

# ERROR PROPAGATION ANALYSIS IN THE PROCESSING OF SAR IMAGES FOR SUBSIDENCE MEASUREMENTS

Paolo Testolina

Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

SUPERVISORI: Giampiero Naletto,  
Jordi Joan Mallorqui



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

DEPARTMENT OF  
INFORMATION  
ENGINEERING  

---

UNIVERSITY OF PADOVA



## INTRODUZIONE

- Le tecniche di Remote Sensing permettono l'acquisizione di informazioni su un oggetto senza bisogno di entrarne fisicamente in contatto. Remote Sensing applicato a sensori a bordo di satelliti sono stati tradizionalmente usati per l'osservazione della Terra, e più recentemente anche per missioni su Marte e, nel futuro, su Mercurio.
- Concentrandosi sull'osservazione della Terra, i Radar ad Apertura Sintetica (SAR) montati a bordo di satelliti permettono di misurare diverse quantità geodetiche quali l'altimetria del terreno e la sua velocità di deformazione.

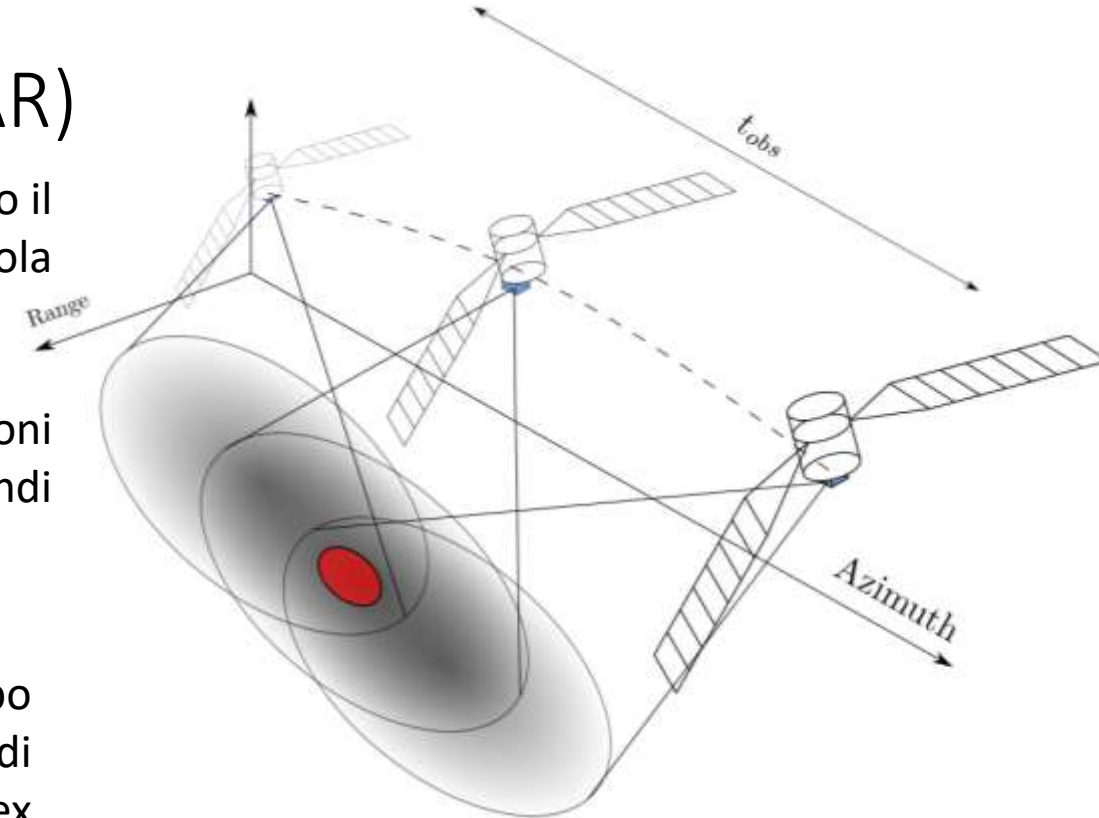
## RADAR AD APERTURA SINTETICA (SAR)

Per ottenere antenne di larga apertura, le antenne SAR sfruttano il **multiplexing** temporale, realizzabile utilizzando una singola antenna in movimento.

Ciò rende le antenne SAR particolarmente adatte a missioni spaziali, dove non è possibile impiegare antenne di grandi dimensioni.

I dati raw dei SAR non offrono alcuna visualizzazione utile. Dopo le necessarie elaborazioni sia nella dimensione di azimuth che di range, l'immagine processata, chiamata Single Look Complex (SLC), ha valori **complessi**:

$$S = A e^{j\Phi} = \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j\Phi_i}$$



# INTERFEROMETRIA

L'interferometria è una tecnica, utilizzata in diversi ambiti, che sfrutta l'informazione contenuta nella differenza di fase tra due segnali.

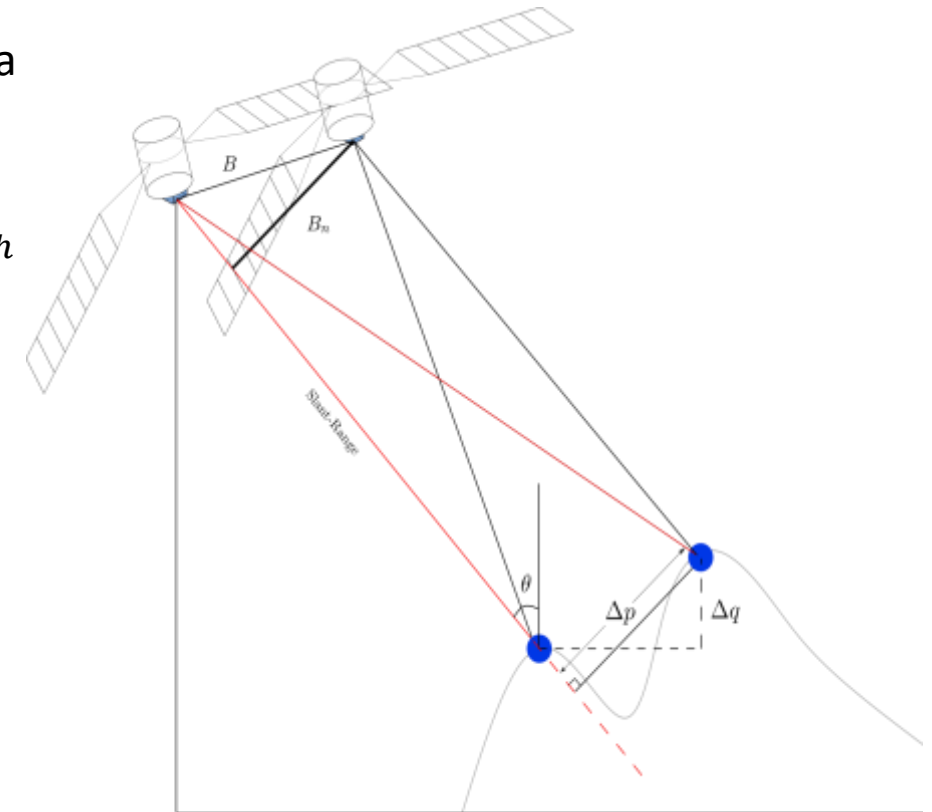
In questo caso, si considerano due immagini complesse SLC  $S_i$ ,  $S_h$  acquisite da posizioni e tempi diversi.

L'interferogramma è quindi ottenuto come

$$I_{i,h} = S_i S_h^* = A_{i,h} e^{j\phi_{i,h}}$$

la cui fase può essere espressa come

$$\phi_{i,h} = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_i - R_h) + (\varphi_{scatter,i} - \varphi_{scatter,h})$$

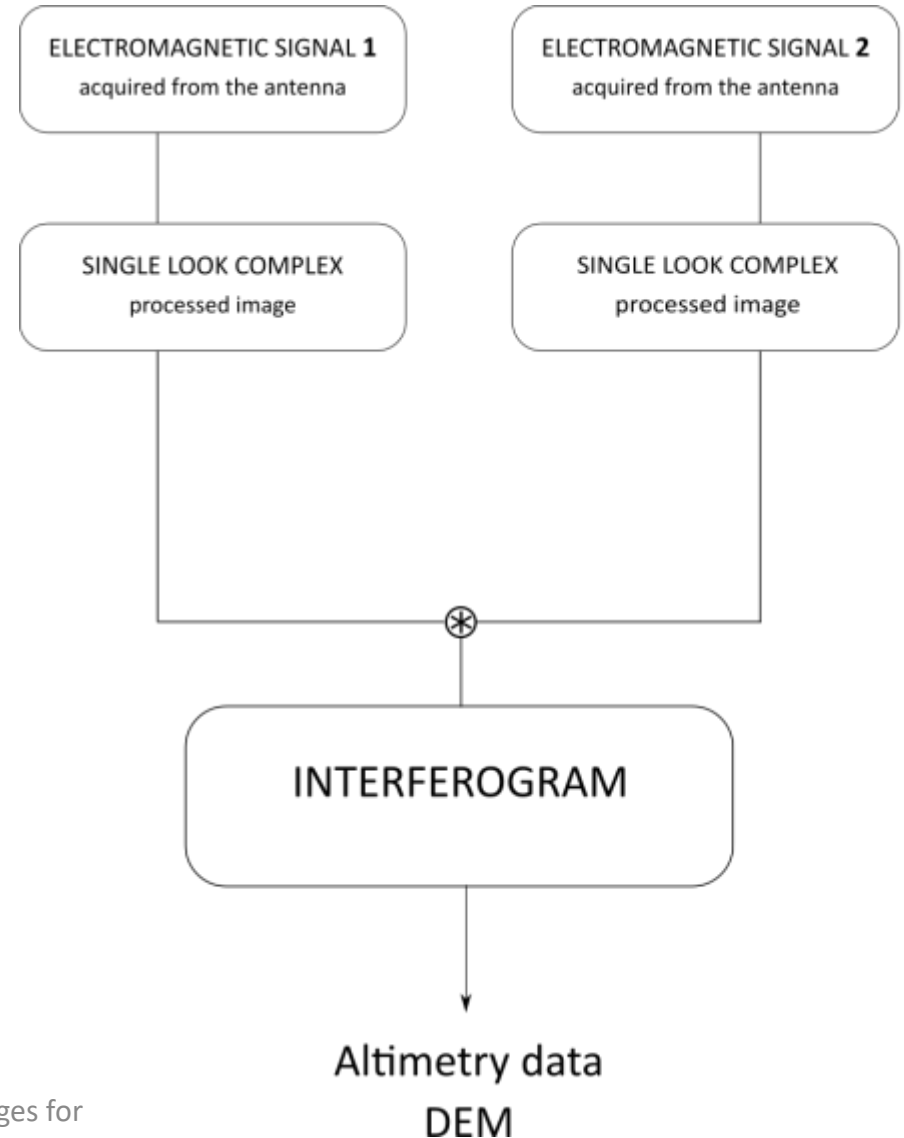


# FASE INTERFEROMETRICA

Considerando i diversi fattori, la fase interferometrica può essere riscritta come:

$$\phi_{i,h} = \underbrace{\phi_{alt}}_{\substack{\text{Informazione} \\ \text{Altimetrica}}} + \underbrace{\phi_{flat}}_{\substack{\text{Offset di Fase} \\ \text{(noto)}}} + \underbrace{\phi_{noise}}_{\substack{\text{Rumore di} \\ \text{Fase}}} + \underbrace{\phi_{atm}}_{\substack{\text{Ritardo} \\ \text{Atmosferico}}}$$

**OUTPUT:** Digital Elevation Model (DEM),  
una mappa altimetrica



# PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY

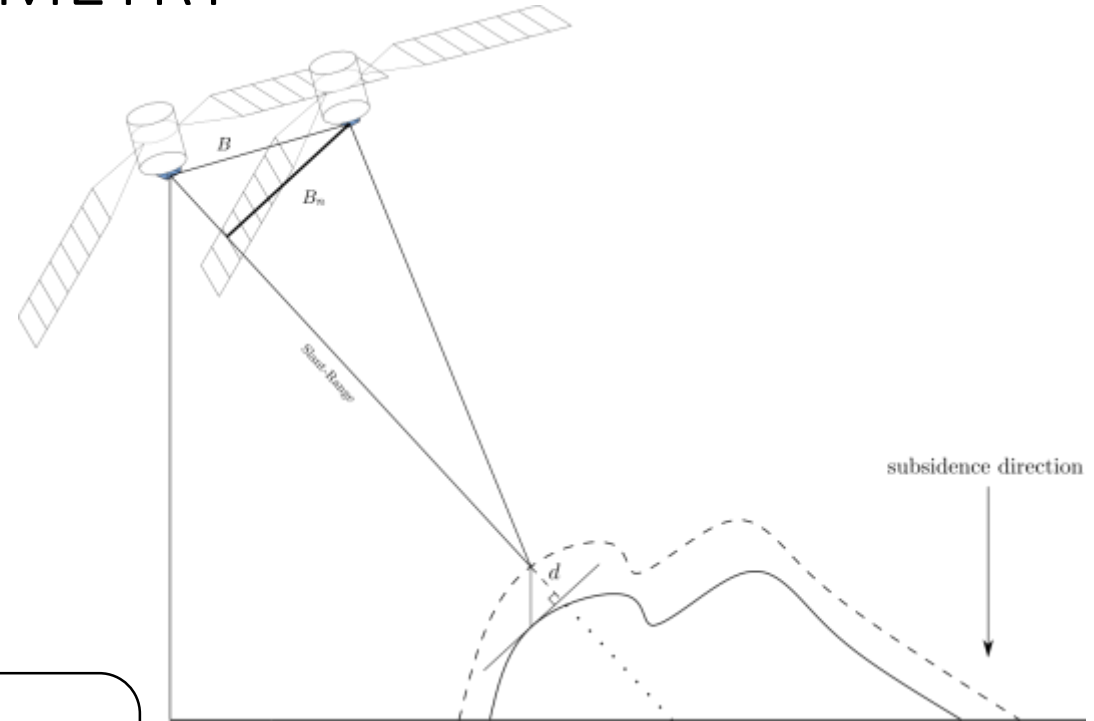
Eventuali deformazioni del terreno avvenute tra le due acquisizioni SLC vengono quantificate in un termine di fase addizionale:

$$\phi_{i,h} = \phi_{alt} + \phi_{flat} + \phi_{noise} + \phi_{atm} + \phi_{def}$$

In presenza di deformazioni particolarmente marcate, può verificarsi un avvolgimento di fase (phase wrapping), i.e., la fase può contenere eventuali cicli che vanno rimossi.

**OUTPUT:**

1. Velocità di Deformazione
2. Errore di DEM



# COHERENT PIXELS TECHNIQUE (CPT)

La Coherent Pixel Technique fornisce una stima della velocità di deformazione  $v$  e dell'errore sul DEM  $\varepsilon$  per l'area di interesse.

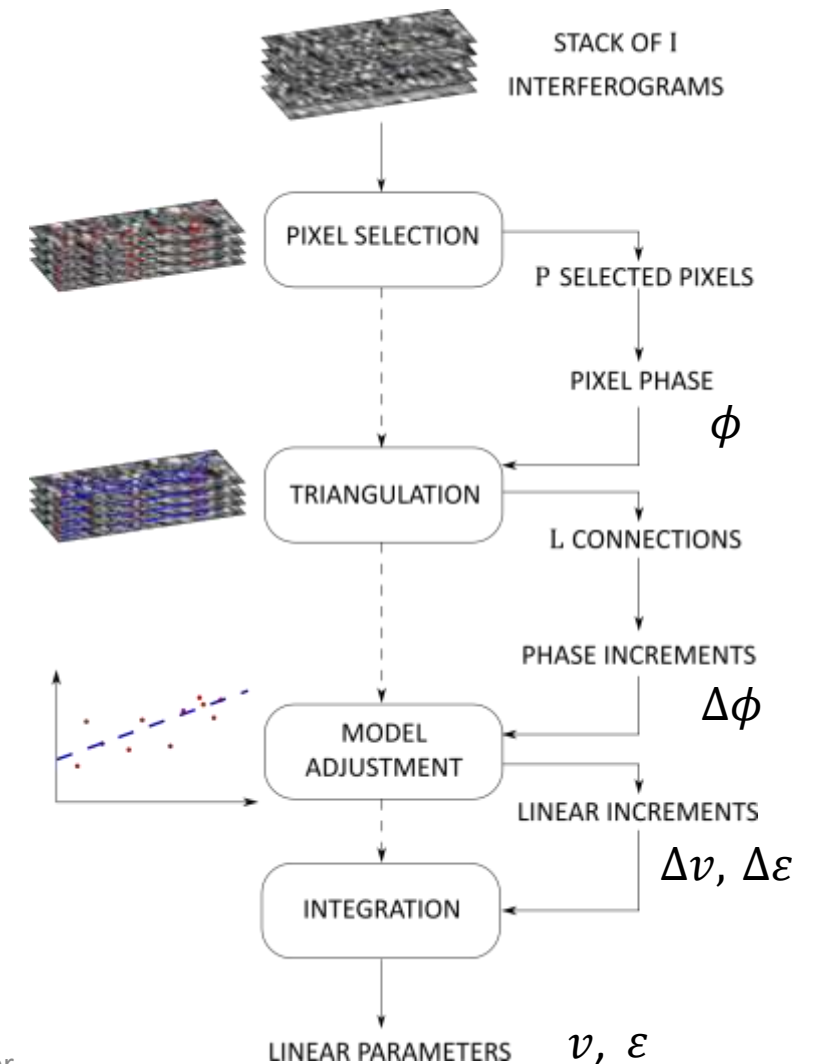
La stima dei parametri viene fatta su un sottoinsieme di  $P$  pixel, selezionati secondo un certo criterio. Il modello (lineare) della fase per un pixel  $p$ , contenente i termini di velocità ed errore DEM, è

$$\phi_{i,mod}(p) = k_{T_i}v(p) + k_{B_i}\varepsilon(p)$$

La triangolazione tra i pixel permette di aggiustare il modello sugli incrementi tra pixel

$$\Delta\phi_{i,mod}(l) = k_{T_i}\Delta v(l) + k_{B_i}\Delta\varepsilon(l)$$

La velocità di deformazione  $v$  e l'errore di DEM  $\varepsilon$  sono quindi ottenuti tramite un processo di integrazione.



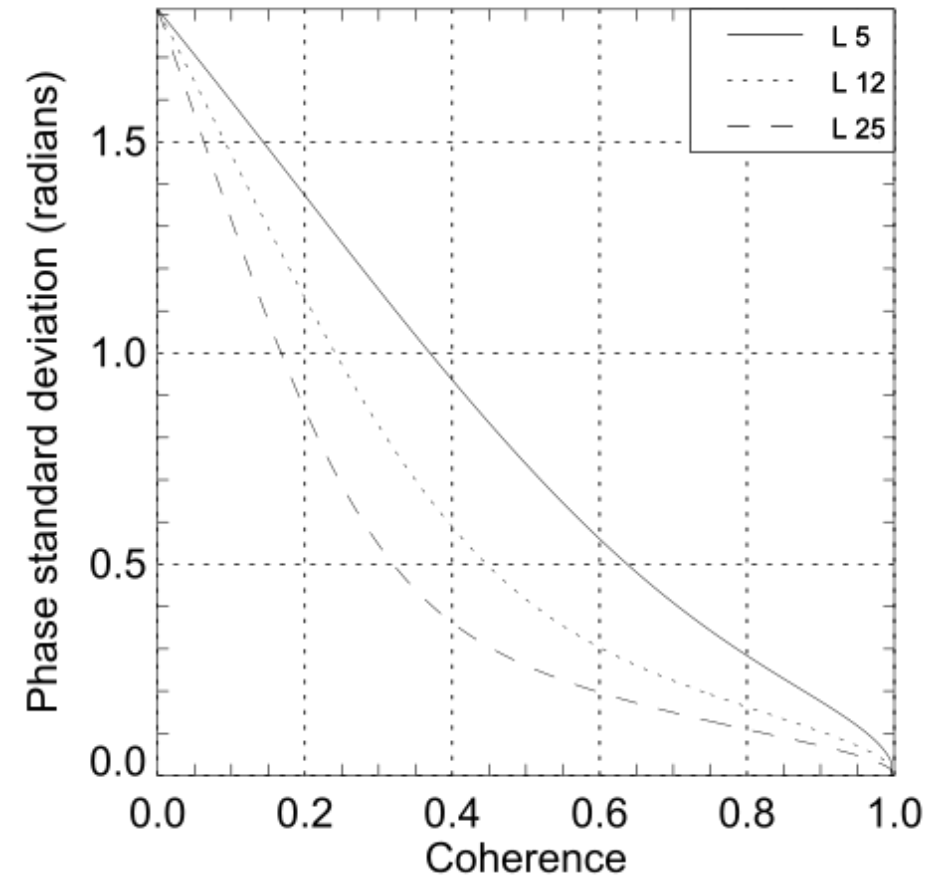
# STOCHASTIC CHARACTERIZATION OF THE PHASE NOISE

Le celle di risoluzione, sia a livello di SLC che interferometrico, possono essere descritte da un modello stocastico.

Uno dei parametri principali è la coerenza complessa  $\gamma \in [0,1]$  di un obiettivo (target):

$$\gamma = \frac{E[S_i S_h^*]}{\sqrt{E[|S_i|^2] E[|S_h^*|^2]}}$$

che misura la correlazione del target tra le diverse acquisizioni.





## COERENZA E DEVIAZIONE STANDARD

Esiste una relazione diretta tra coerenza e deviazione standard:

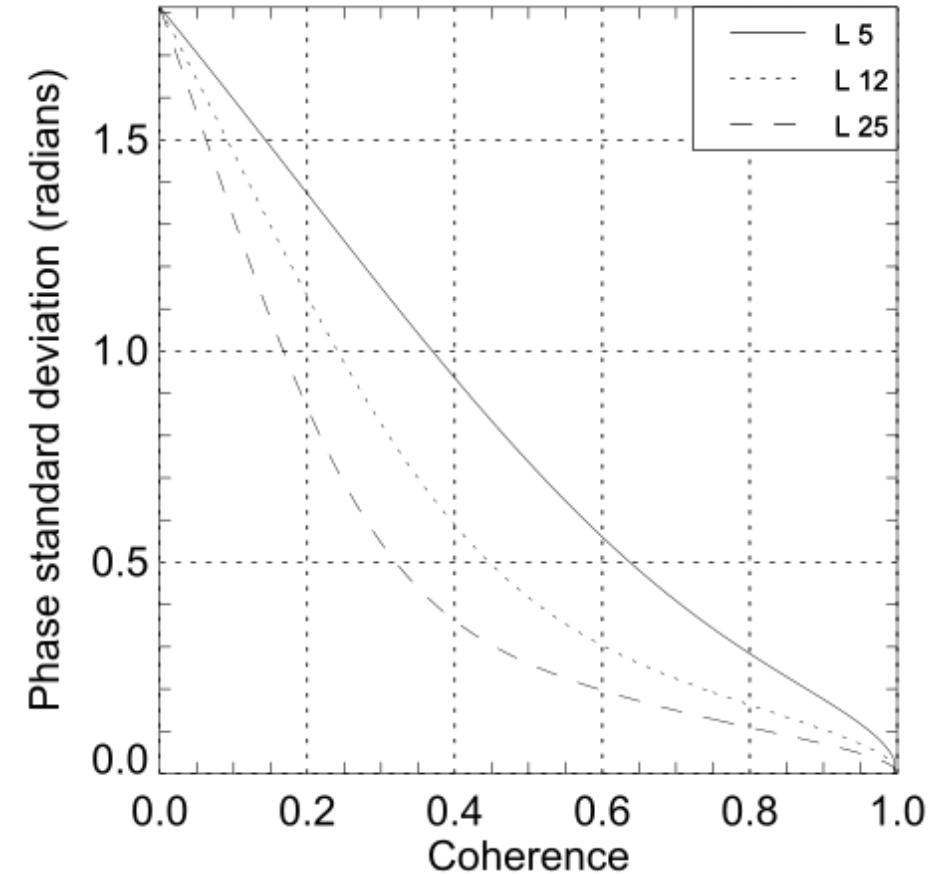
- Per diffusori puntiformi,

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{1 - \gamma^2}{2\gamma^2}$$

- Per diffusori distribuiti, una stima della coerenza è data da

$$\gamma = \frac{\sum_k S_i(k) S_h^*(k)}{\sqrt{\sum_k |S_i(k)|^2 \sum_j |S_h(j)|^2}}$$

e la corrispondente deviazione standard è ottenuta come in figura.



# PROPAGAZIONE DELL'ERRORE

## OBIETTIVO PRINCIPALE:

Quantificare l'incertezza sugli output (velocità del terreno e errore sul DEM) derivante dall'errore presente negli input.

Questo può essere fatto stimando la matrice di covarianza ad ogni step dell'algoritmo.

L'input iniziale è la matrice di covarianza della fase interferometrica:

$$\Sigma_{\phi} = \Sigma_{decorr} + \Sigma_{APS}$$

- $\Sigma_{decorr}$  è la matrice di covarianza relativa agli errori di decorrelazione e può essere stimata tramite la coerenza;
- $\Sigma_{APS}$  la matrice di covarianza atmosferica.

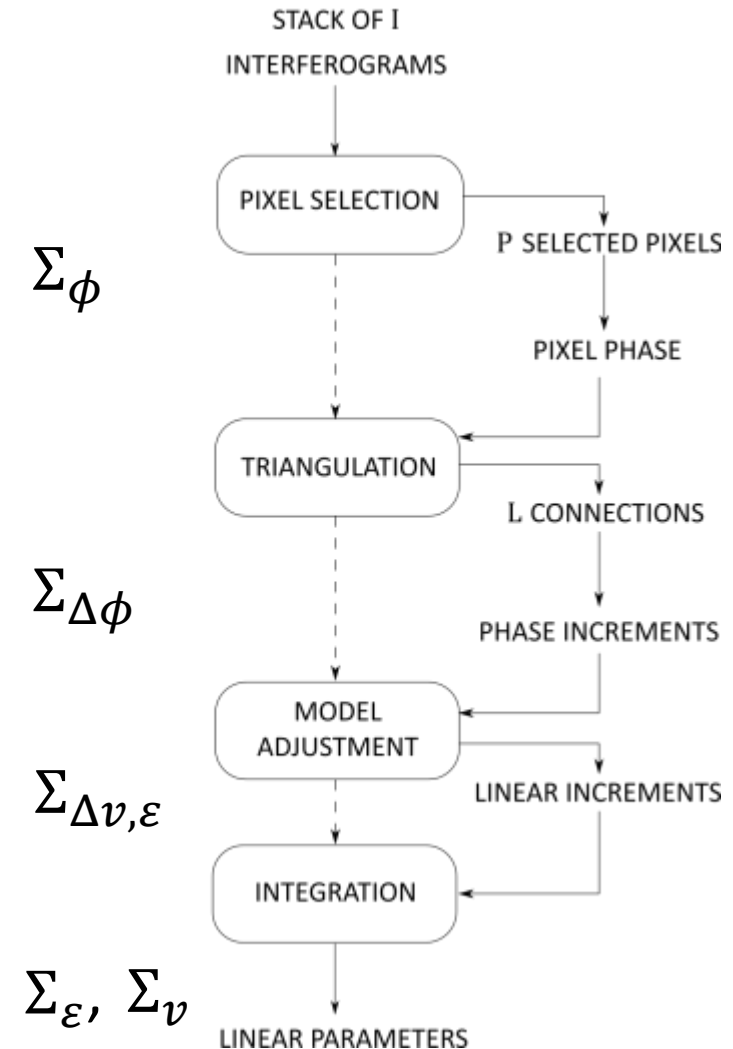
# PROPAGAZIONE DELL'ERRORE:

## Matrici di covarianza finali e seed

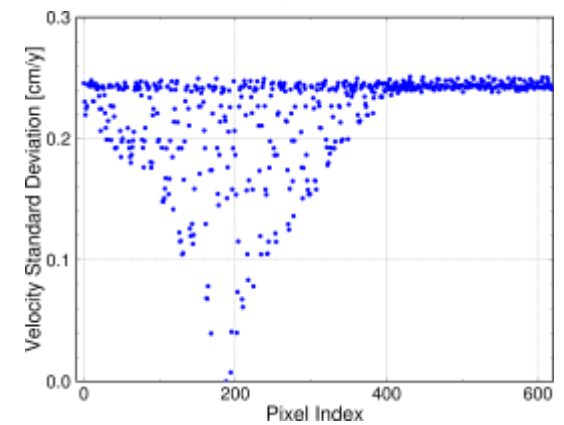
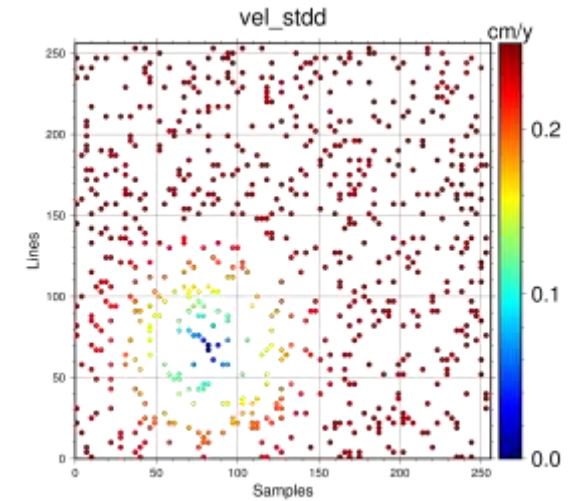
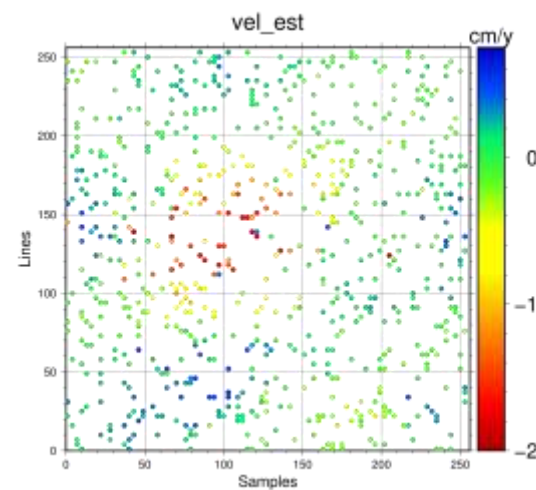
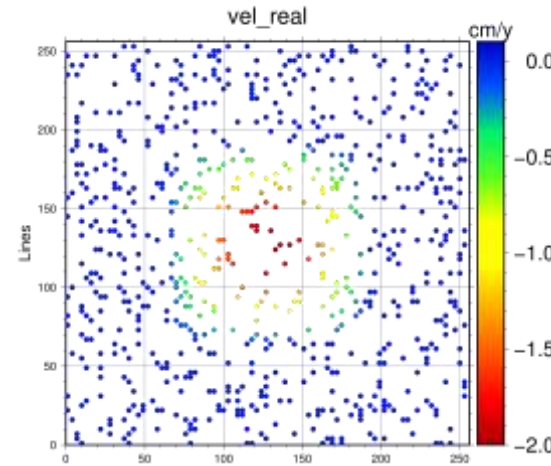
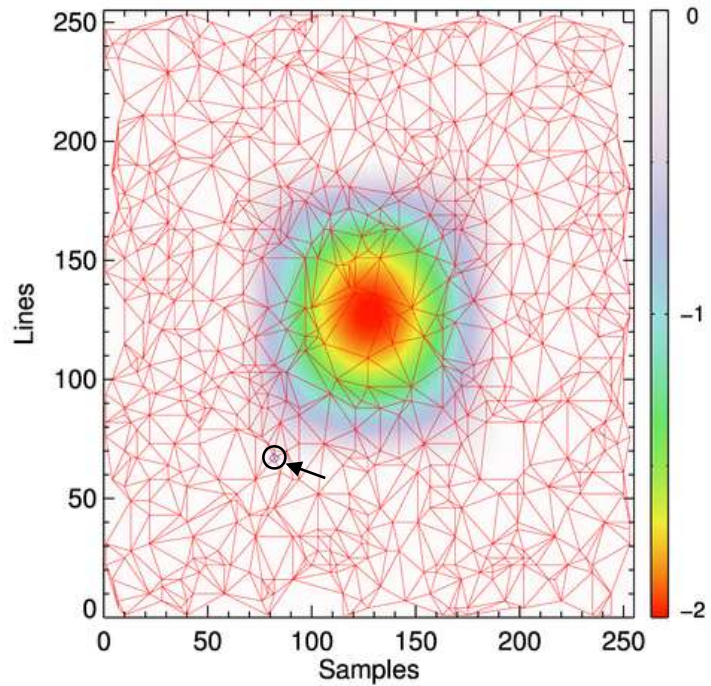
La matrice di covarianza della fase è propagata attraverso l'algoritmo CPT per ottenere le matrici di covarianza della velocità e dell'errore di DEM.

L'algoritmo CPT richiede di individuare uno o più punti, chiamati **seed**, di cui si assume nota la velocità e l'errore di DEM.

- Durante la *stima della velocità e dell'errore di DEM*, questo permette di fissare la soluzione (altrimenti indefinita): le velocità stimate sono quindi relative alla velocità dei seed.
- Durante la *propagazione dell'errore*, assumere il seed noto si traduce in varianza nulla.



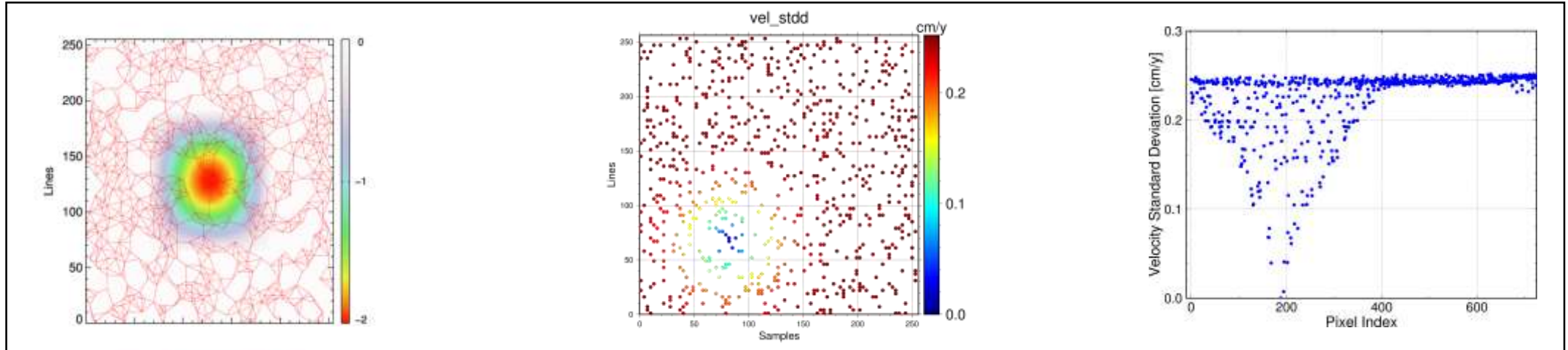
# RISULTATI SIMULATIVI (1)



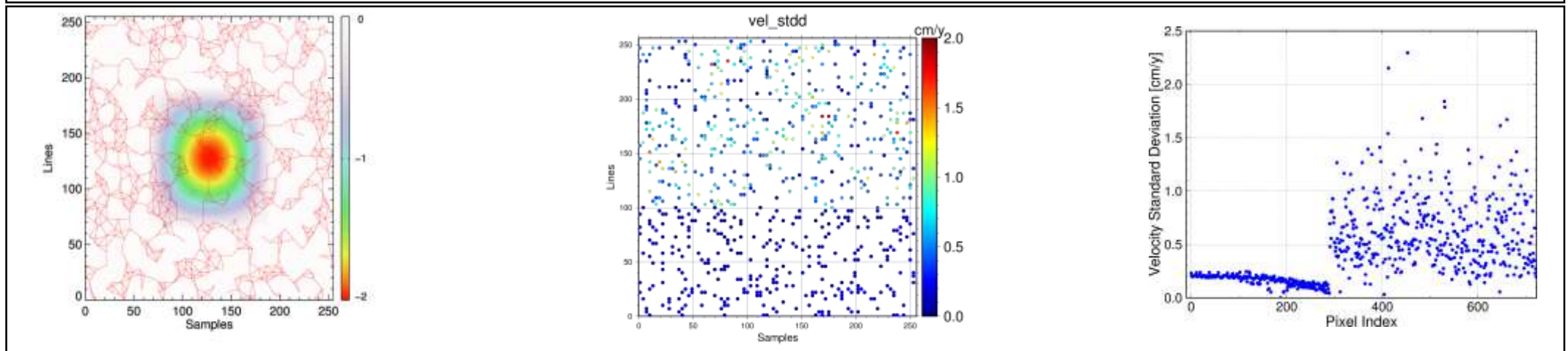


## RISULTATI SIMULATIVI (2): Sensibilità alla sparsità

MAX. LINK DIST. :  
500 m

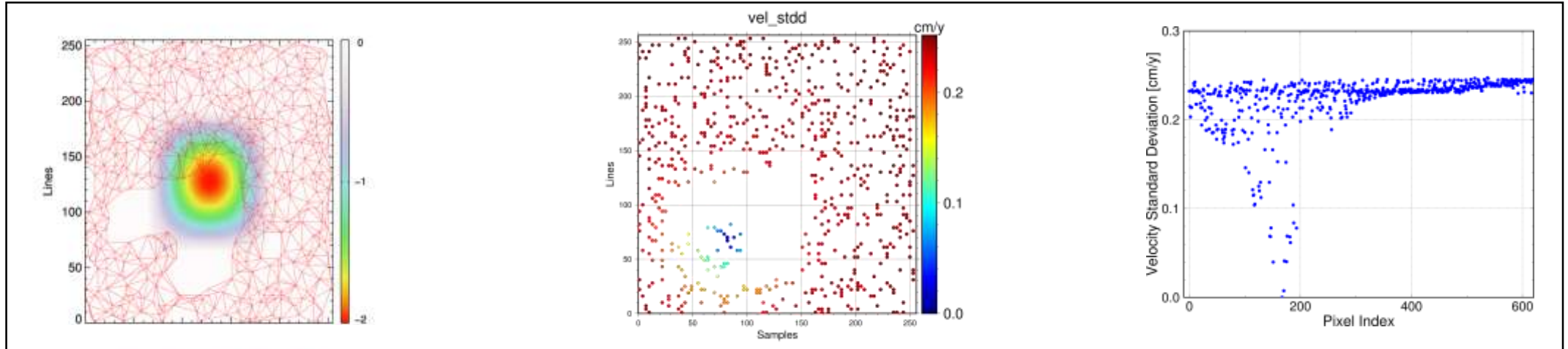


MAX. LINK DIST. :  
400 m

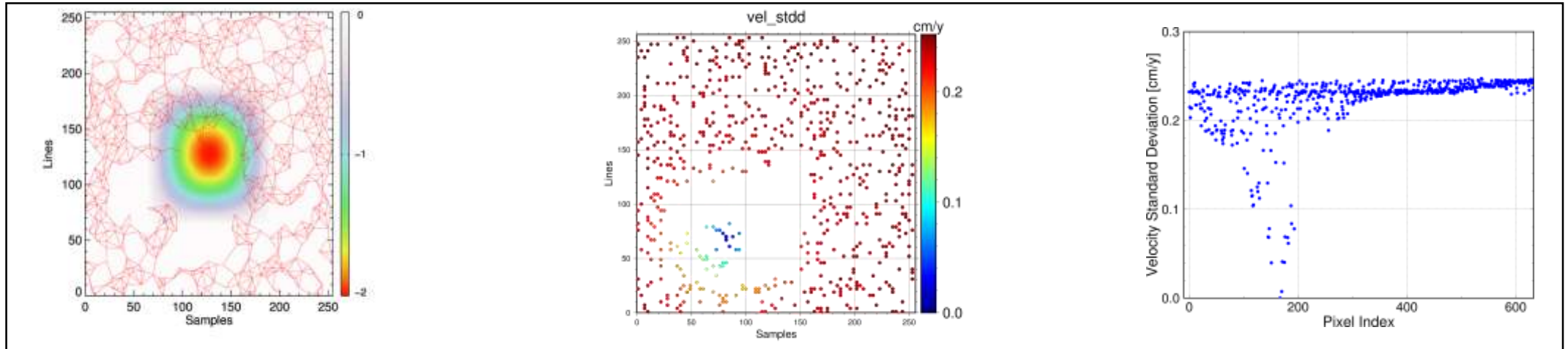


## RISULTATI SIMULATIVI (3) : Sensibilità alle maschere (A)

MAX. LINK DIST. :  
800 m

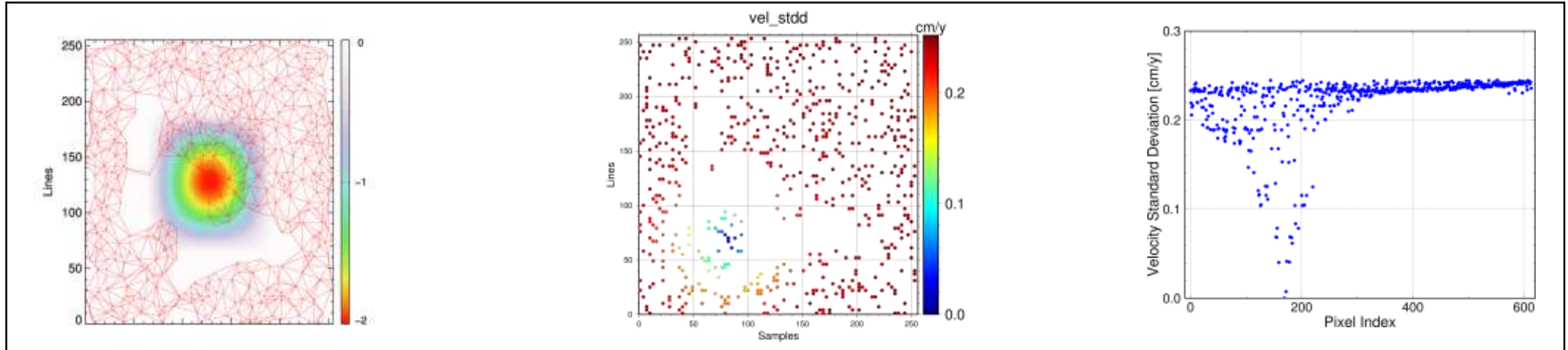


MAX. LINK DIST. :  
500 m

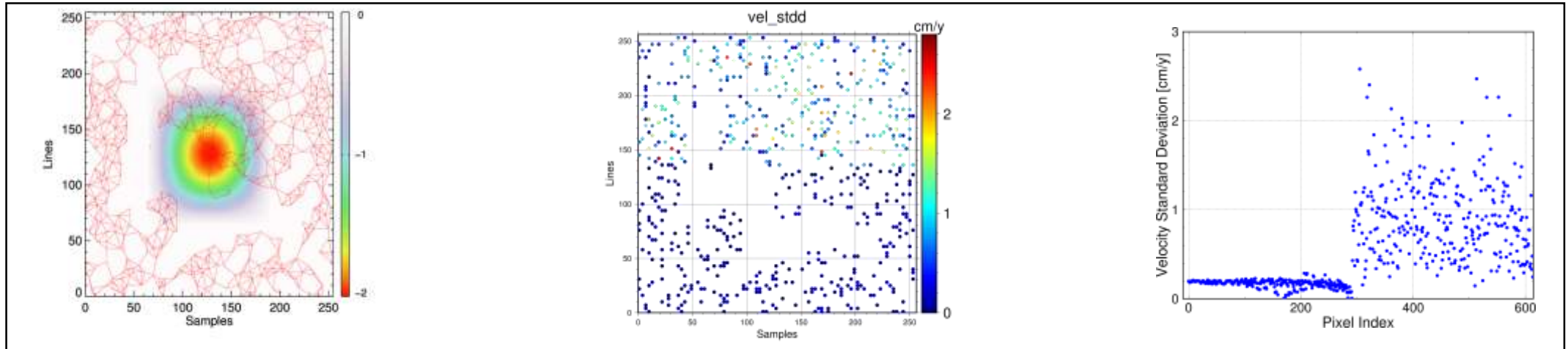


## RISULTATI SIMULATIVI (3): Sensibilità alle maschere (B)

MAX. LINK DIST. :  
800 m



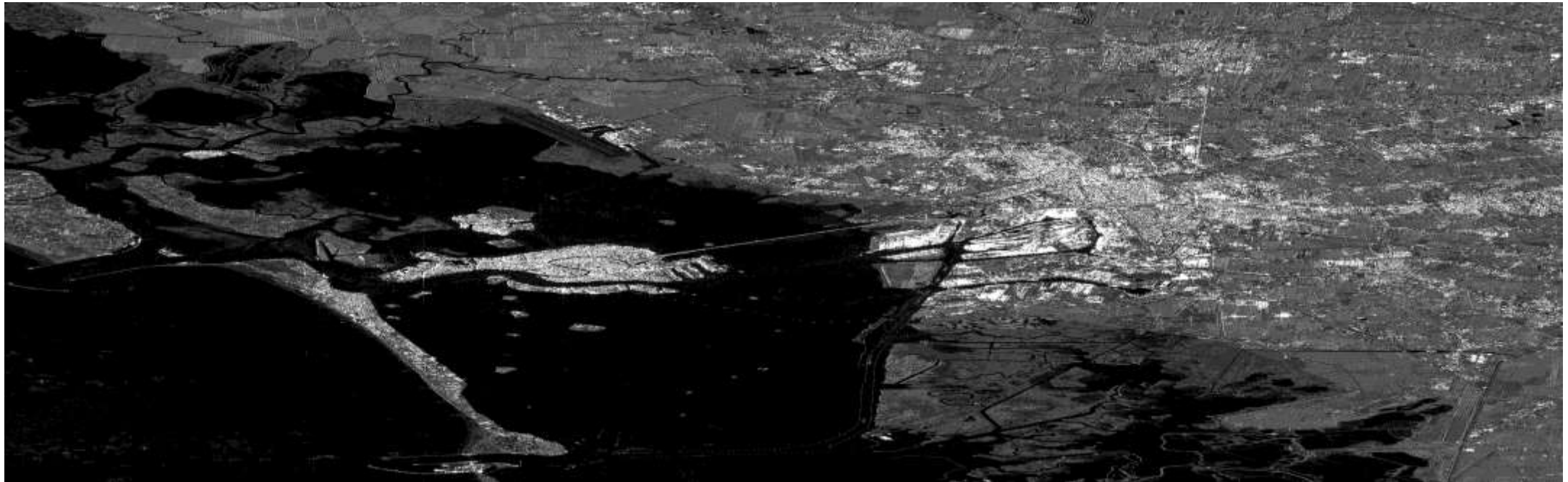
MAX. LINK DIST. :  
500 m





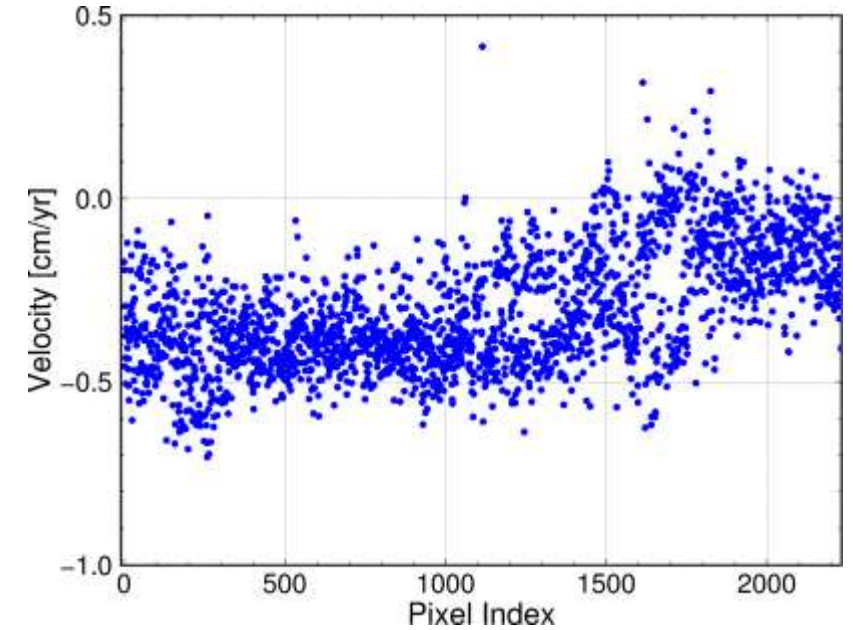
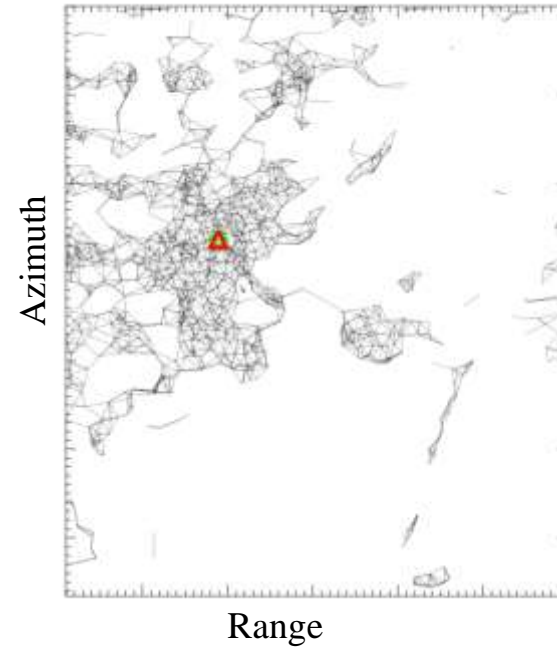
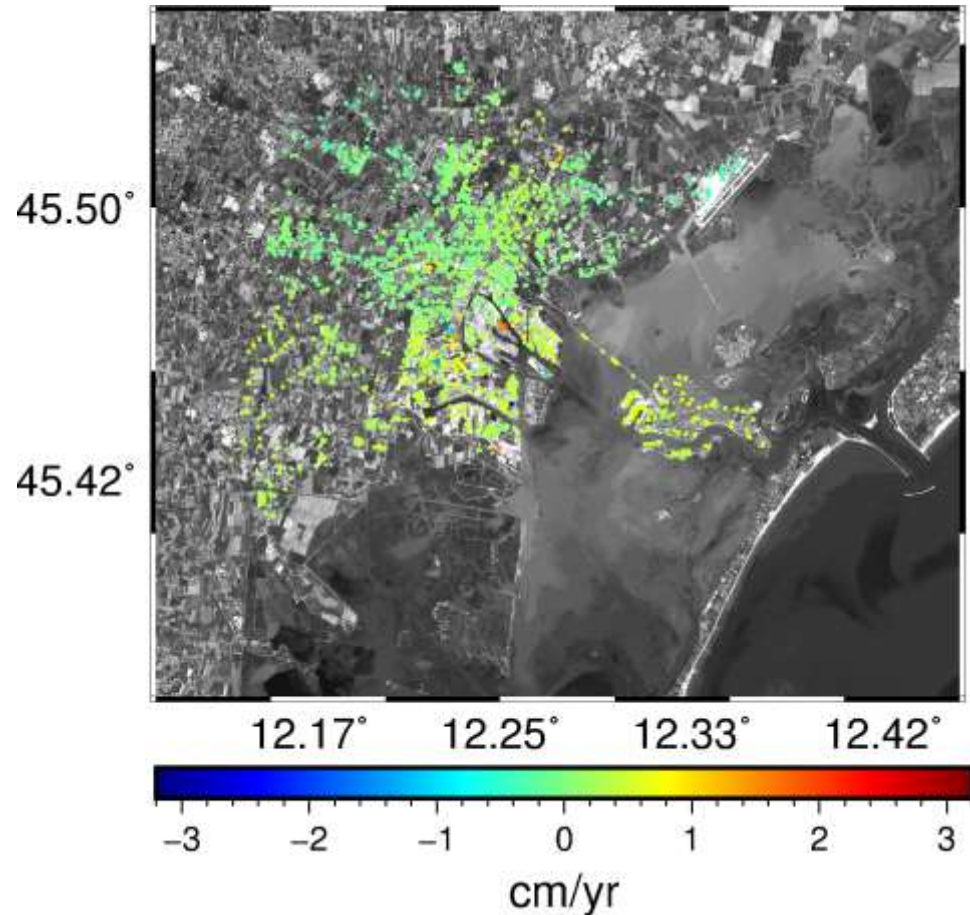
## CASO di STUDIO: la Città di Venezia

La città di Venezia soffre di una lieve subsidenza. Sebbene in altre aree geografiche una subsidenza così lenta possa essere trascurata, Venezia ne risente pesantemente a causa del suo basso livello sul mare.

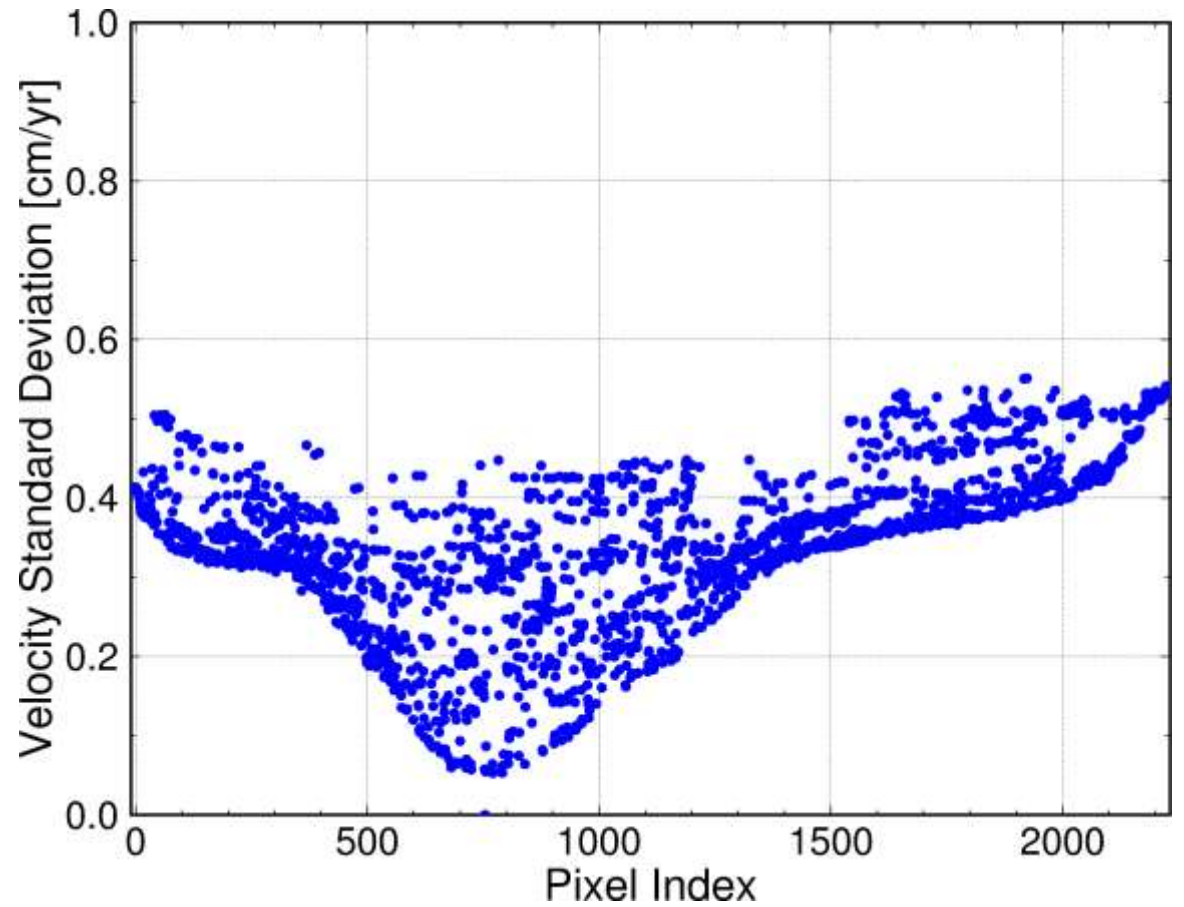
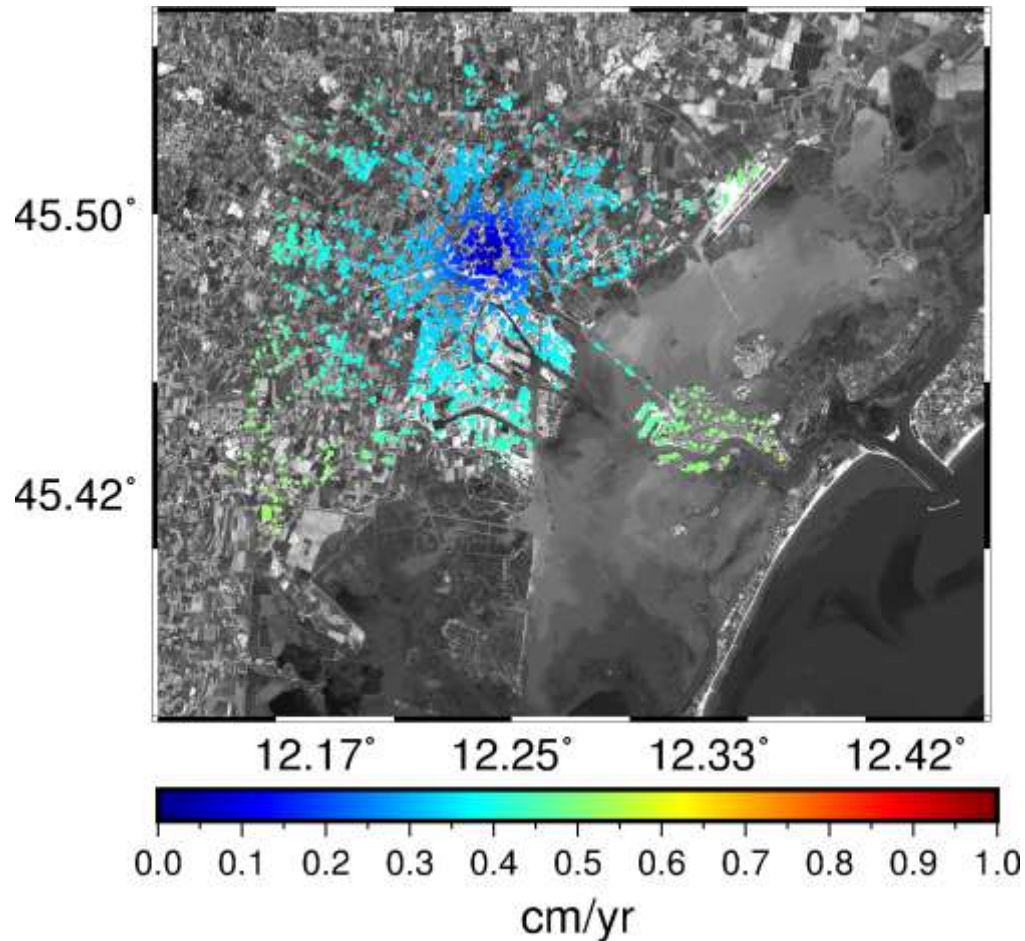




# CASO di STUDIO: la Città di Venezia

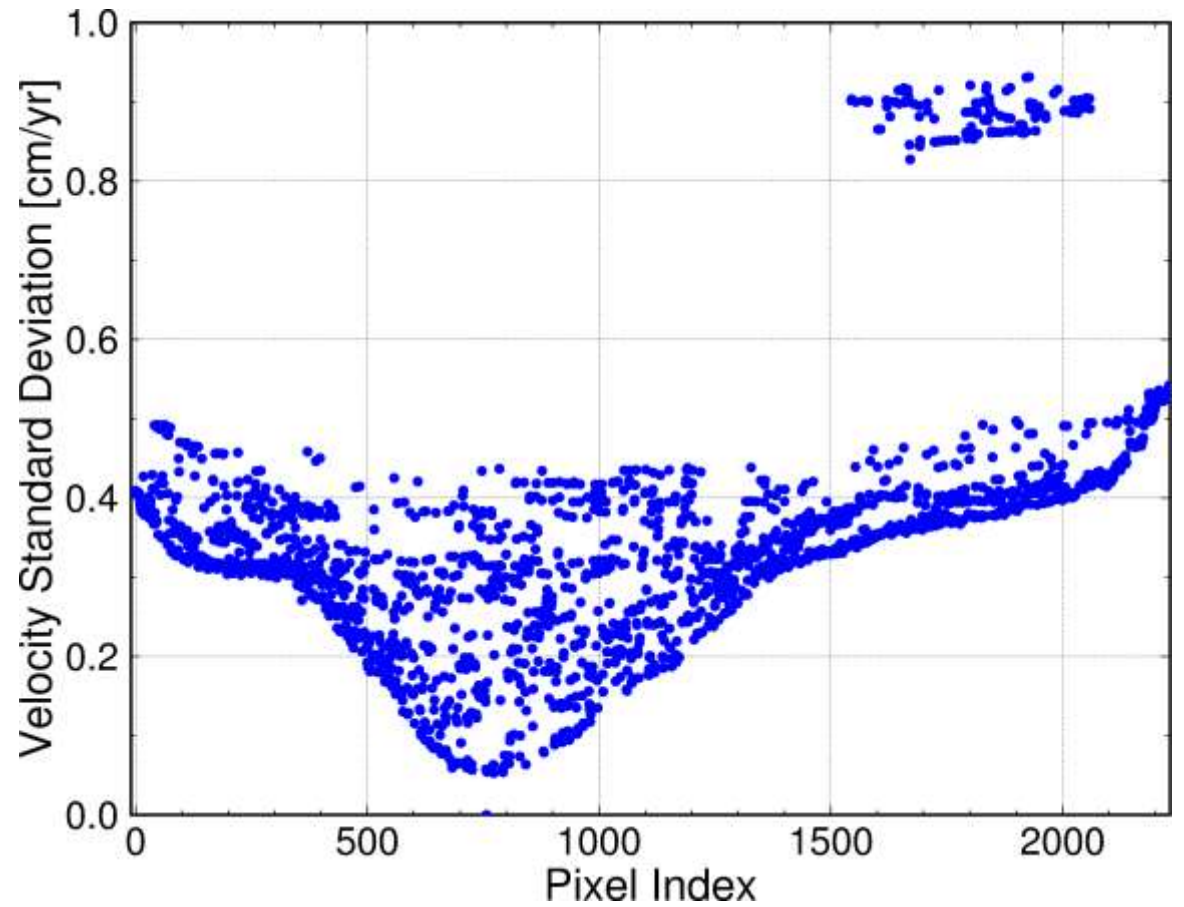
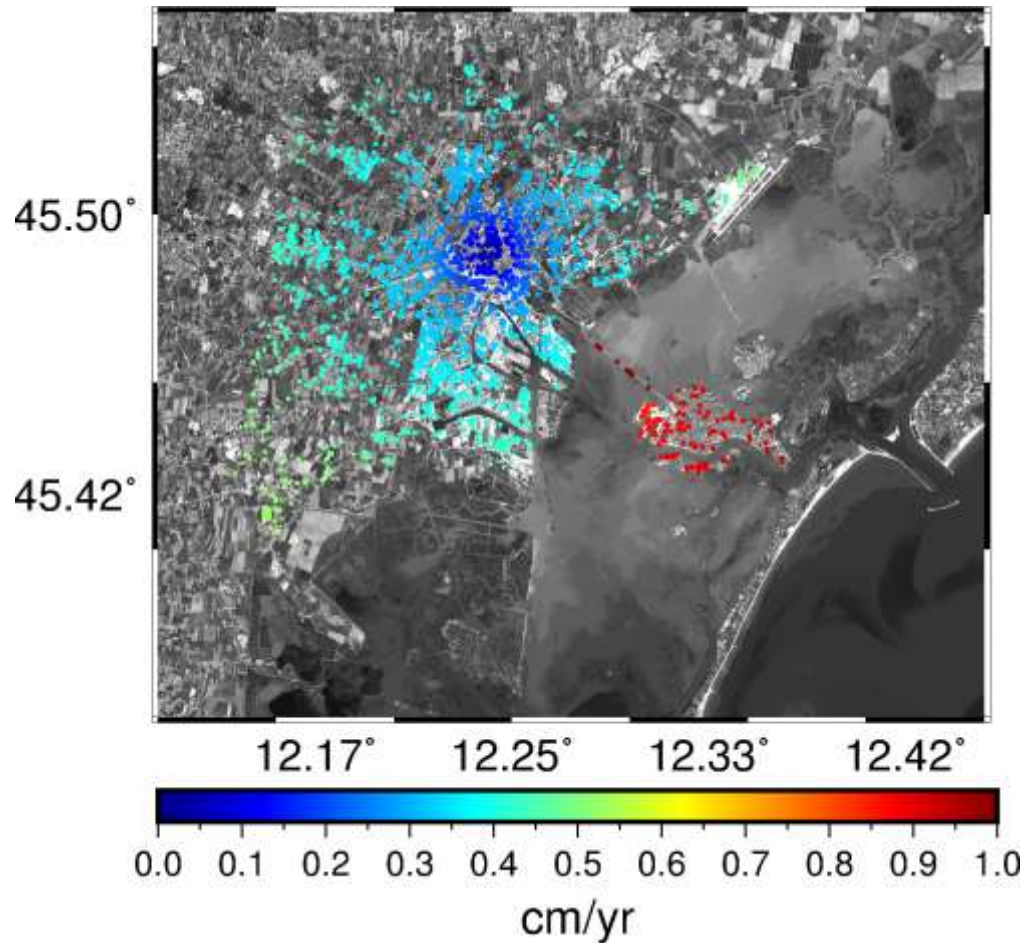


## CASO di STUDIO: la Città di Venezia





## CASO di STUDIO: la Città di Venezia



## CONCLUSIONI

- Durante la tesi è stato sviluppato uno strumento che permette la stima dell'errore sui risultati dell'algoritmo CPT.
- Lo strumento può essere usato per produrre delle mappe di affidabilità, da fornire insieme ai risultati.
- Una seconda applicazione può essere lo studio del comportamento del rumore al variare dei parametri dell'algoritmo, tra cui la triangolazione si è dimostrata essere determinante.

## LAVORI FUTURI

- Lo stesso approccio può essere applicato alla parte non lineare dell'algoritmo CPT.
- L'analisi del comportamento del rumore può essere estesa ad altre topologie e pattern di deformazione.
- Si sta scrivendo un articolo da sottoporre a IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

# GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Ci sono domande?