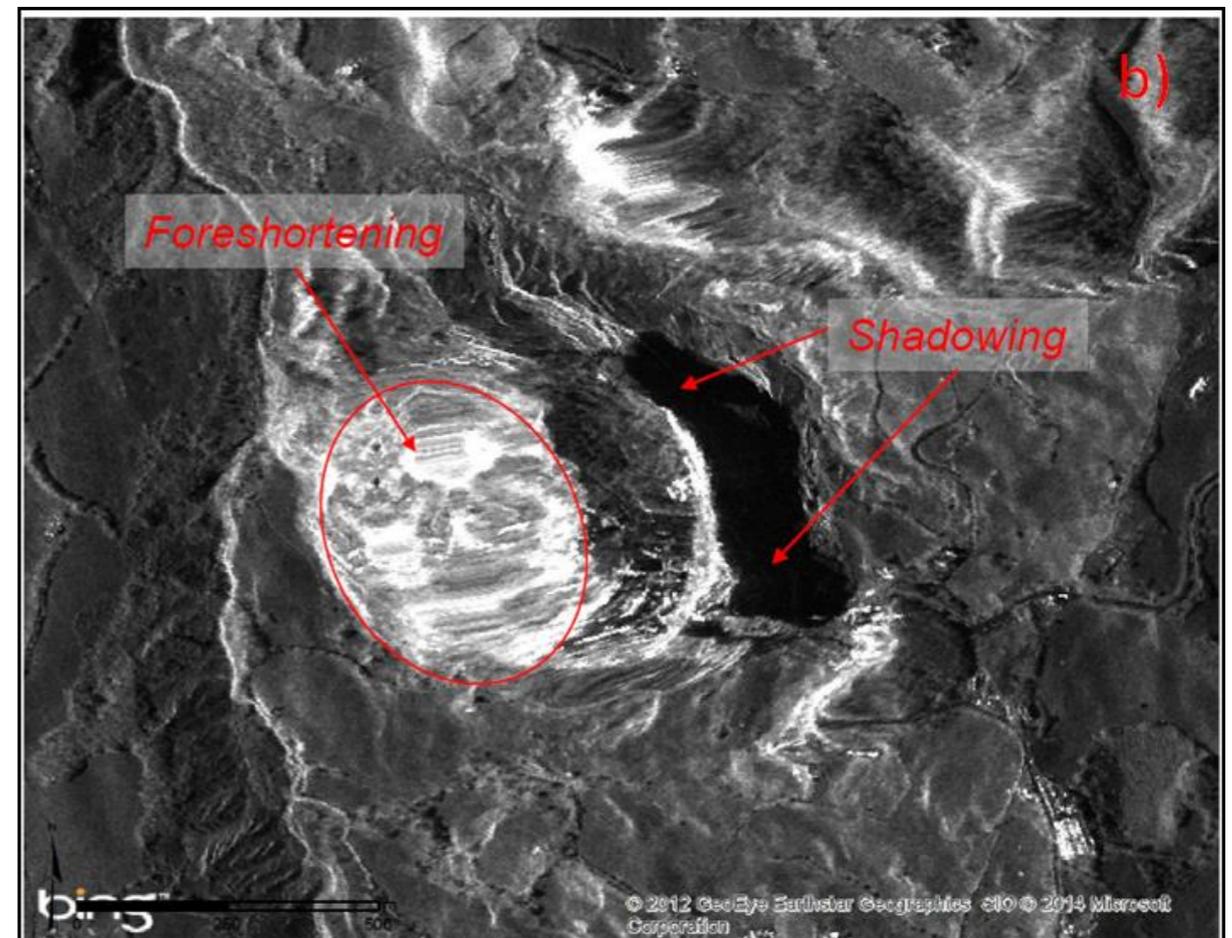
# Effetti della distorsione geometrica

Rupe di San Leo, Emilia-Romagna

## COSMO-SkyMed discendente



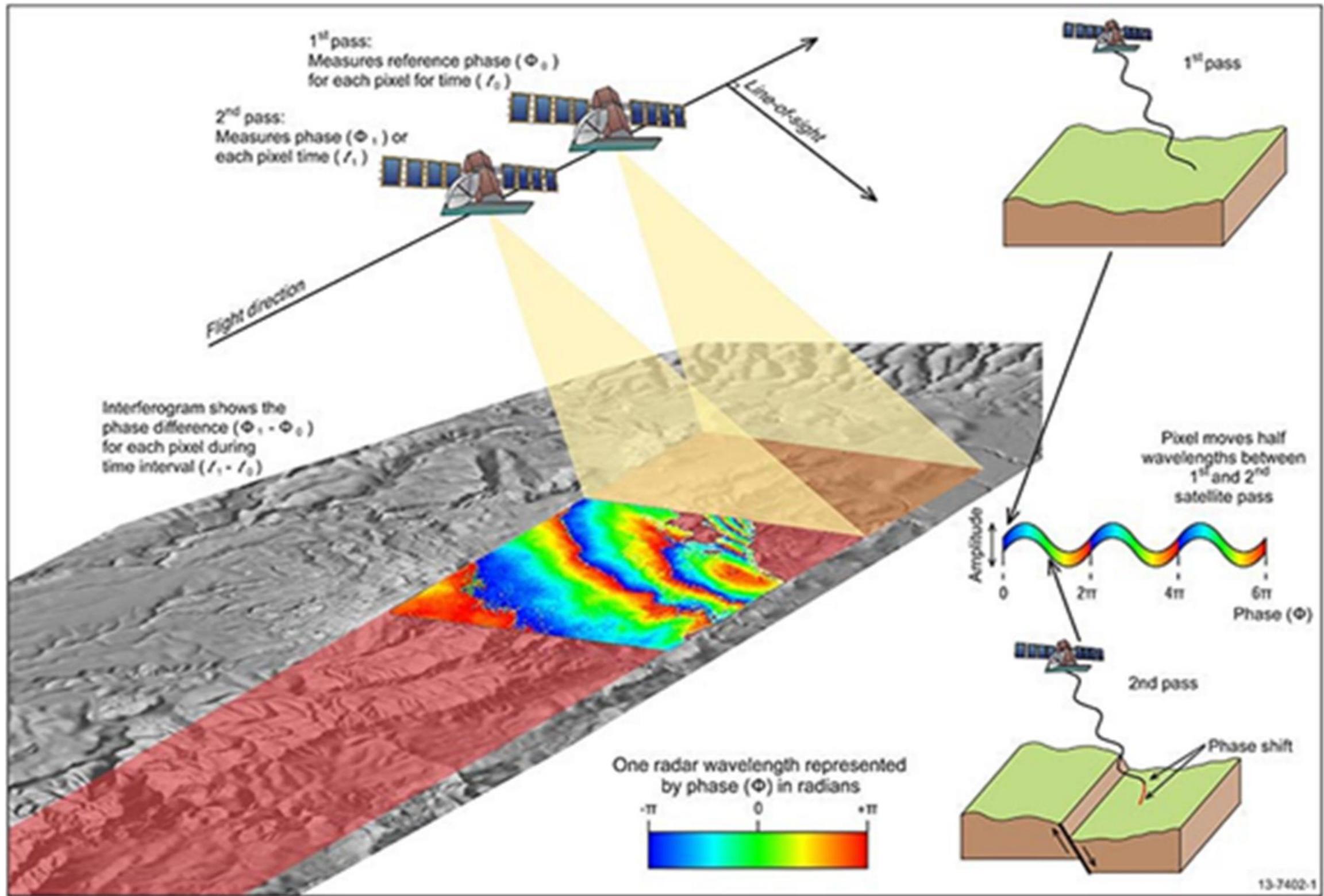
## COSMO-SkyMed ascendente



Analisi a singolo interferogramma

DInSAR

# Interferometria differenziale



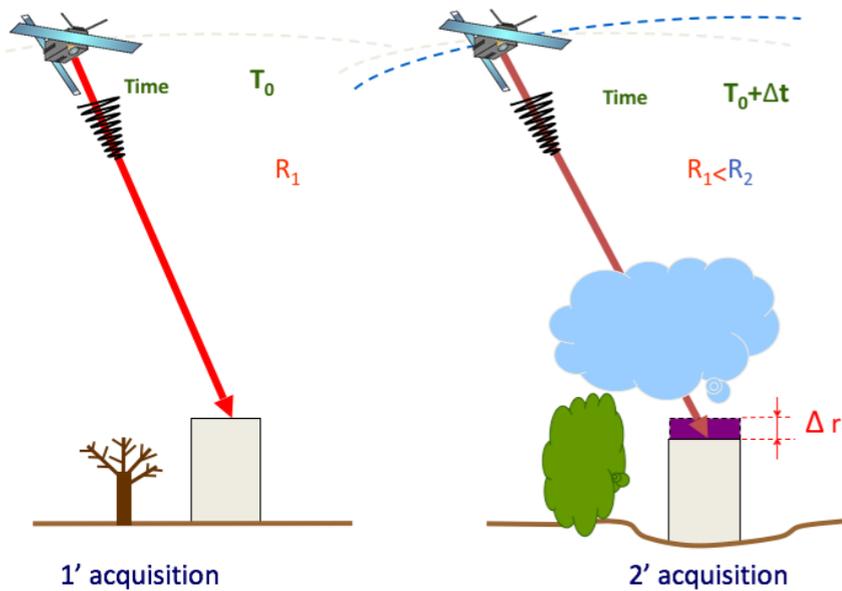
L'interferometria differenziale permette di misurare gli spostamenti del terreno tra due acquisizioni di un satellite *radar* sulla stessa area

# Interferometria differenziale

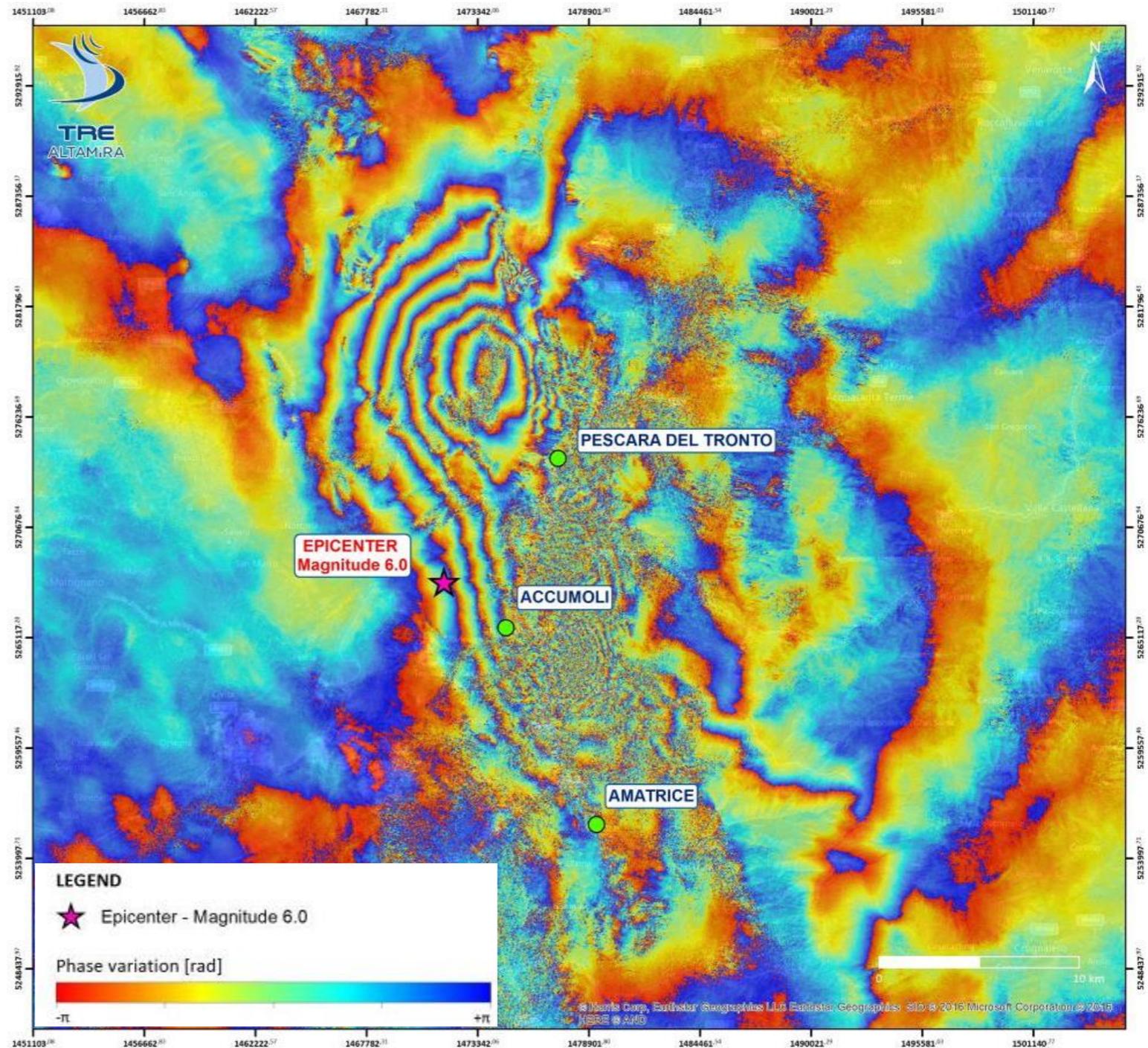
$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{displ}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{error}}$$

↓
↓
↓
↓

Topografia      Atmosfera      Flat-earth      Rumore

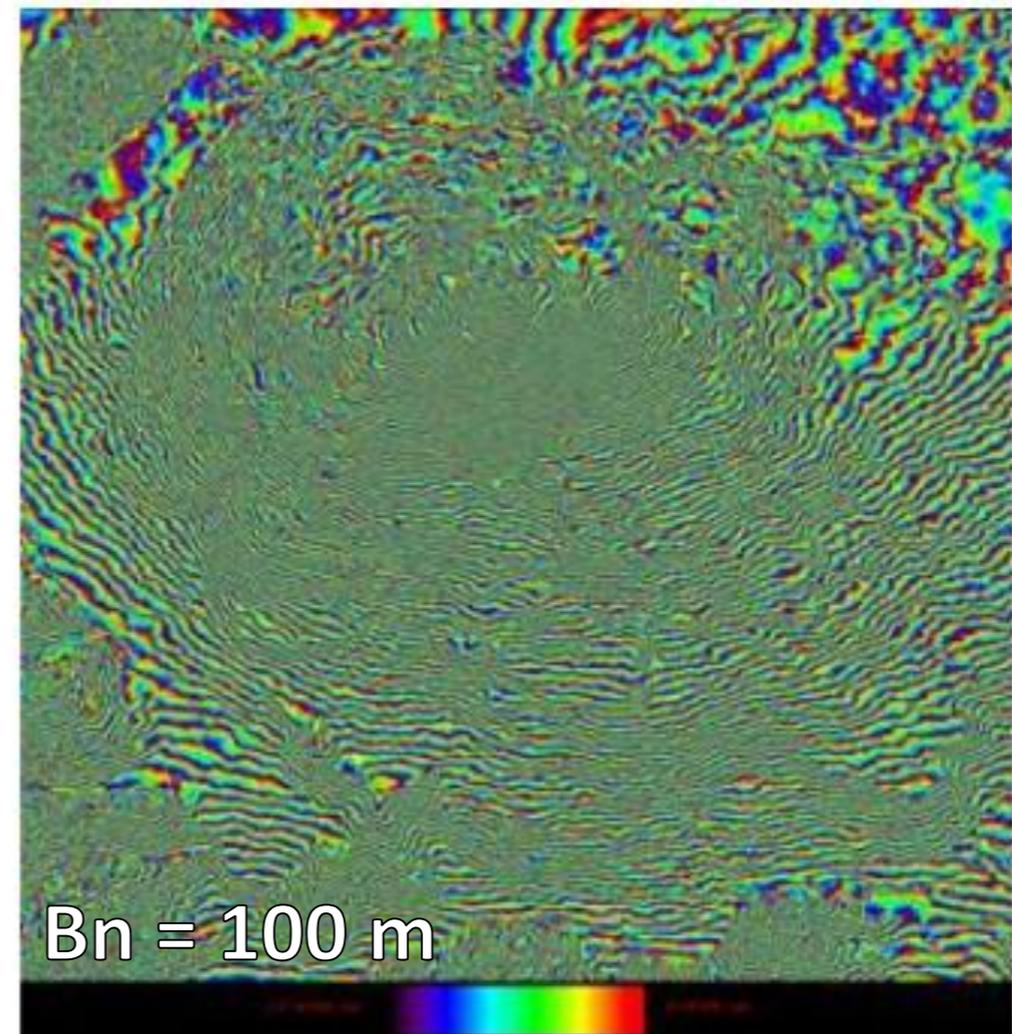
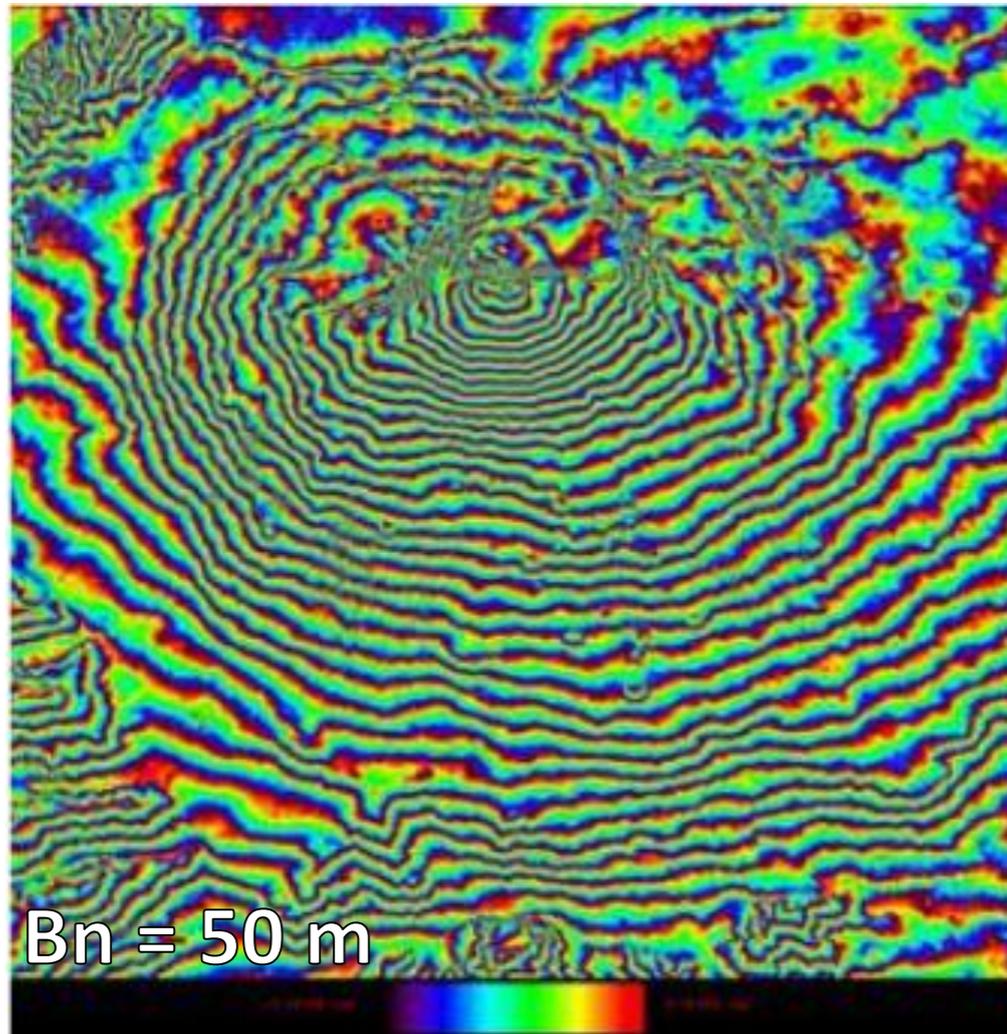


Terremoto agosto 2016  
 Centro Italia  
 (Accumoli - Amatrice)

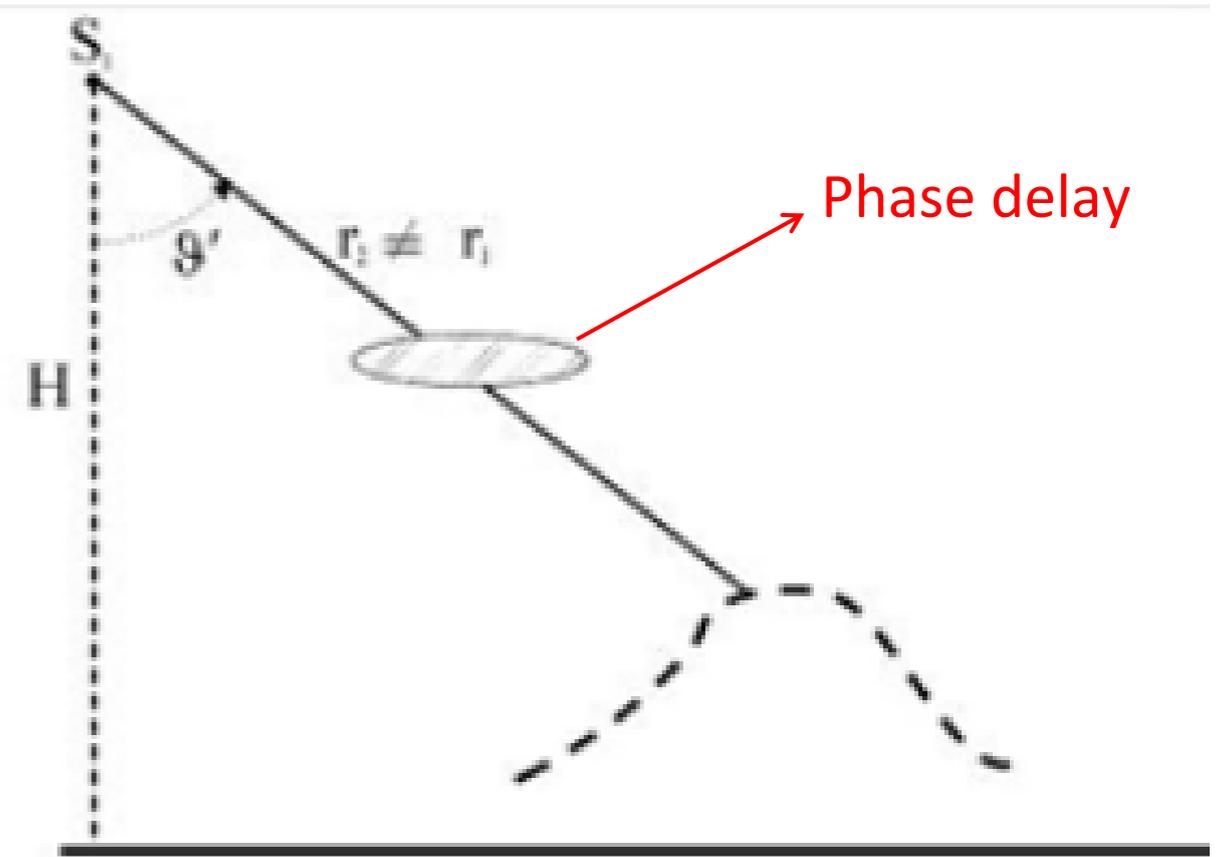
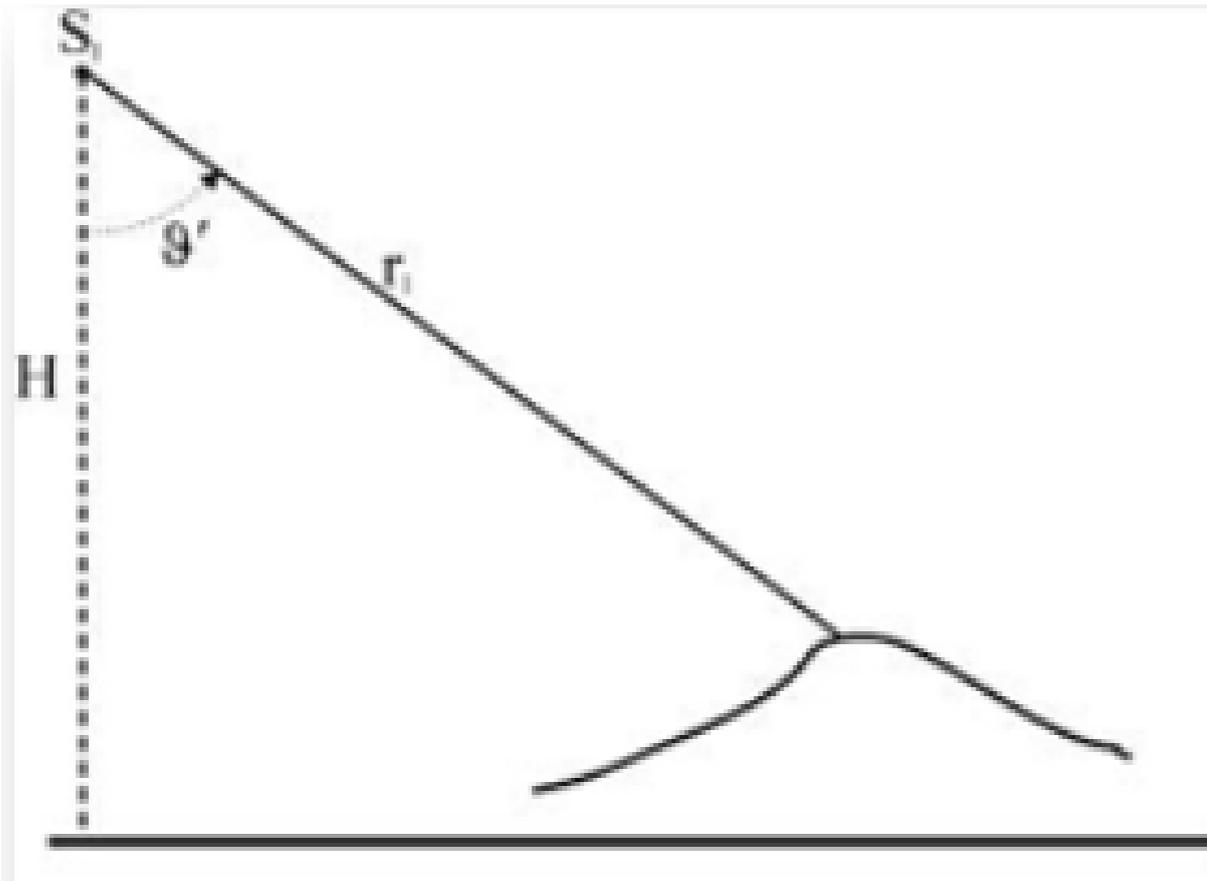


# Fase topografica

- La topografia crea distorsioni, “false frange”, negli interferogrammi, che possono simulare il movimento del terreno
- Più la baseline perpendicolare ( $B_n$ ) del sensore è grande minore sarà la spaziatura delle frange.
- Con una  $B_n$  di 100 m, utilizzando un DEM a 90m, l'errore topografico è di circa 2 mm.

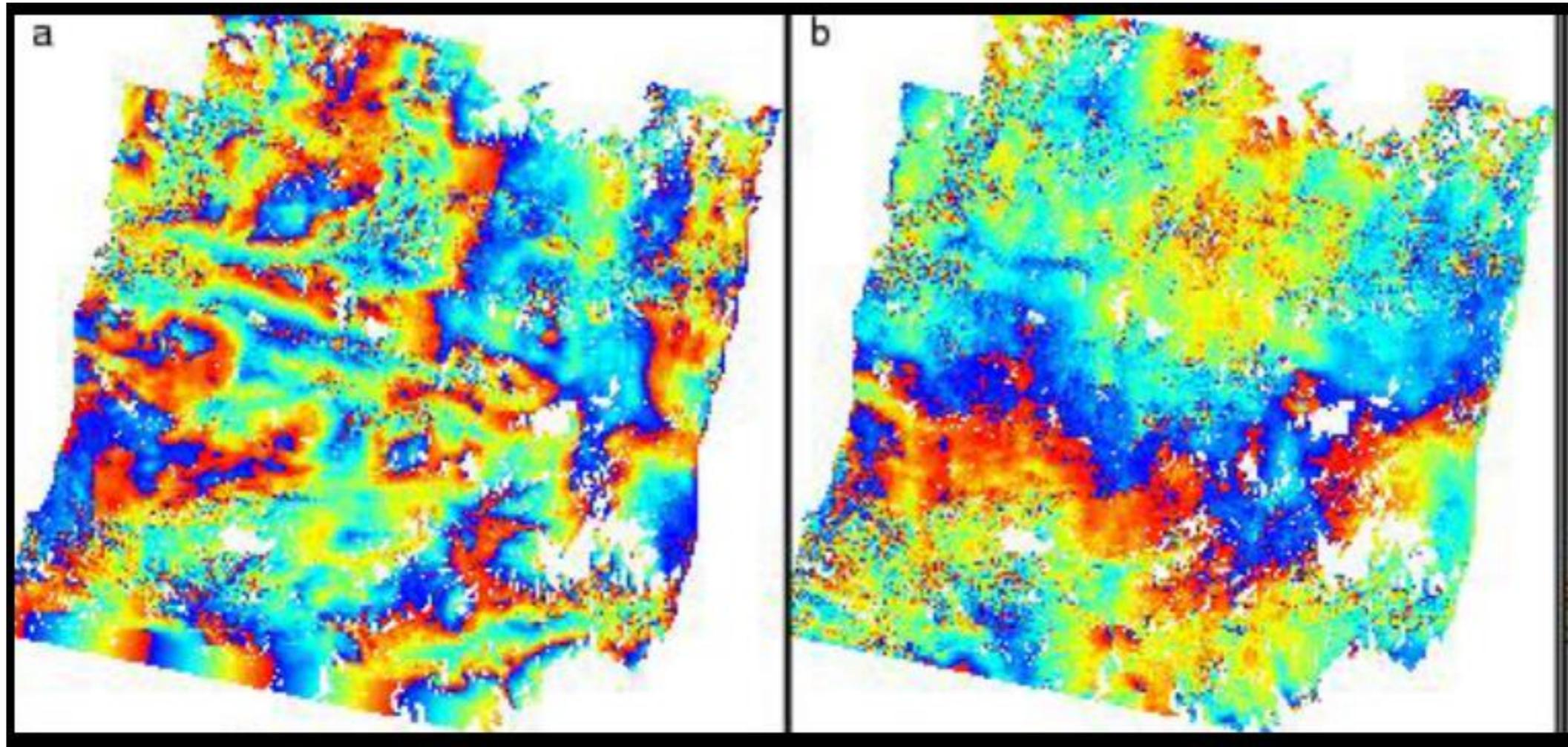


# Fase atmosferica



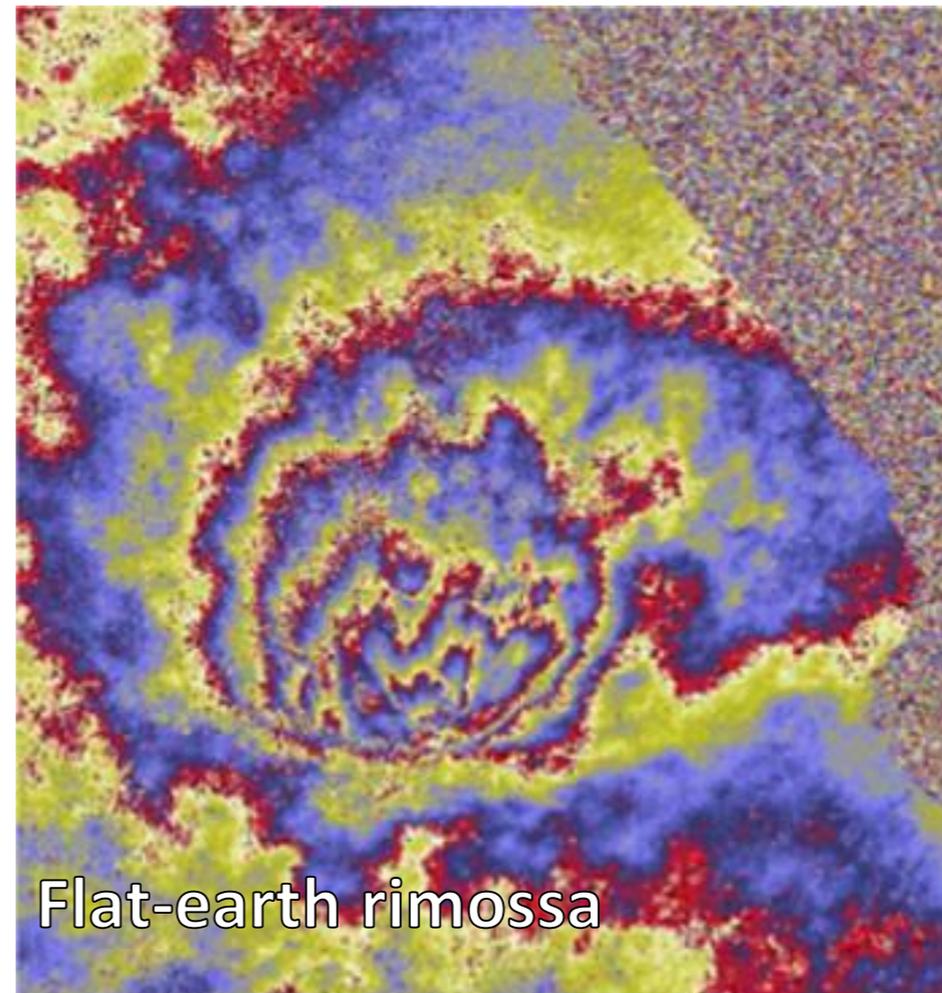
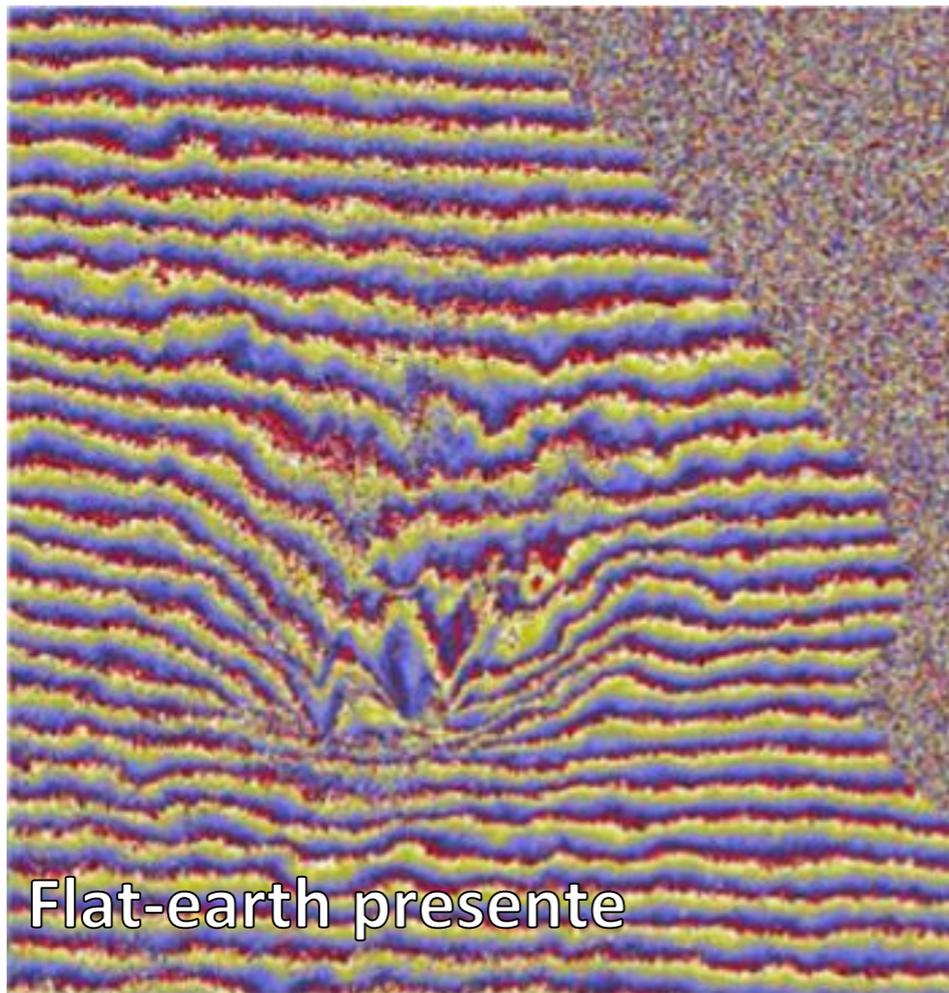
- L'atmosfera crea un *delay* fittizio nel segnale di ritorno. Aumentando il tempo di ritorno viene sovrastimato il reale movimento;
- Il *delay* atmosferico dipende dalla banda usata. Bande corte (X o C) avranno problemi maggiori di quelle lunghe (L)

# Fase atmosferica



- La fase dovuta all'atmosfera può portare errori fino a 10 cm nella definizione degli spostamenti
- La fase atmosferica costituisce un segnale a bassa frequenza che deve essere rimosso o fortemente limitato
- Su aree vaste viene rimossa attraverso filtri specifici (Goldstein) o attraverso modelli meteorologici
- Su piccole aree può essere ignorata

# Fase “flat-earth”



- Fase ad andamento quasi-lineare dovuta alla geometria di acquisizione
- Rappresenta la differenza di fase in assenza di topografia
- Conoscendo la superficie topografica viene facilmente rimossa, essendo un segnale riconoscibile e pressoché costante

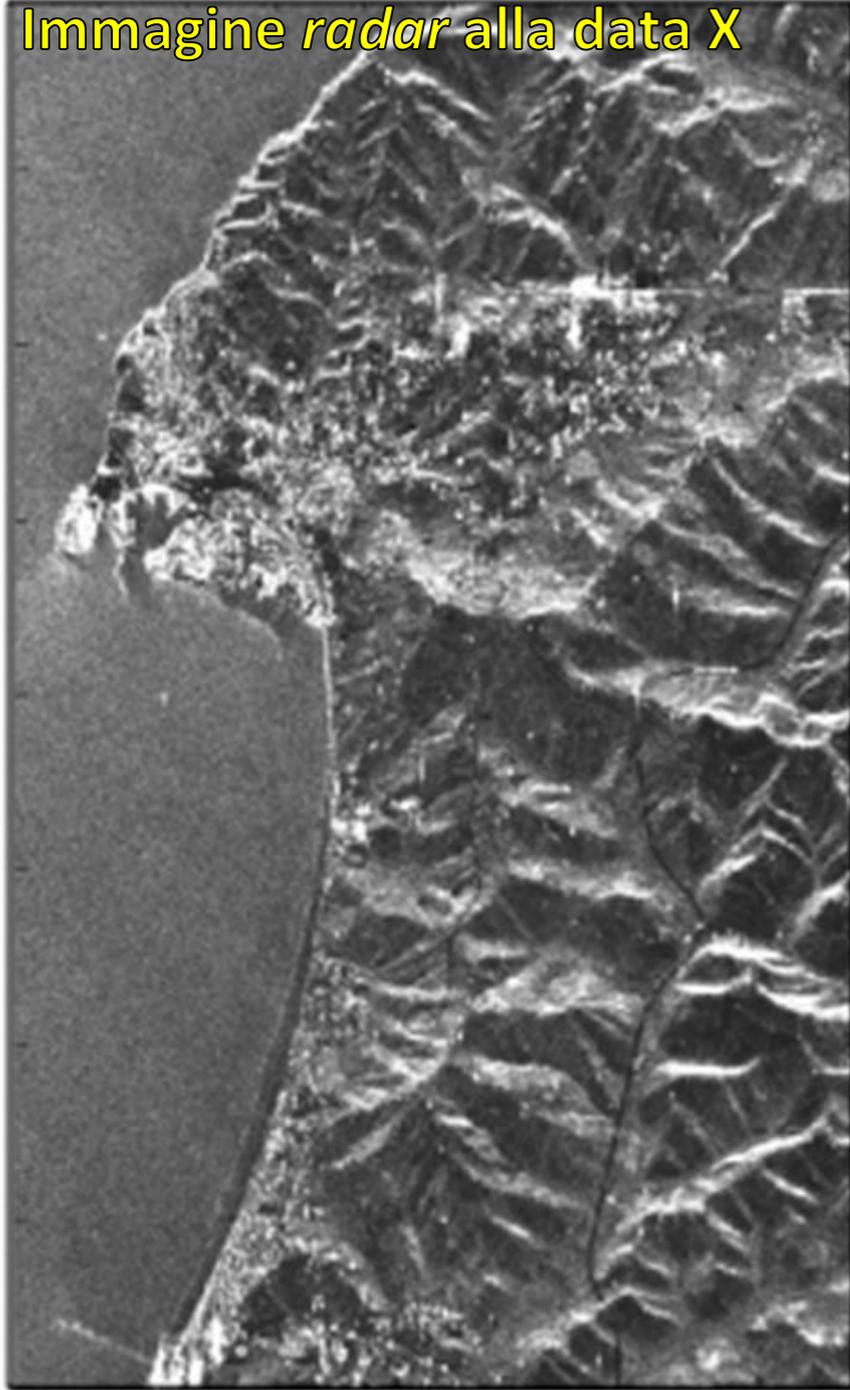
# Rumore



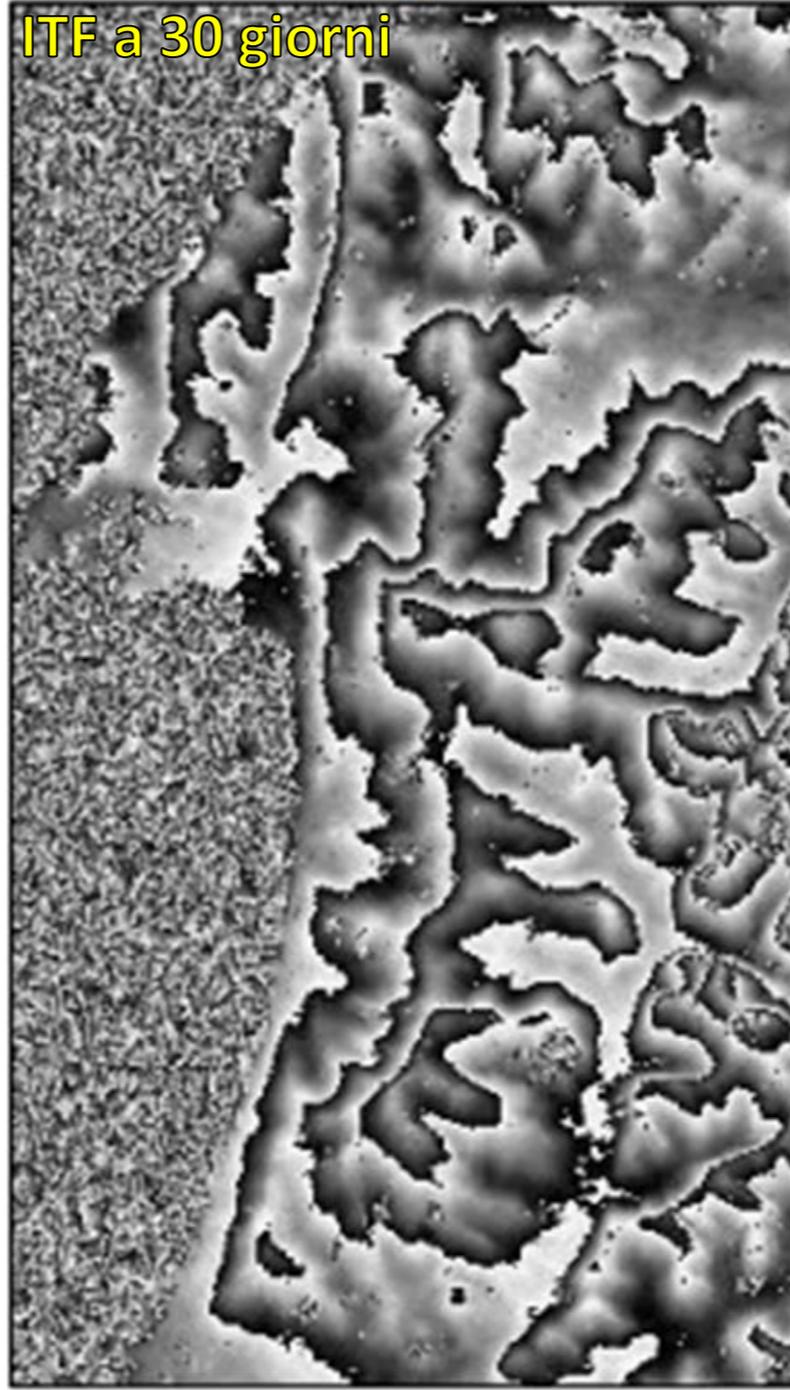
- Si limita lavorando in aree “coerenti” dell’interferogramma
- La coerenza è funzione del tipo di superficie, lunghezza d’onda del sensore, intervallo temporale dell’interferogramma, stagione, meteo/umidità del terreno, etc
- Maggiore è l’intervallo temporale dell’interferogramma (baseline temporale) minore è la coerenza delle superfici e quindi maggiore è il rumore

# Rumore - Baseline temporale

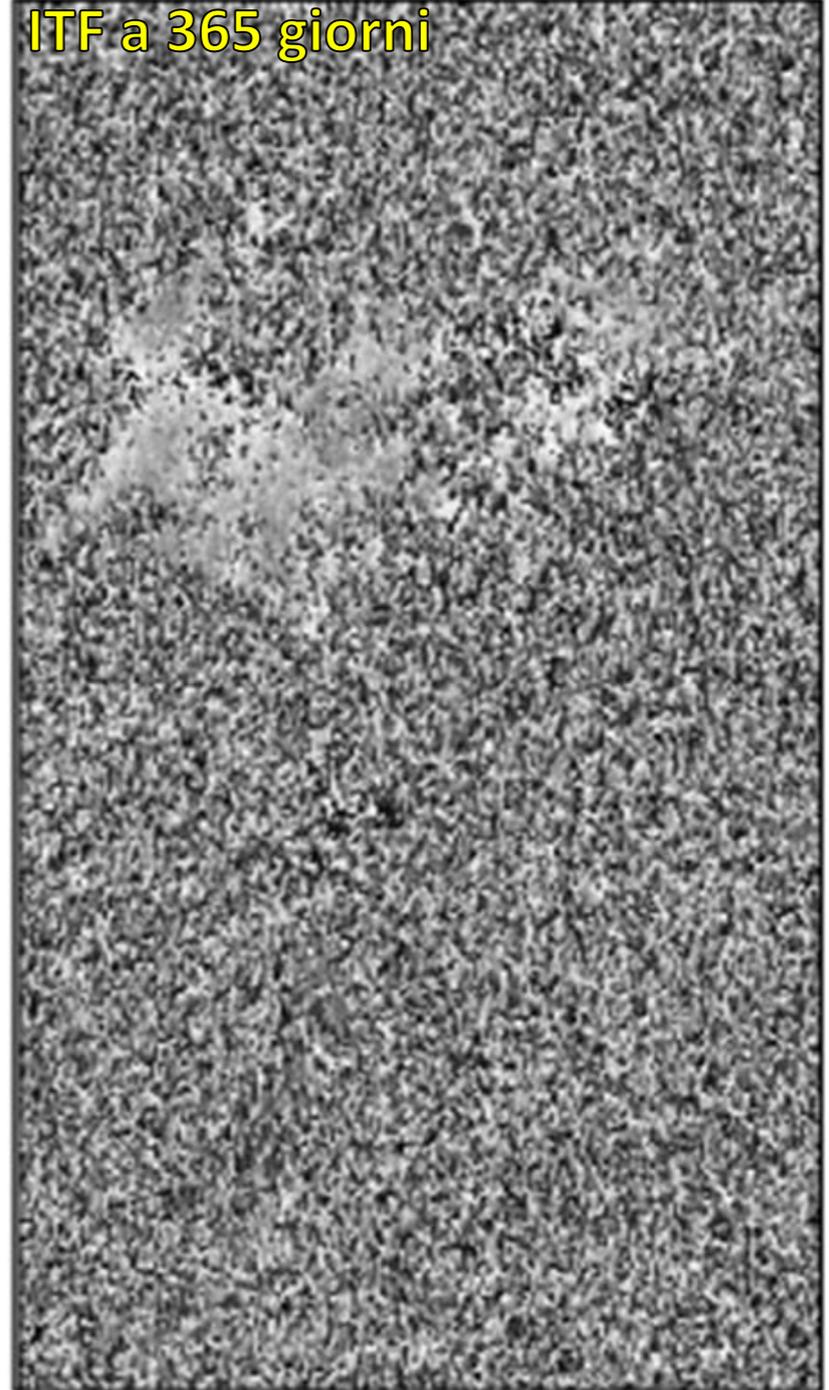
Immagine *radar* alla data X



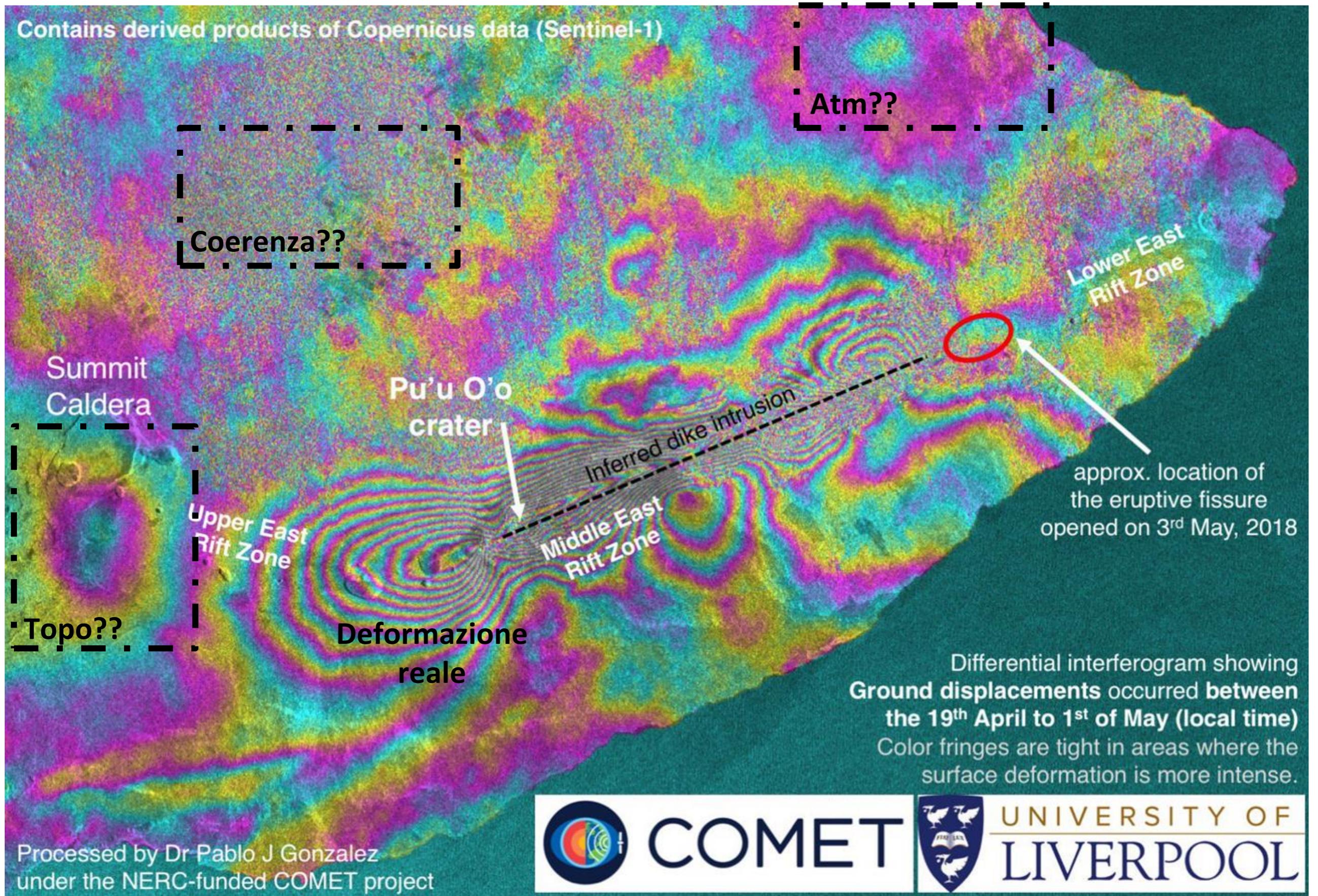
ITF a 30 giorni



ITF a 365 giorni

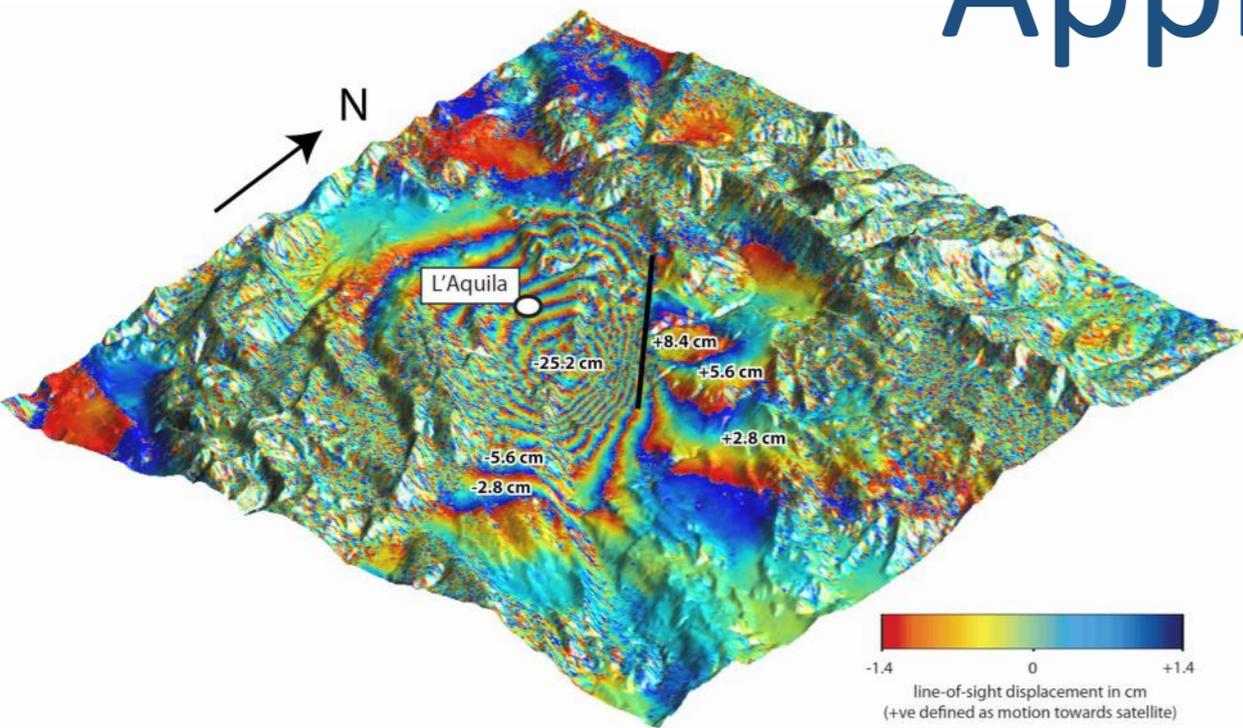


# Risultato - Problematiche

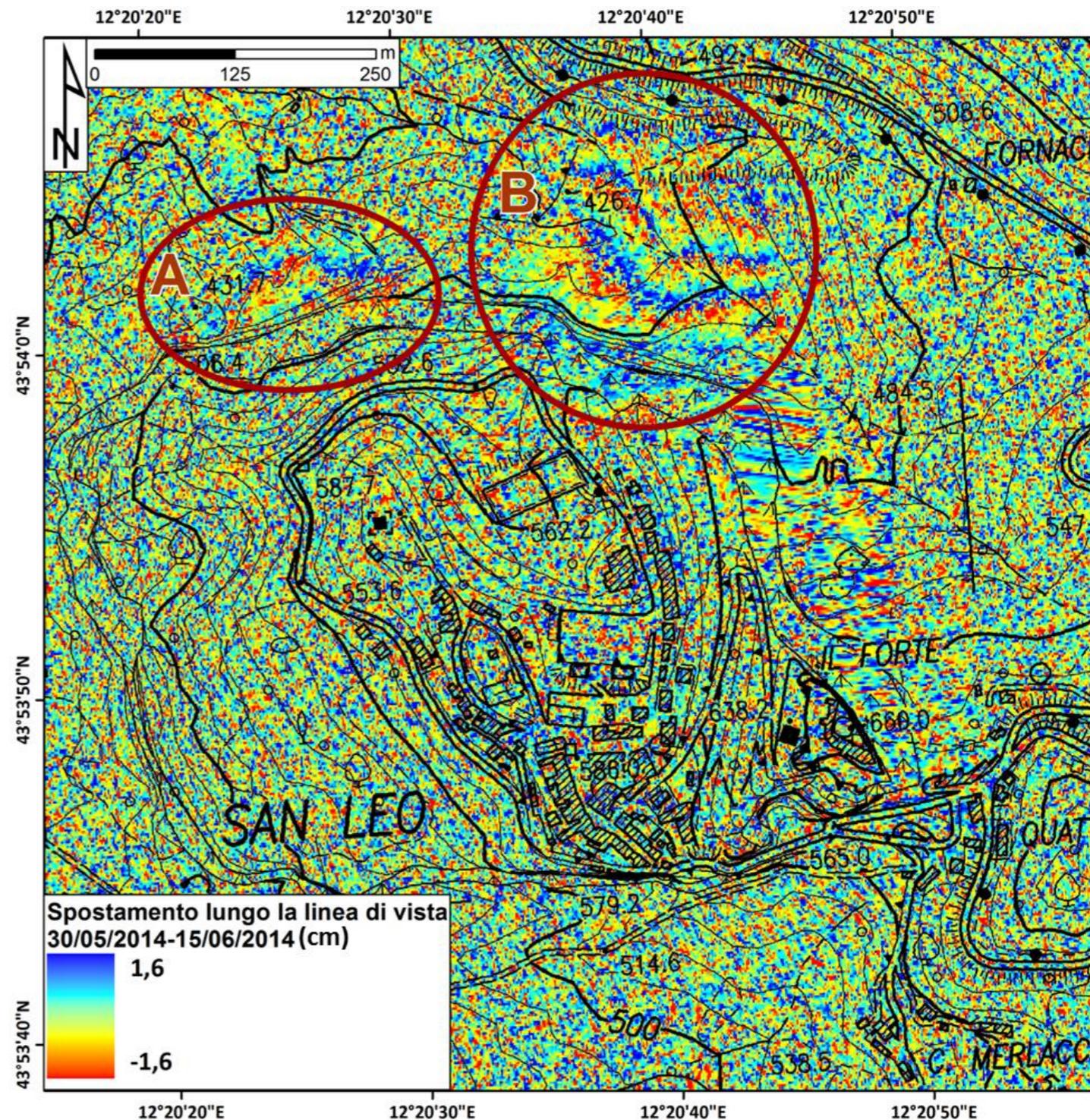
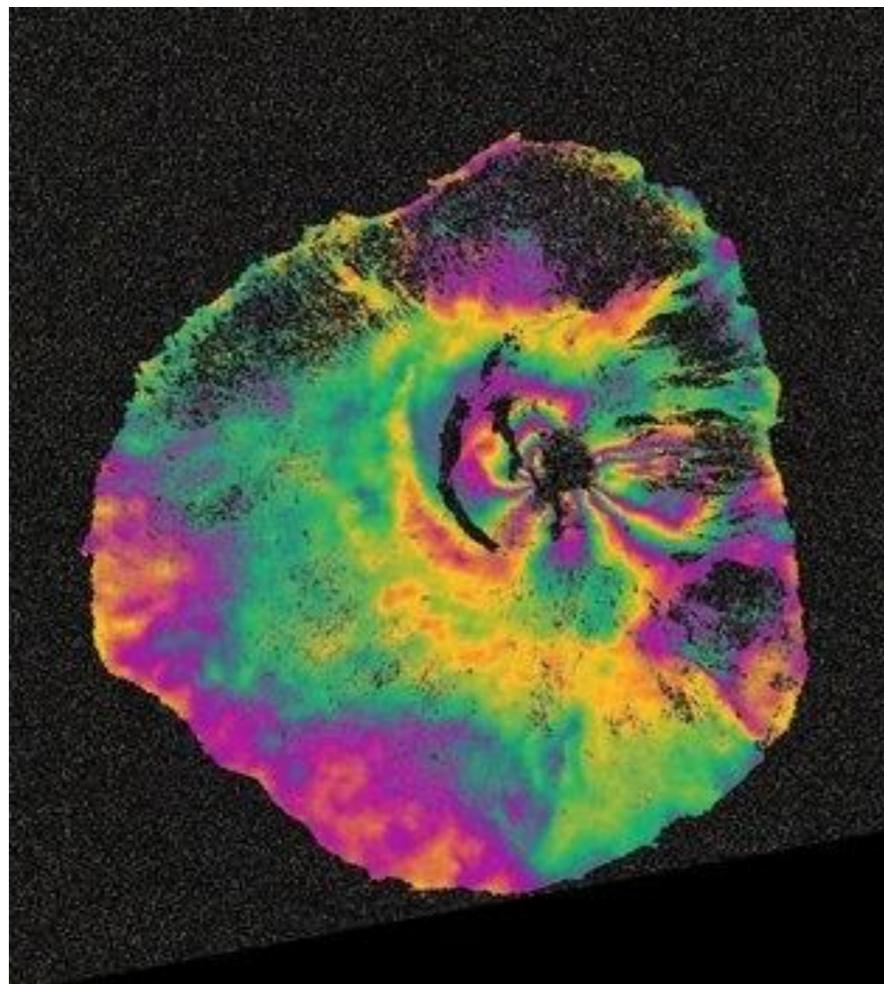


# Applicazioni

Individuazione e mappatura di singoli eventi legati a terremoti, frane ed eruzioni vulcaniche.



Vulcano Fogo eruzione 2015 - Capoverde (Africa)

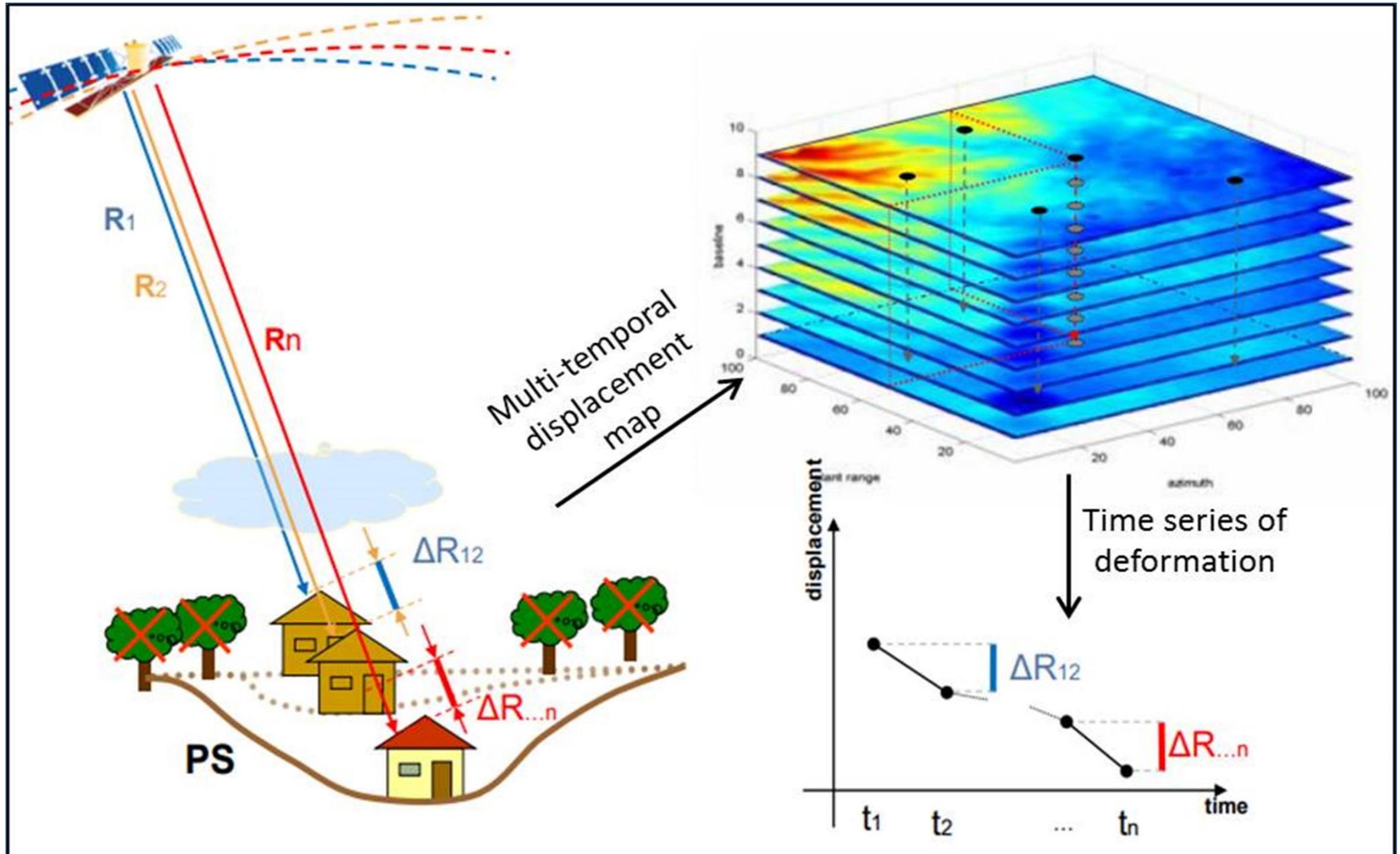


# Analisi multi-interferogramma PSInSAR & SqueeSAR

# Analisi multi-interferogramma

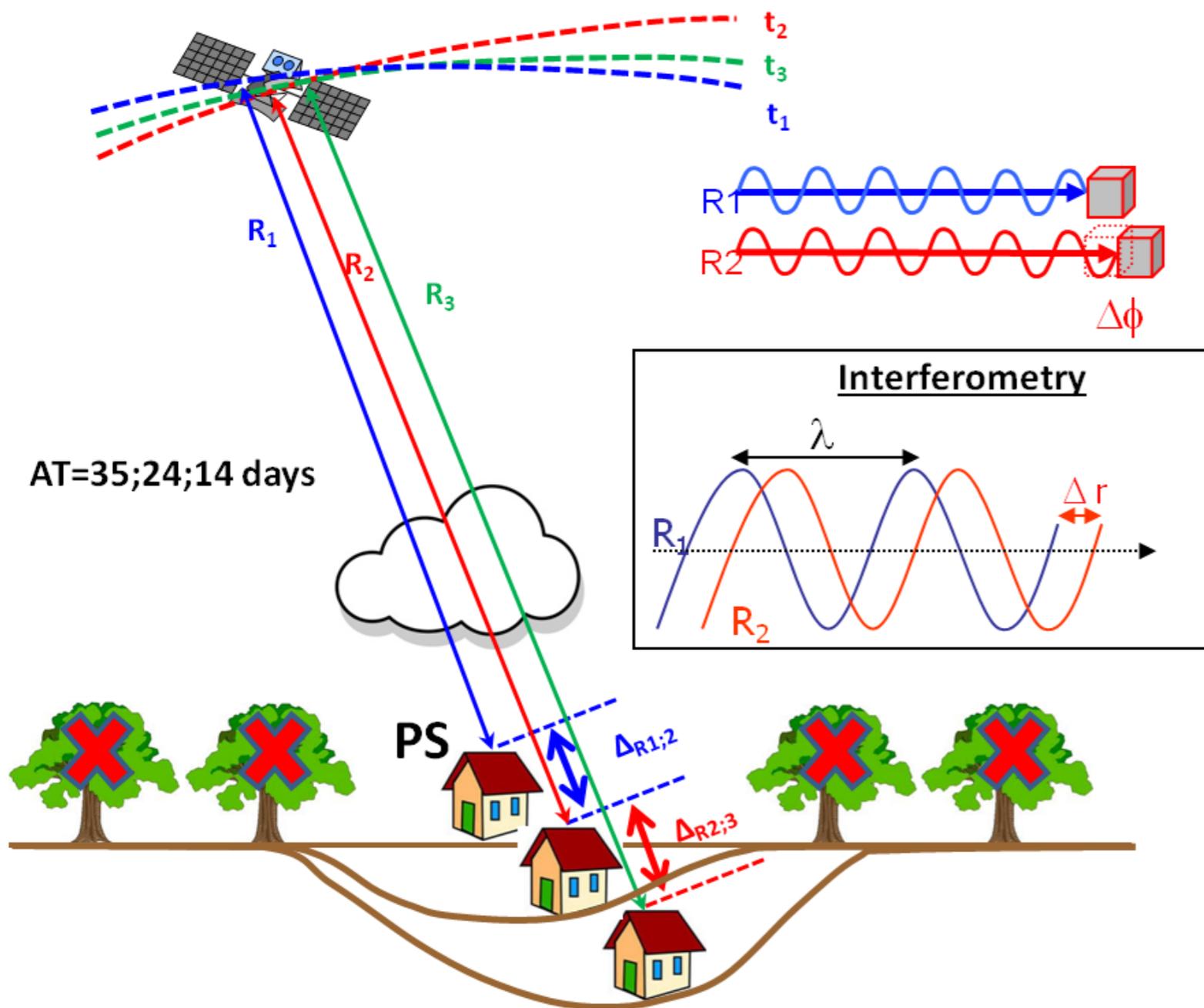
- L'approccio DInSAR ha due limitazioni principali:
  1. la perdita di coerenza temporale e spaziale determina la perdita di informazione;
  2. la non completa rimozione di artefatti topografici e atmosferici limita la corretta interpretazione dei risultati ottenibili.
- Le tecniche multi-interferogramma permettono di risolvere parzialmente o totalmente questi problemi grazie a:
  1. utilizzo di lunghe serie di immagini *radar* (almeno 30);
  2. identificazione di bersagli coerenti non affetti da problemi di decorrelazione;
  3. stima più facile della componente atmosferica;
  4. forte riduzione del rumore di fondo.

# Concetto base



- L'approccio multi-interferogramma si basa su analizzare molte immagini *radar*, creando un network di centinaia di interferogrammi;
- Per alcuni punti coerenti (PS/DS) vengono estratti i valori di spostamento riferiti ad ogni interferogramma e quindi a ogni data di acquisizione in modo da creare delle serie temporali

# Analisi multi-interferogramma



$$T_1 - R_1$$

$$T_2 - R_2 - \Delta_{R1;2}$$

$$T_3 - R_3 - \Delta_{R2;3}$$

Misura le differenze di fase di ogni *target*

I punti di misura sono chiamati

**PS, Persistent Scatterer**

- PS sono risultati dell'elaborazione di *stack* di immagini SAR
- **Spostamento** (mm) and **velocità di movimento** (mm/year) sono misurati lungo la linea di vista del satellite (*LoS - Line of Sight*)
- Analisi da fare separatamente per entrambe le orbite (asc e desc)

# Algoritmi

PSI method	Main references
PSInSAR (Permanent Scatterers Interferometry)	Ferretti et al., 2000, 2001
SBAS (Small Baseline Subset)	Berardino et al., 2002
CPT (Coherent Pixels Technique)	Mora et al., 2003; Blanco et al., 2006
Modified SBAS	Schmidt & Burgmann, 2003
IPTA (Interferometric Point Target Analysis)	Werner et al., 2003
SPN (Stable Point Network)	Duro et al., 2003; Crosetto et al., 2008
StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers)	Hooper et al. 2004
STUN (Spatio-Temporal Unwrapping Network)	Kampes, 2006;
PSP (Persistent Scatterers Pairs)	Constantini et al., 2008, 2014
DePSI (Delft Persistent Scatterer Interferometry)	Ketelaar, 2009
SqueeSAR	Ferretti et al., 2011
WAP (Wide Area Product)	Adam et al., 2011
SARproZ	Perissin & Wang, 2012
MInTS (Multiscale InSAR Time Series)	Hetland et al., 2012
Distributed Scatterers approach	Goel & Adam, 2014
Modified SqueeSAR	Lv et al., 2014
CPS (Cousin PS)	Devan���ry et al., 2014

- Il concetto base   lo stesso
- Differiscono nel modo in cui i target sono scelti e in cui i parametri caratteristici dei punti misura sono calcolati

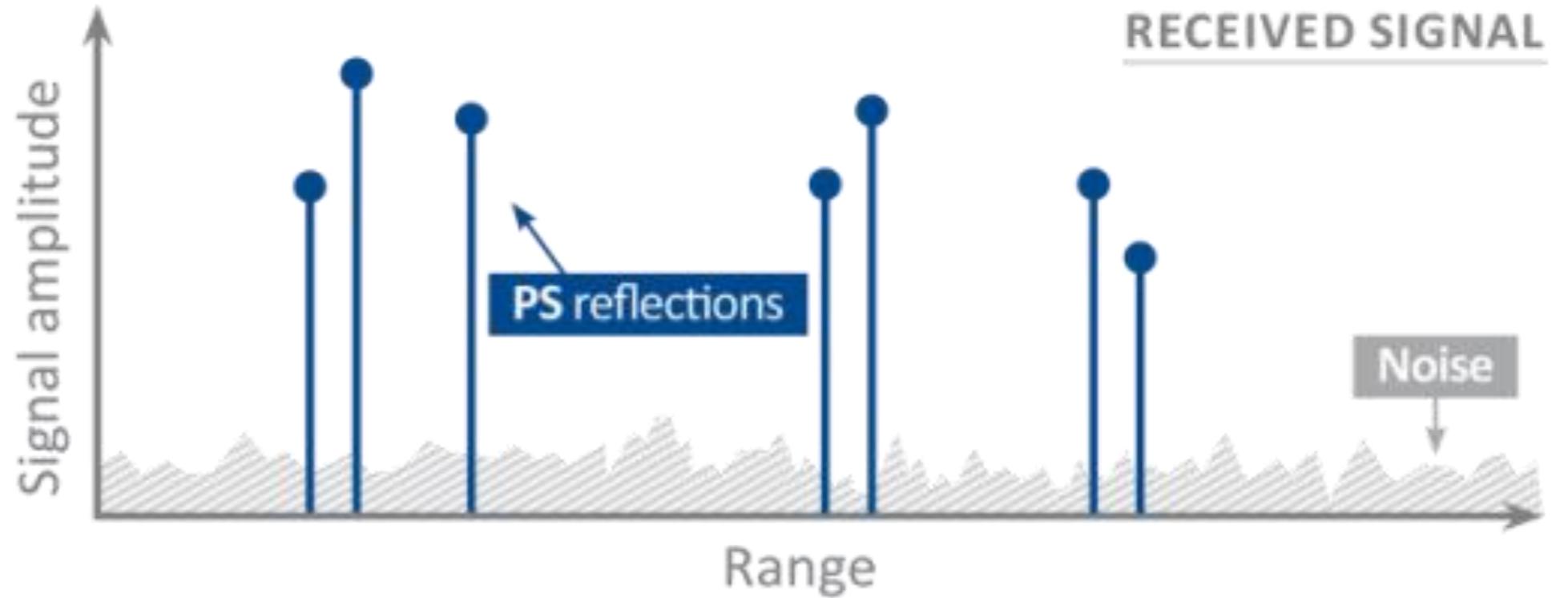
# Persistent Scatterers

Ferretti et al., 2001

“Permanent scatterers in SAR interferometry»

 PS

 No PS



PS - *Persistent Scatterers*

Punti a firma elettromagnetica stabile, coerenti in tutti gli interferogrammi

# PS ideali



# Non PS



Ossia tutte le superfici che cambiano stagionalmente

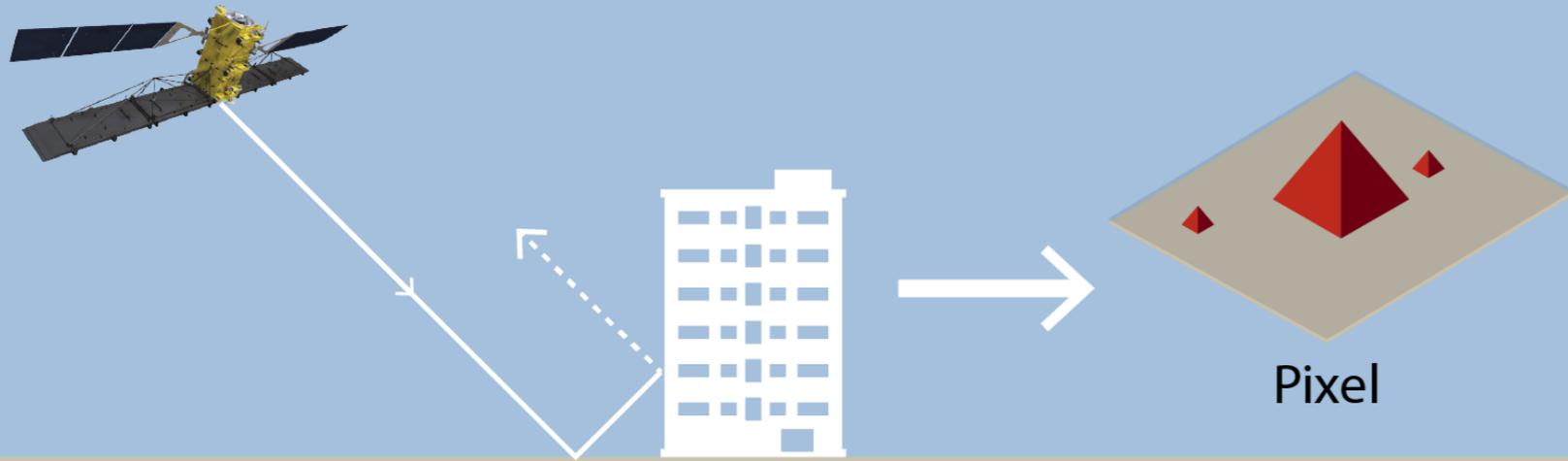
# Corner reflectors



# L'evoluzione: Distributed Scatterers

## Point Scatterer:

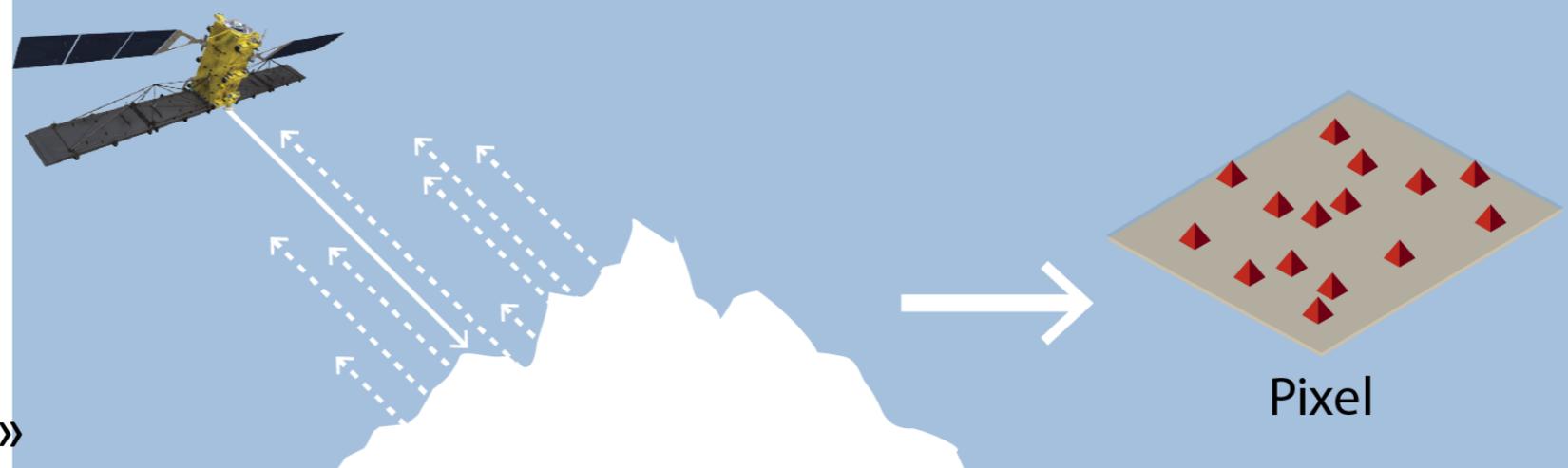
One pixel is dominated by a single large reflector



- Si passa da un target puntuale ad uno areale
- Aumenta molto la densità di punti in aree periurbane

## Distributed Scatterer:

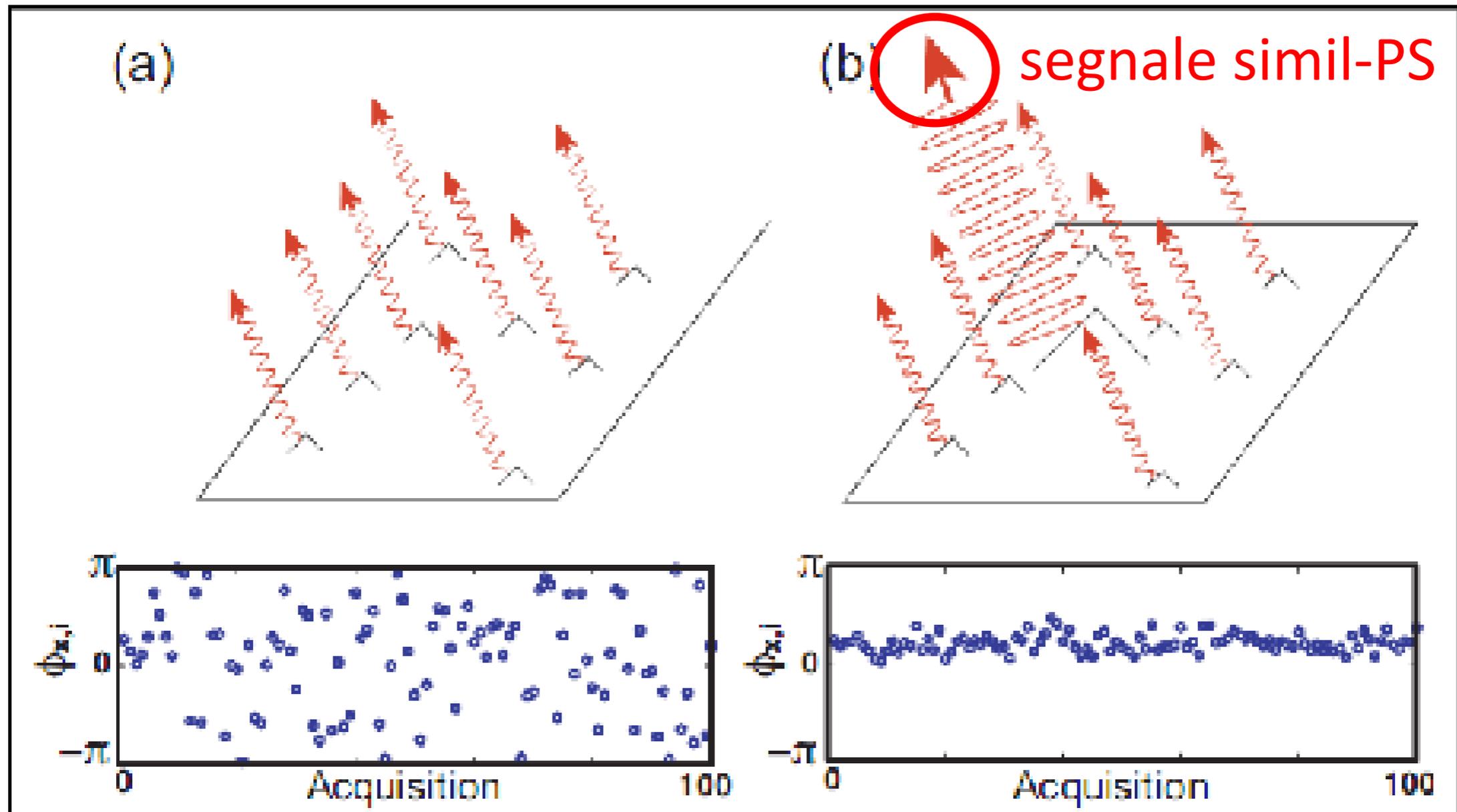
One pixel contains many small reflectors



Ferretti et al., 2001

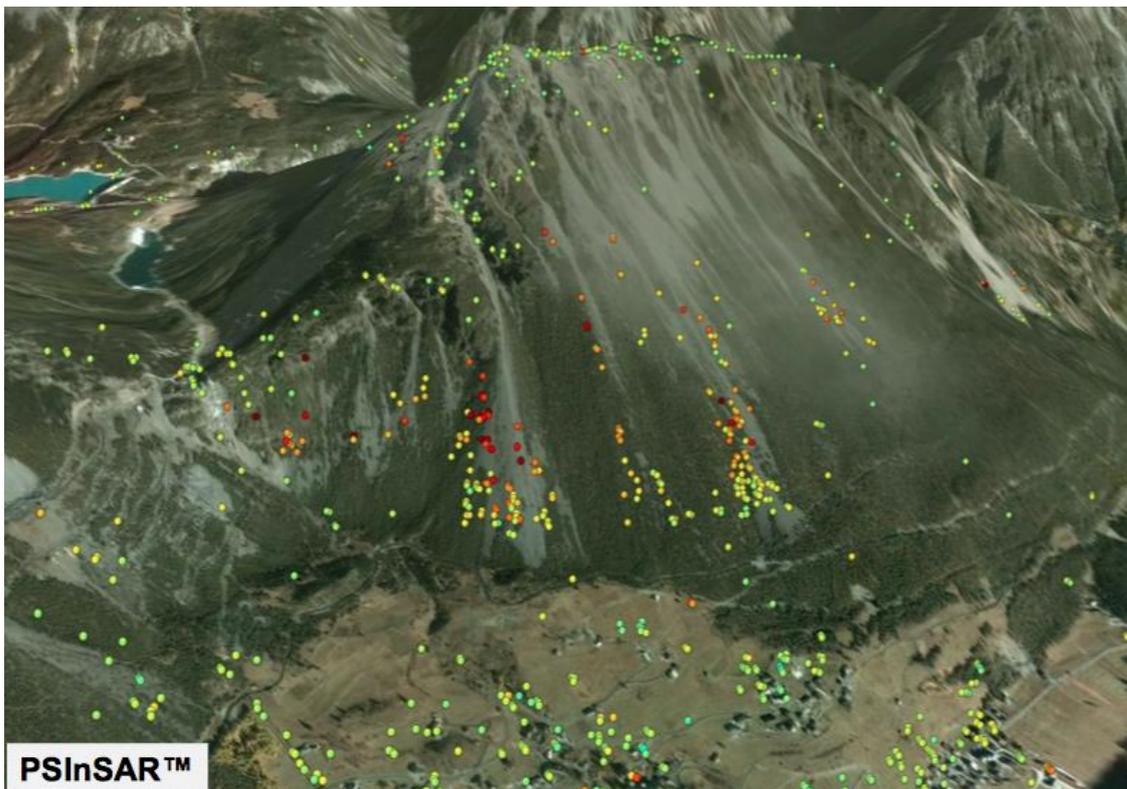
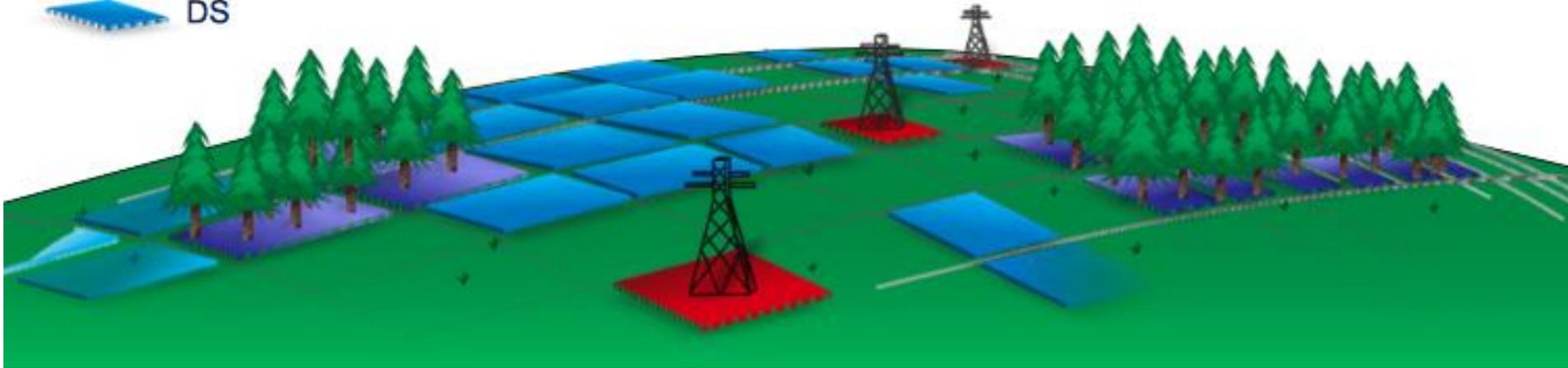
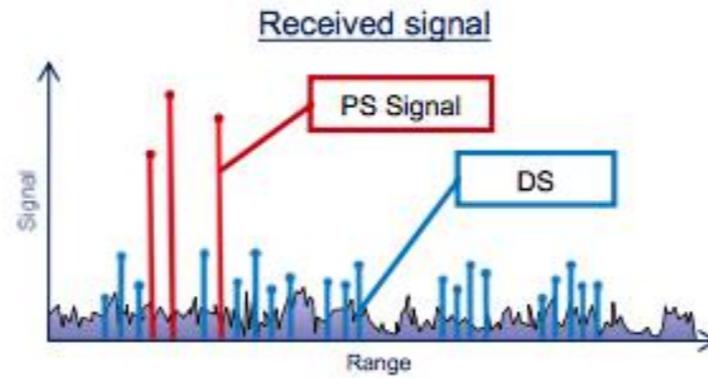
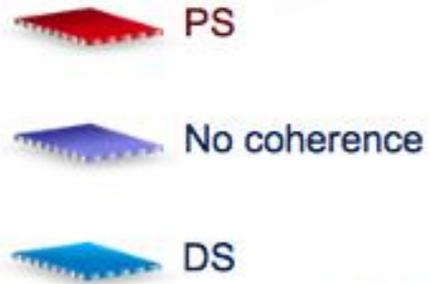
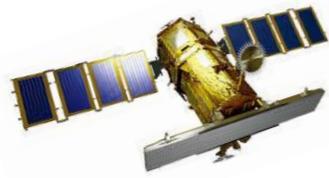
“A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR»

# Distributed Scatterers

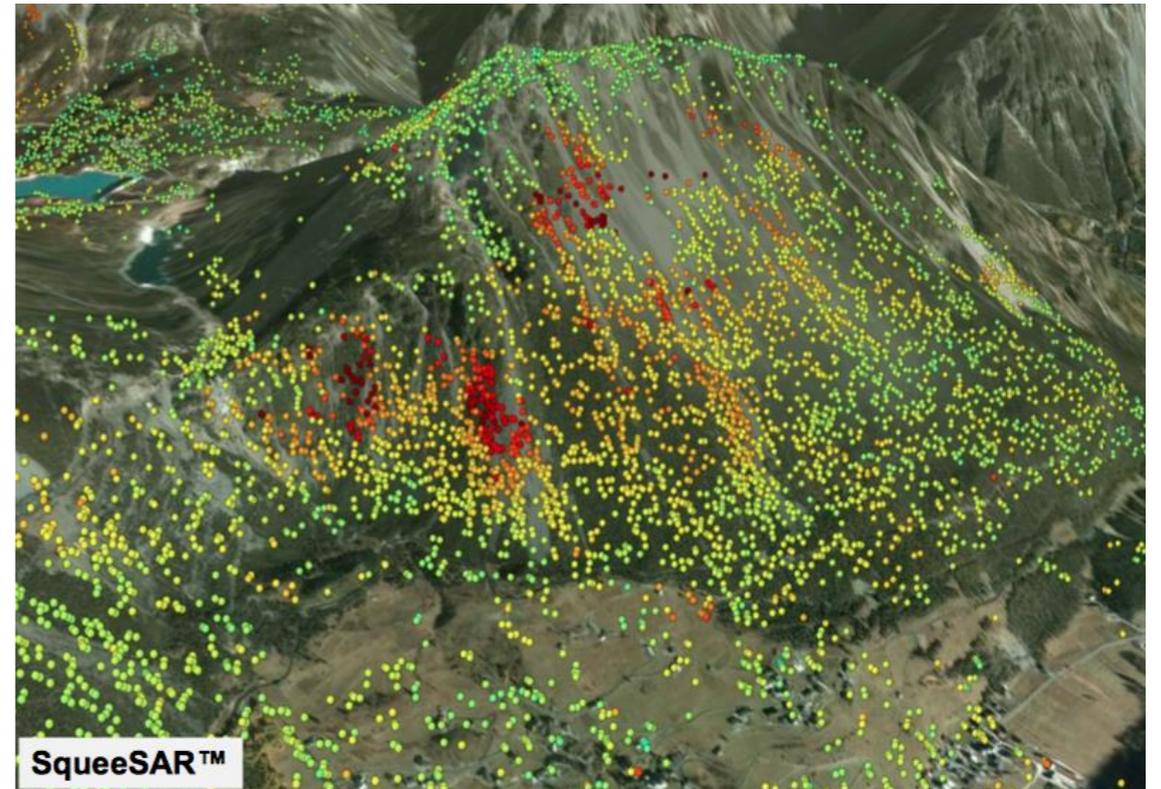


- Identificazione di punti in aree con segnale coerente ma non abbastanza forte da essere definito "PS" ma abbastanza netto da essere riconoscibile dal rumore;
- Attraverso test statistici vengono scelti punti con segnale simile in piccole aree;
- Questi segnali vengono "amplificati" in modo da creare PS sintetici, ossia i DS.

# PSInSAR vs SqueeSAR



VS



# PS - misure differenziali

- Le misure interferometriche sono DIFFERENZIALI, cioè riferite ad un punto di riferimento (*reference point*) comune per tutta l'area analizzata
- Il *reference point* viene scelto sulla base della conoscenza del sito, delle informazioni ancillari e della disponibilità di dati di monitoraggio pregressi
- Il punto deve essere assolutamente stabile (velocità prossima allo zero) e a coerenza molto elevata ( $> 0.9$ ).

# Reference point

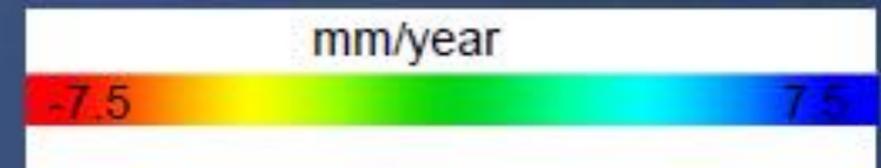
Importance of the reference point.

Average annual displacement rates

Reference point STABLE

ERS 1996-2000

Barcelona



# Reference point

Importance of the reference point.

Average annual displacement rates

Reference point IN ABBASSAMENTO

ERS 1996-2000

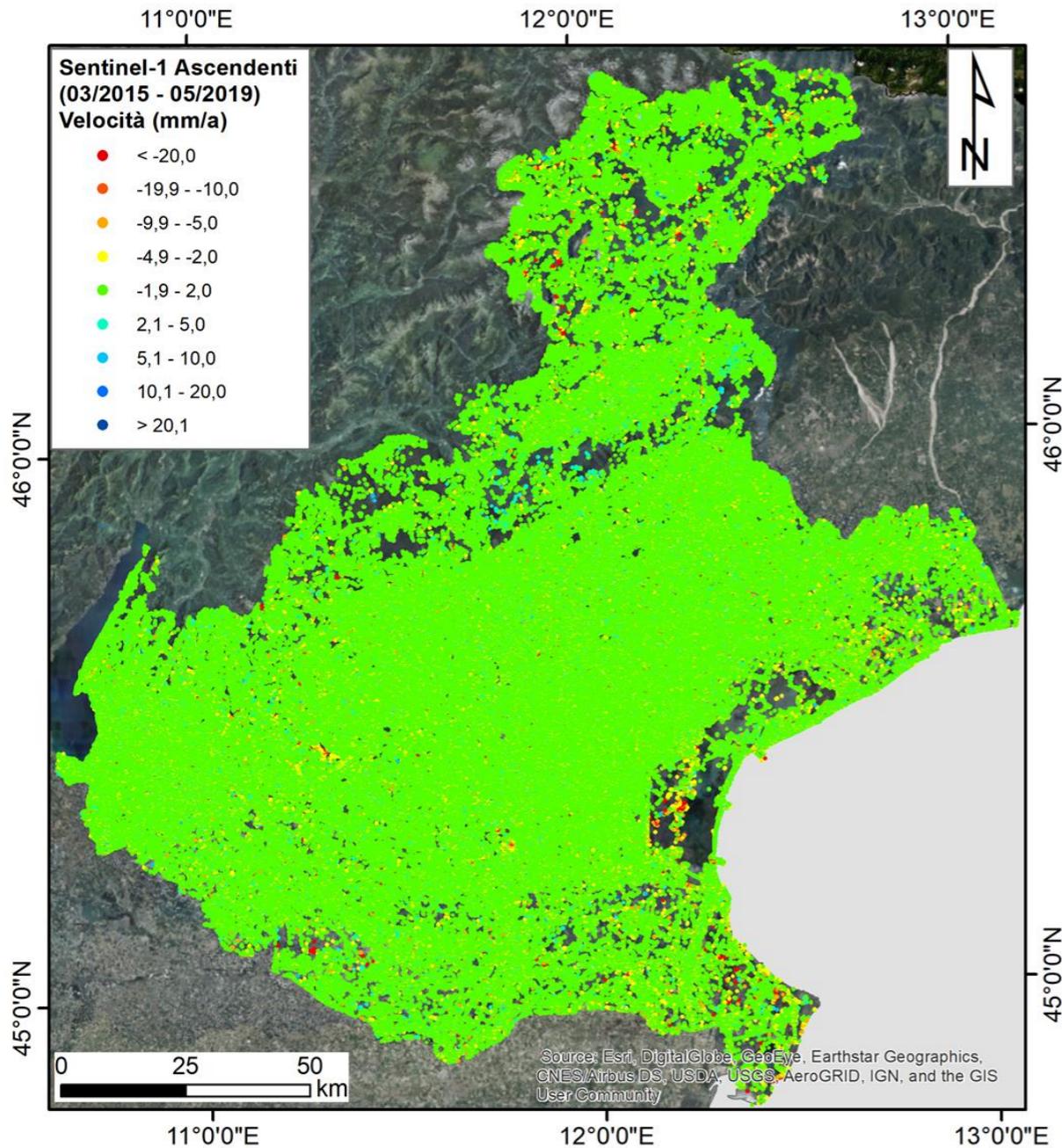
Barcelona

mm/year

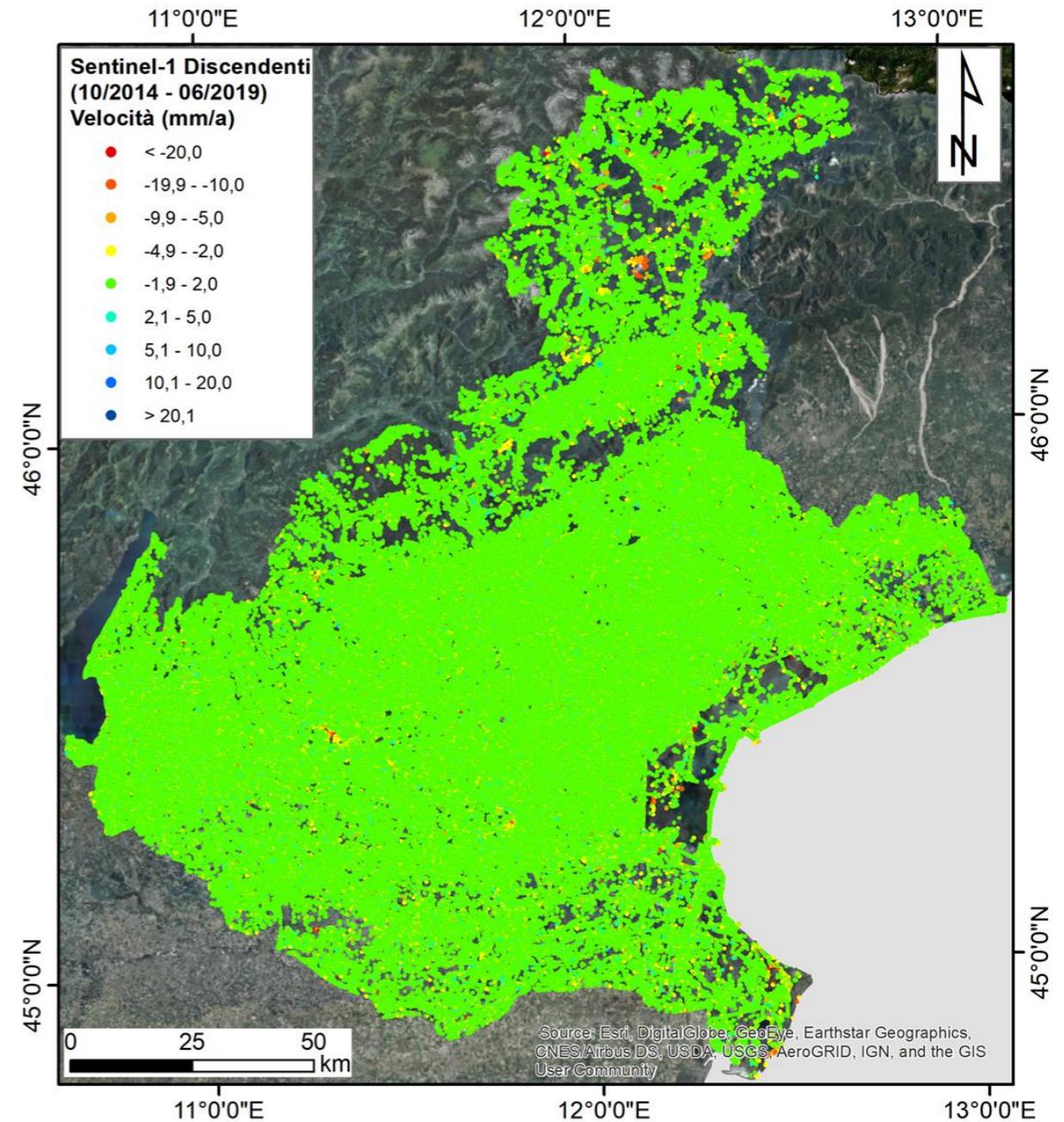
-7.5 7.5

# Prodotti ottenibili

## Geometria ascendente



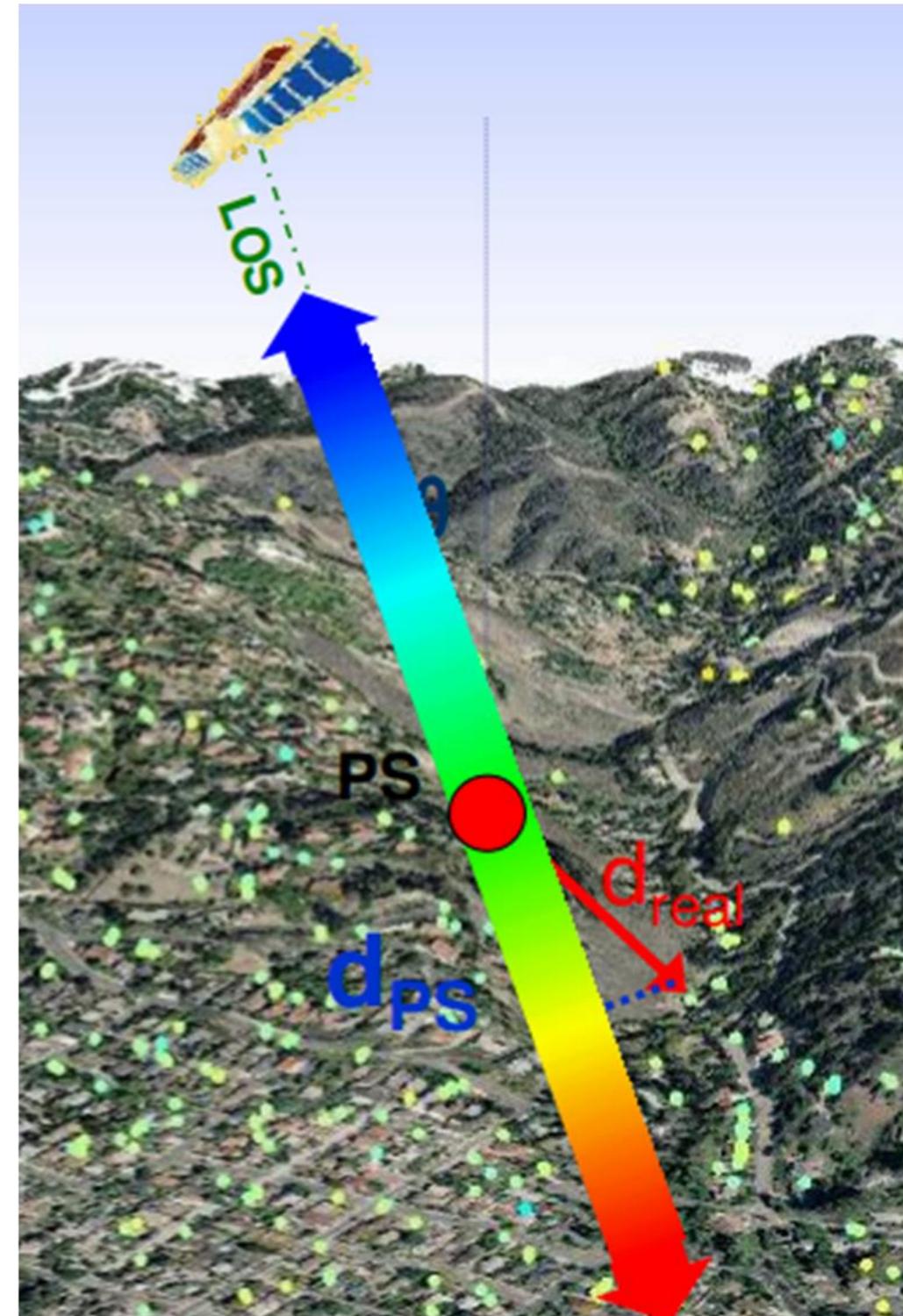
## Geometria discendente



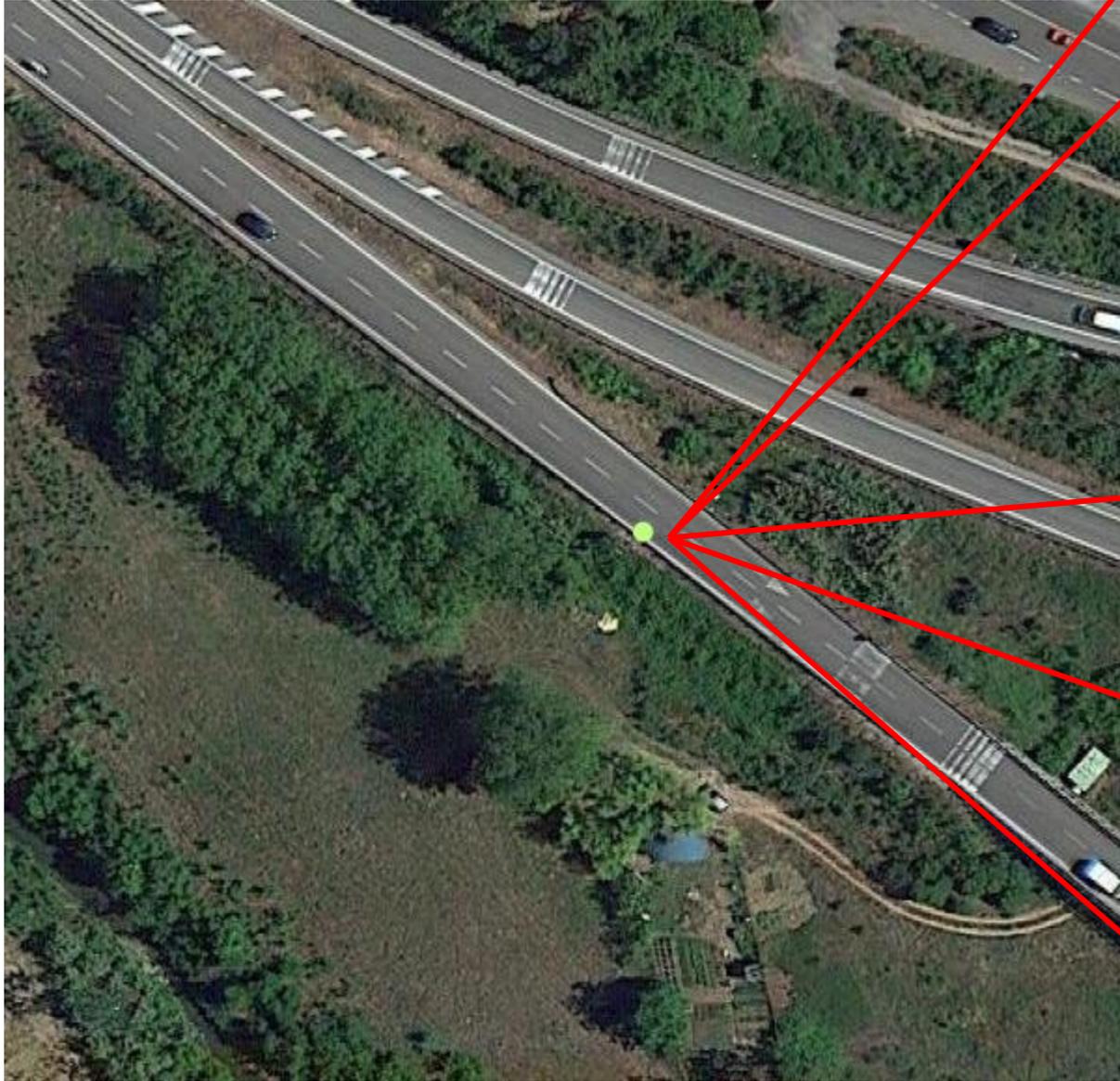
- La mappa di velocità classifica i singoli PS sulla base del valore di velocità media annua
- Il valore di velocità è calcolato sulla base di un modello lineare

# Mappe di deformazione – Come si leggono

- Il colore **verde** indica la “stabilità” del punto. Il range (es.  $\pm 2$  mm/a) viene definito sulla base della deviazione standard del dato
- Il colore **rosso** indica un movimento in allontanamento rispetto al sensore
- Il colore **blu** indica un movimento in avvicinamento al sensore



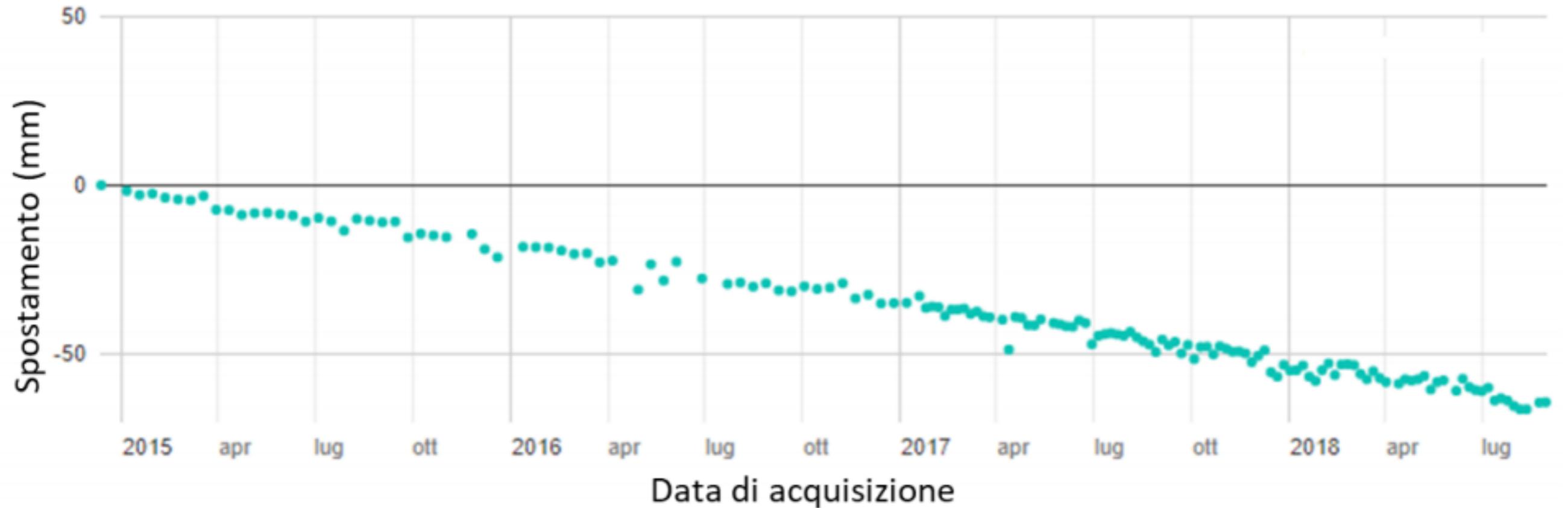
# Prodotti ottenibili



1. Codice identificativo univoco del PS
2. Quota del punto e sua deviazione standard. La quota viene calcolata rispetto al DEM utilizzato in fase di analisi del dato.  
Precisione: qualche metro
3. Velocità del punto e sua deviazione standard. Precisione: 2 mm/anno
4. Valore di coerenza della serie temporale, ossia quanto la serie si discosta dal modello lineare
5. Valori di spostamento alle singole acquisizioni del satellite (N colonne per Y acquisizioni)

Informazioni ricavabili dal singolo PS

# Prodotti ottenibili



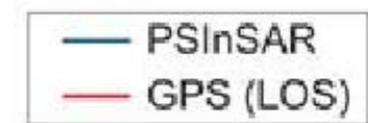
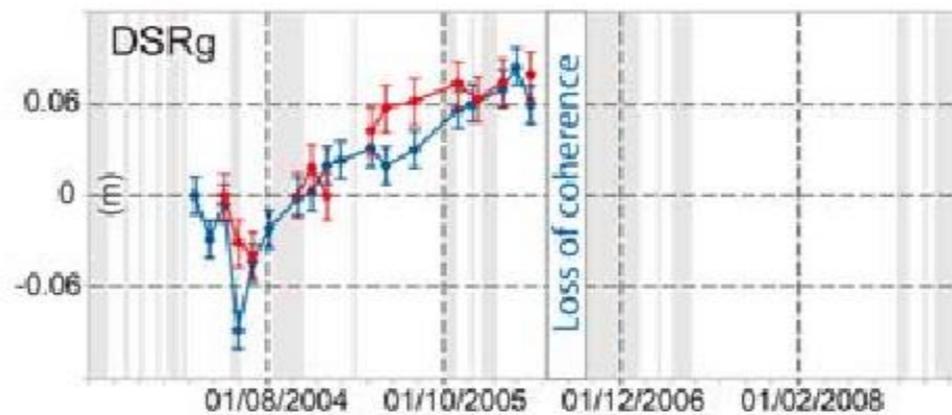
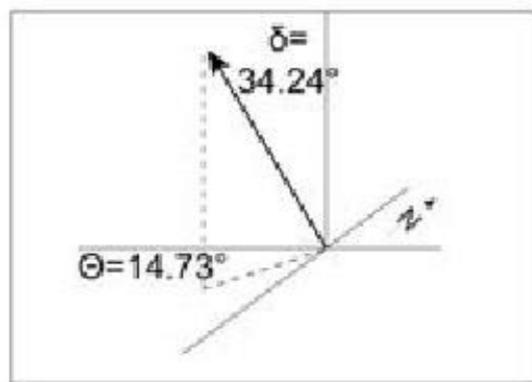
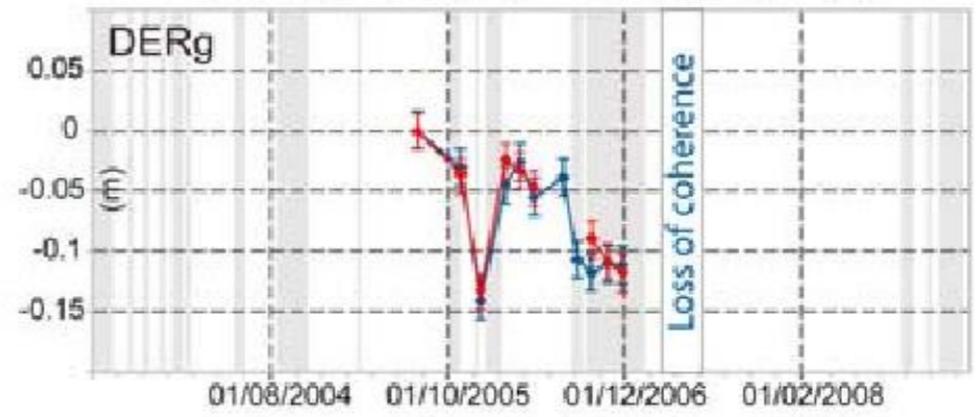
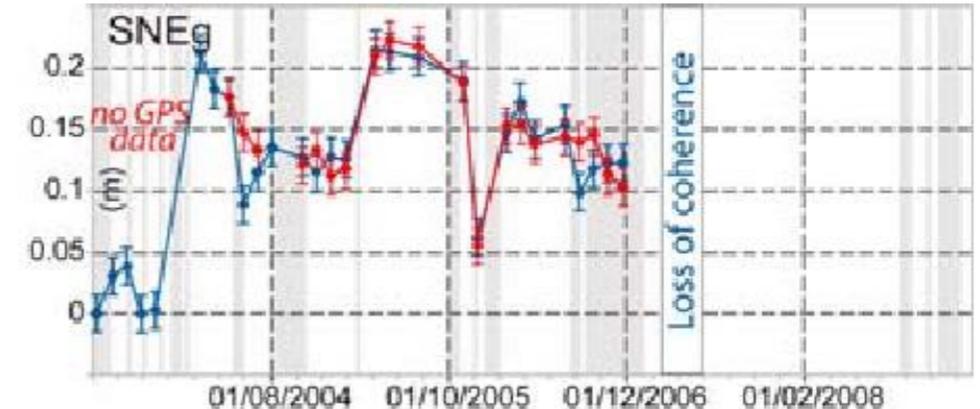
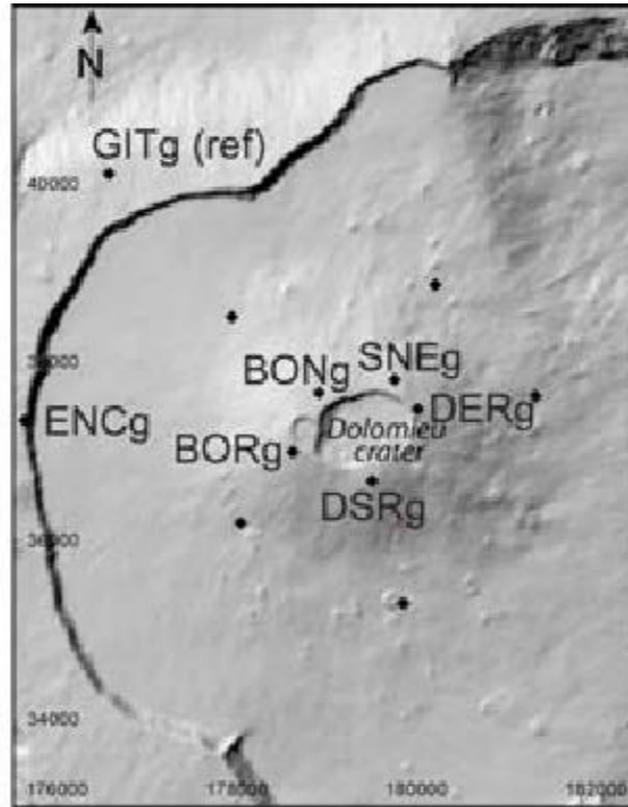
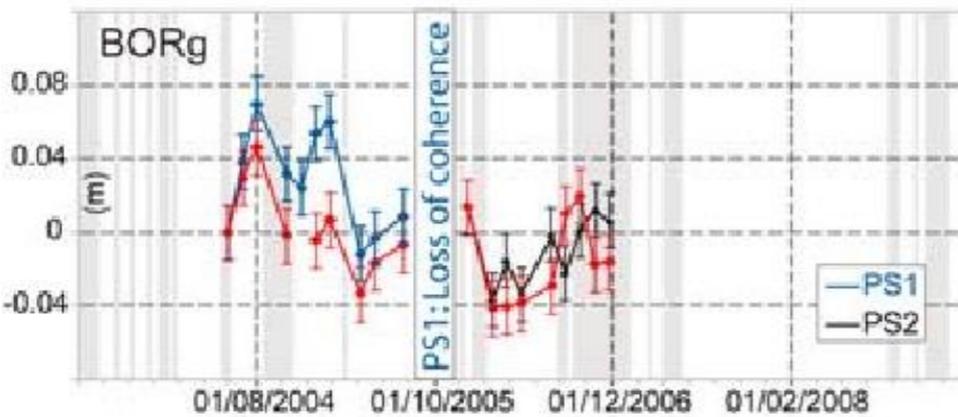
- Per ogni punto PS viene estratta la serie temporale, diagramma spostamento vs data di acquisizione
- Rappresenta l'andamento degli spostamenti del terreno/target in tutto il periodo di acquisizione

# Validazione dei risultati

Study site	Field complementary measurements	Period studied	Error <sup>a</sup>
Barcelona (Sant Feliu de Llobregat pilot site)	Levelling	2008–present	$\pm 2$ mm
Cambrils	Levelling	2008–present	$\pm 2$ mm
Cardona	GPS	1997–present	50 mm
Cardona	Levelling	2006–present	$\pm 1.2$ mm
Girona	Levelling	2008–2010	$\pm 2$ mm
La Palma	GPS	1994–2008	$\leq 10$ mm
La Unión	Levelling	2003–2004	$5.0 \pm 3.0$ mm
	Extensometers	2003–2010	–
Sabadell-Sant Quirze del Vallès	Levelling	2008–2010	$\pm 2$ mm
Sallent	Levelling	1997–2004	$< 2$ mm/year
	Extensometers	2004–2010	$\pm 0.1$ mm
	Inclinometers	2008–2010	0.01 mm/500 mm
	GB-SAR	2006–2007	
Santa Perpetua de Mogoda	Levelling	2008–present	$\pm 2$ mm
Súria	GPS	2006–2008	12 mm
Tenerife	GPS	1994–2007	$\leq 10$ mm
Vega Media of the Segura River Basin	Extensometers	2001–2005	$5.0 \pm 2.8$ mm
		2001–2007	$3.9 \pm 3.8$ mm
		2001–2003	$< 2.4$ mm
		2000–2007	$4.5 \pm 4.1$ mm

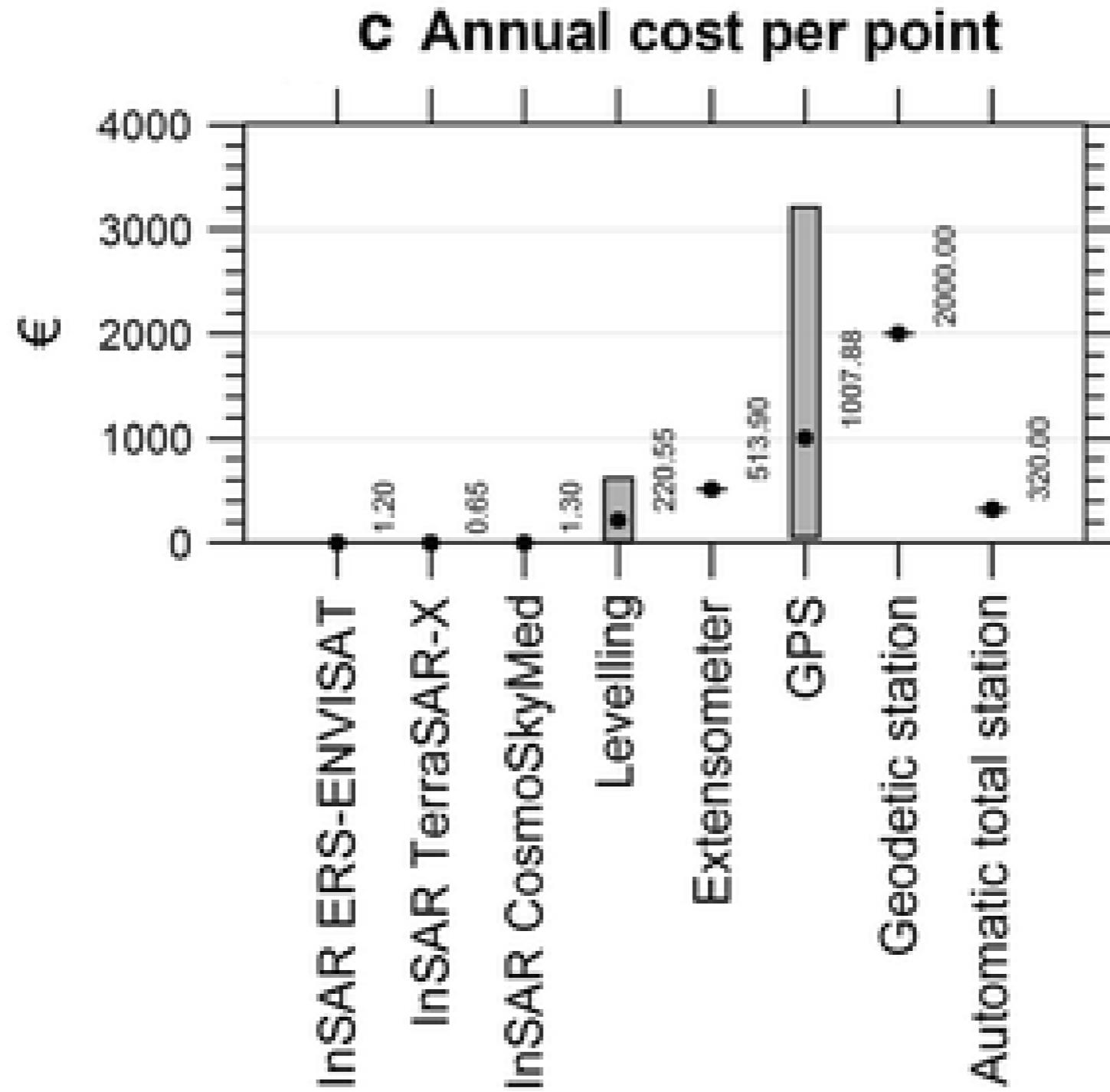
PSInSAR/SqueeSAR vs misura in situ

# Validazione dei risultati



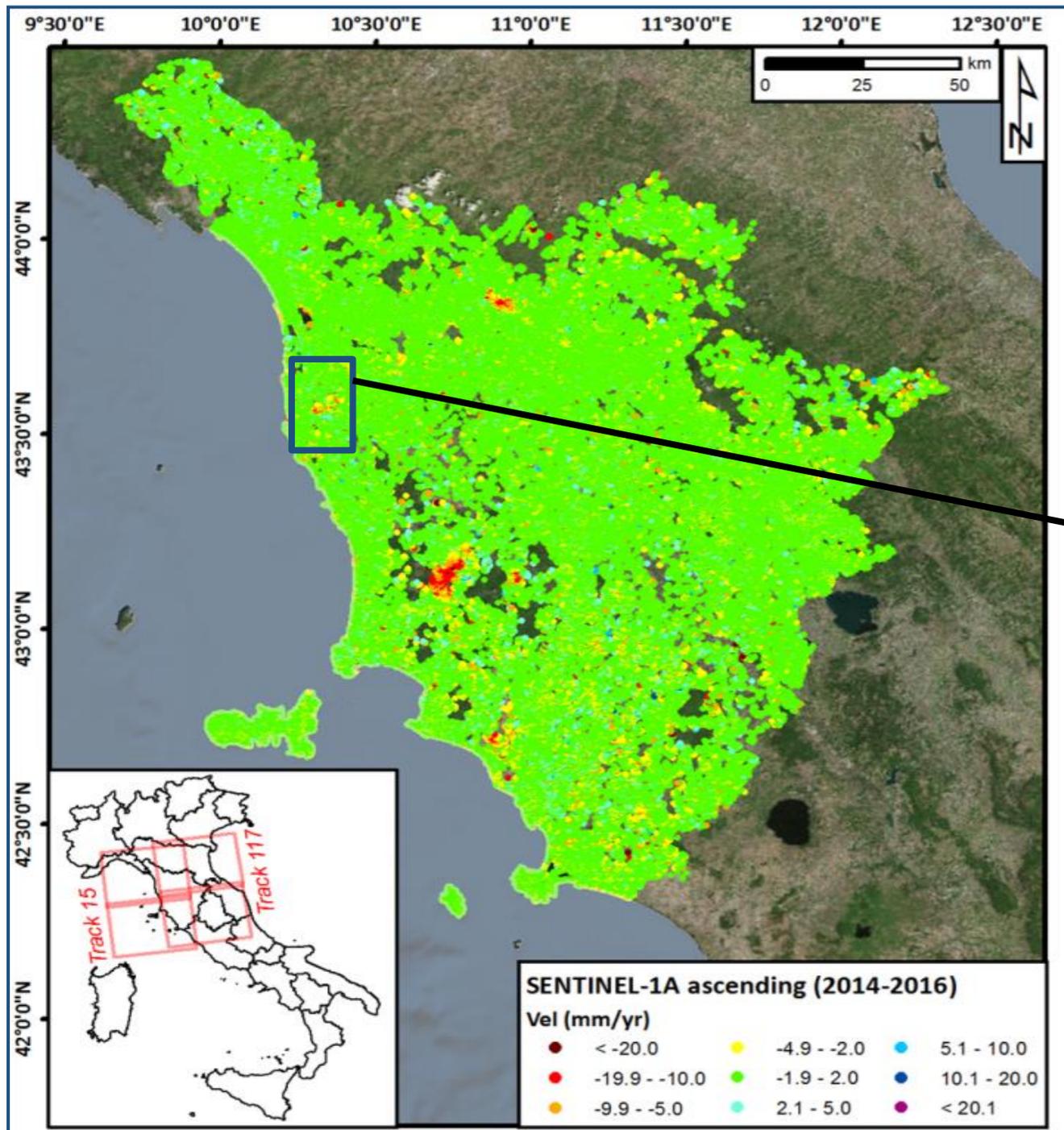
Validazione dei risultati PS con dati GPS

# Vantaggi



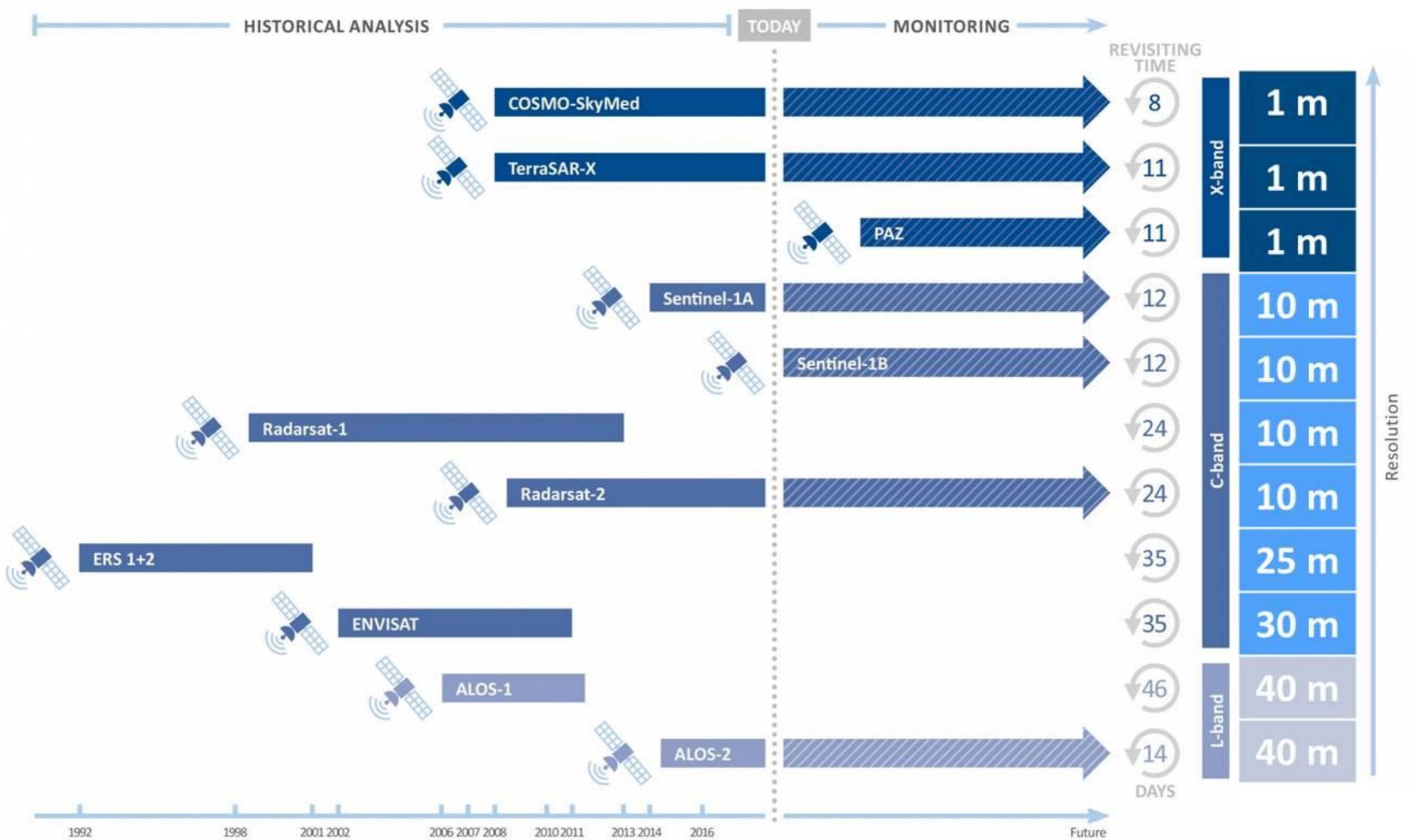
Ottimo rapporto costi/benefici

# Vantaggi



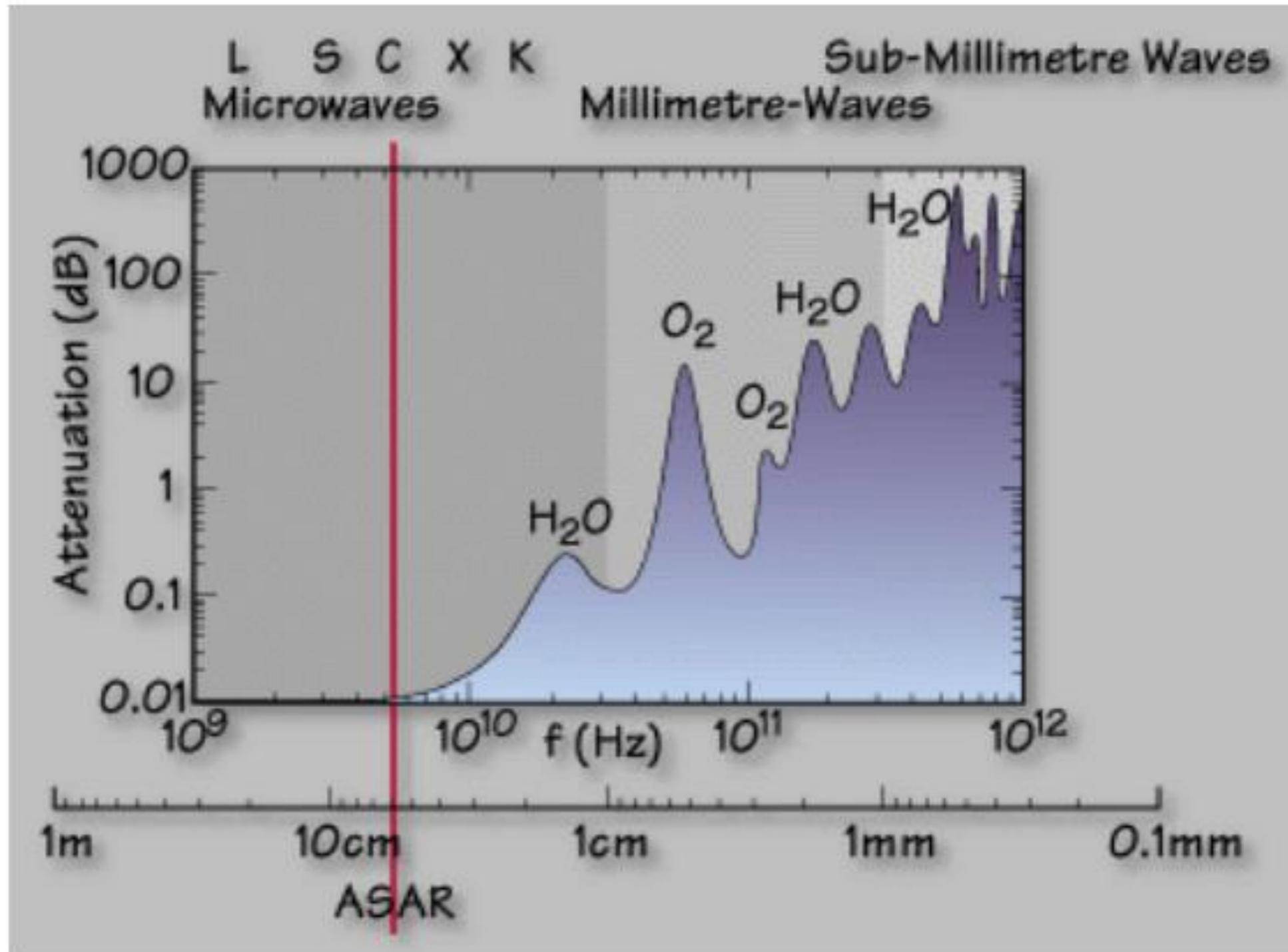
Dati multi-scala, da nazione/regione a singolo edificio

# Vantaggi



Analisi multi-sensore e multi-temporale, dal 1992 ad oggi

# Vantaggi



Ridotto (o limitabile) effetto atmosferico - acquisizioni day/night

# Limitazioni

- Presenza di vegetazione/scarsa densità di riflettori
- Copertura nevosa
- Disponibilità immagini, sia dal punto di vista della copertura spaziale/temporale che del costo (non nel caso di Sentinel-1)
- Movimenti veloci

# Limitazioni – Movimenti veloci

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità tipica	Velocità (m/s)
7	Estremamente rapida	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	> 5 m/s	5
6	Molto rapida	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	> 3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$
5	Rapida	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	> 1.8 m/hr	$5 \cdot 10^{-4}$
4	Moderata	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	> 13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$
3	Lenta	Possibilità di intraprendere lavori di riabilitazione e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di riabilitazione se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	> 1.6 m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$
2	Molto lenta	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	> 16 mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$
1	Estremamente lenta	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzioni di edifici possibile con precauzioni.	< 16 mm/anno	

- Le velocità massime misurabili consentono di monitorare i fenomeni lenti
- Dal punto di vista delle frane parliamo di quelle “estremamente lente” e “molto lente”

# Limitazioni - Movimenti veloci

$$\lambda/4/\text{Rev.Time} * 365$$

Satellite	Velocità massima misurabile
ERS 1/2	14.7 cm/yr
Envisat	21.2 cm/yr
RADARSAT	25.7 cm/yr
TerraSAR-X	35.3 cm/yr
COSMO-SkyMed	42.6 cm/yr
ALOS-2	46.8 cm/yr
Sentinel-1 (6 giorni)	85.2 cm/yr

- $\lambda/4$  è il limite intrinseco della tecnica interferometrica



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**CENTRO  
PROTEZIONE  
CIVILE**



REGIONE DEL VENETO

*Grazie per l'attenzione*

Matteo DEL SOLDATO

matteo.delsoldato@unifi.it