

LA SUBSIDENZA IN ITALIA:
dal confronto tecnico-scientifico alla
creazione di un gruppo di lavoro (iSUB-I)
17-18 Febbraio 2026, Padova

**Dallo spazio al territorio: il ruolo
dell'interferometria RADAR satellitare nel
monitoraggio della subsidenza e delle
infrastrutture**

Dr. Giulia Tessari

Monitoraggio della subsidenza con Interferometria SAR satellitare

Definizione della subsidenza



- Abbassamento graduale del terreno, causato da estrazione di acque sotterranee, gas, petrolio o compressione dei sedimenti.

Cos'è l'InSAR



Esempio di Mappa InSAR



Applicazioni e Vantaggi



Copertura ampia anche in aree remote



Precisione millimetrica



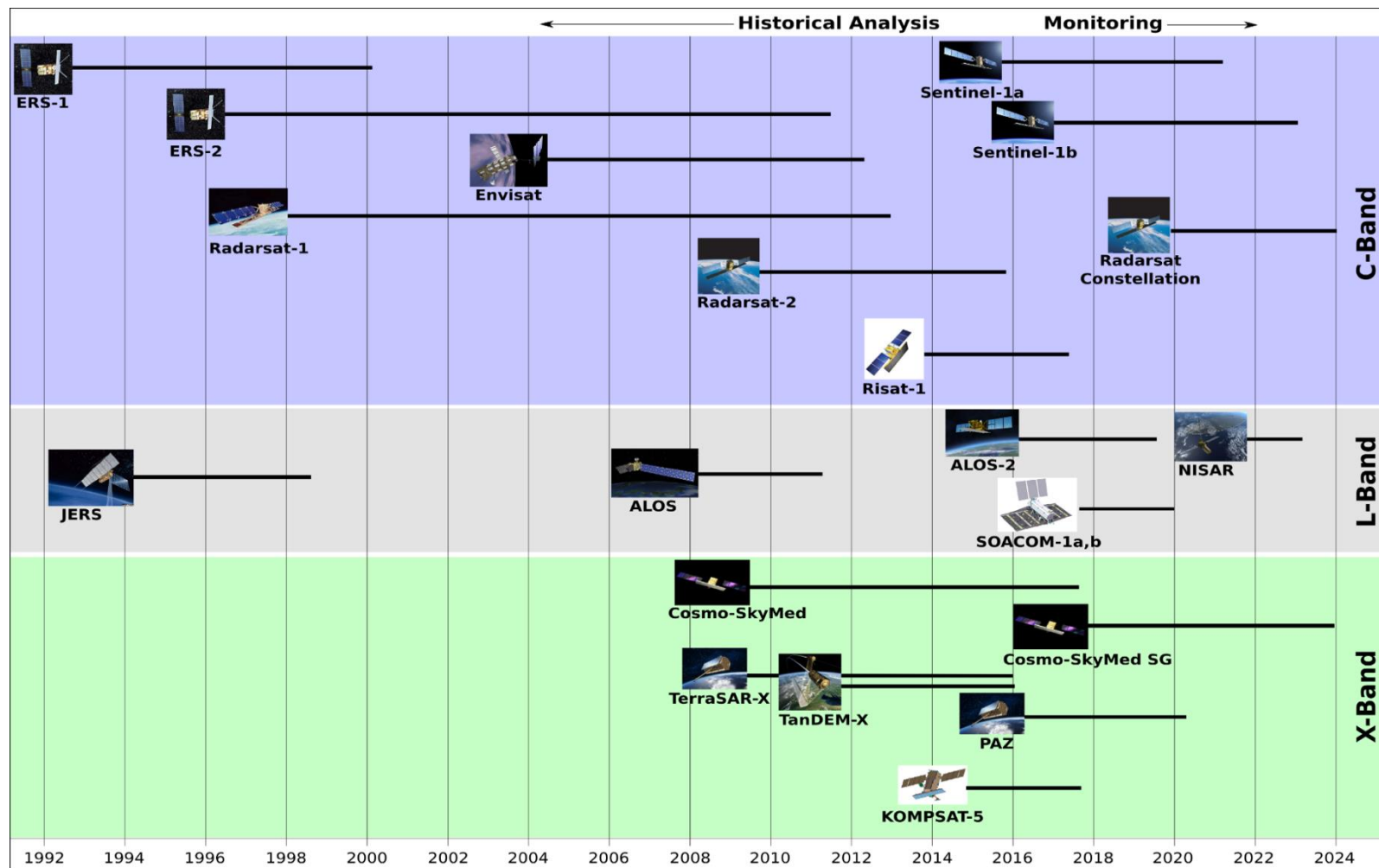
Monitoraggio continuo nel tempo



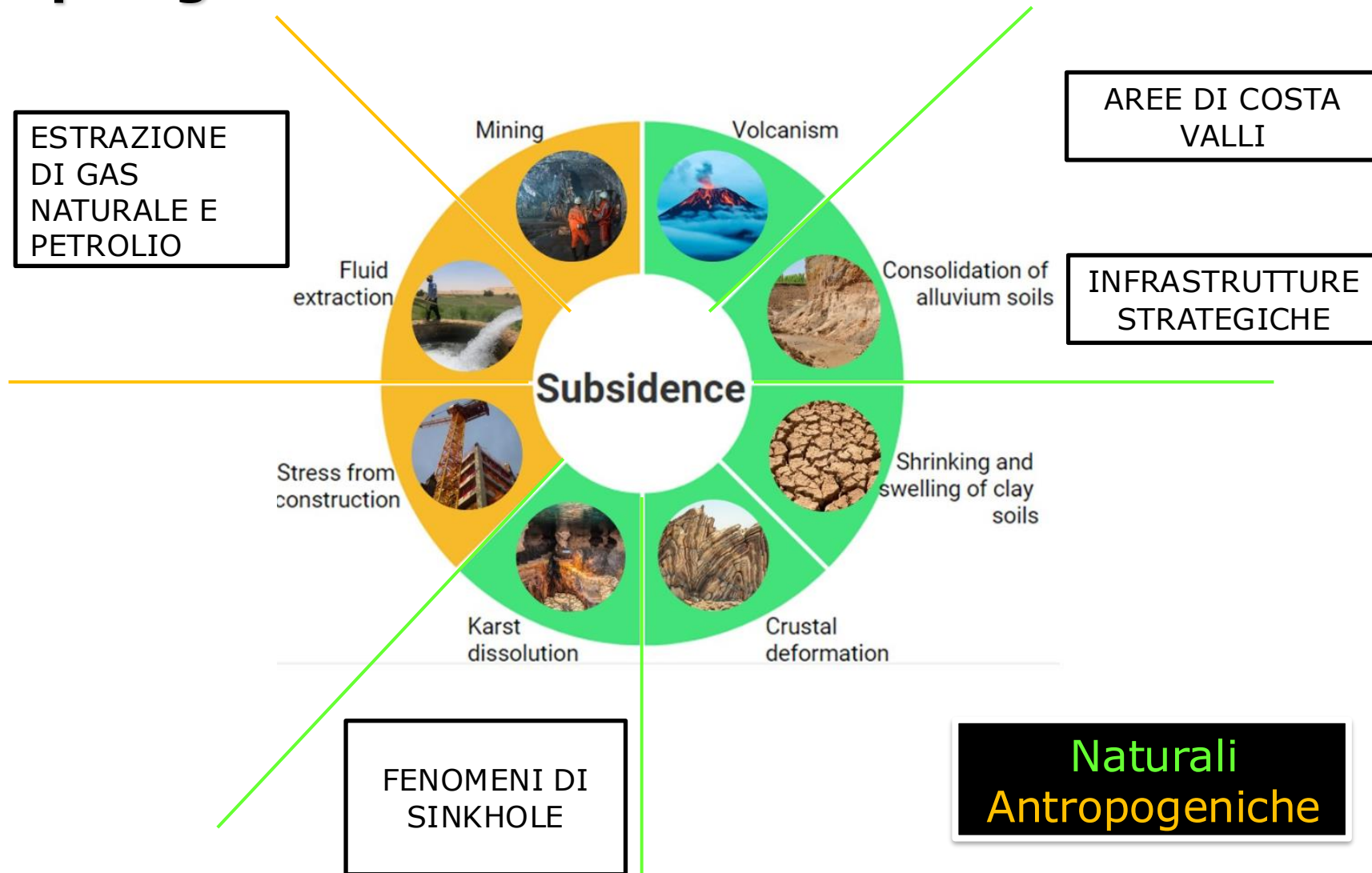
Prevenzione danni a infrastrutture



Oltre 30 anni di missioni SAR



Tipologie di subsidenza

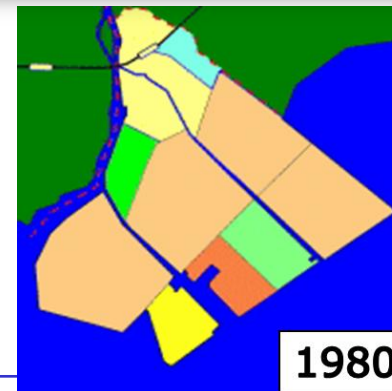
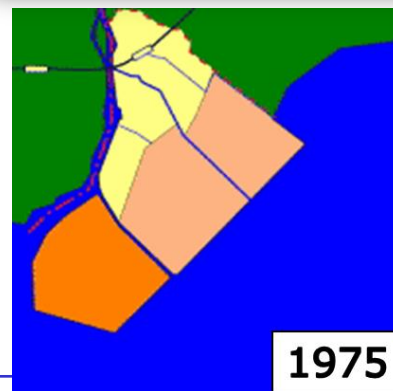
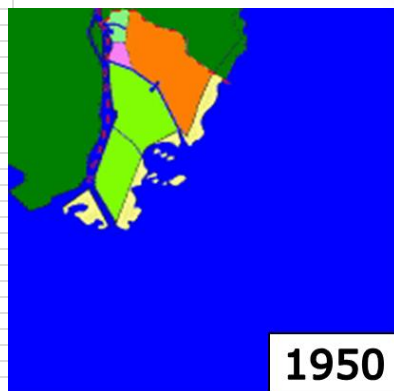


Land-fill (Urayasu, Giappone)

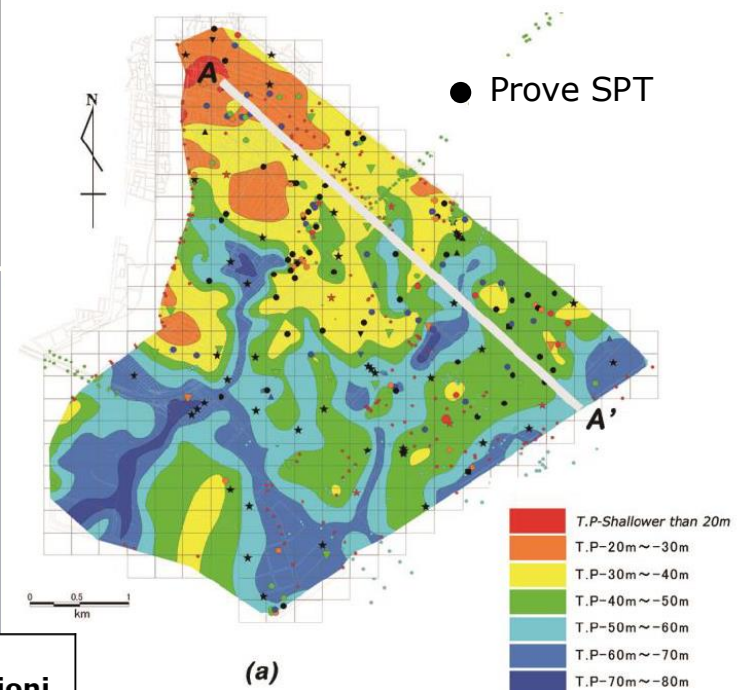
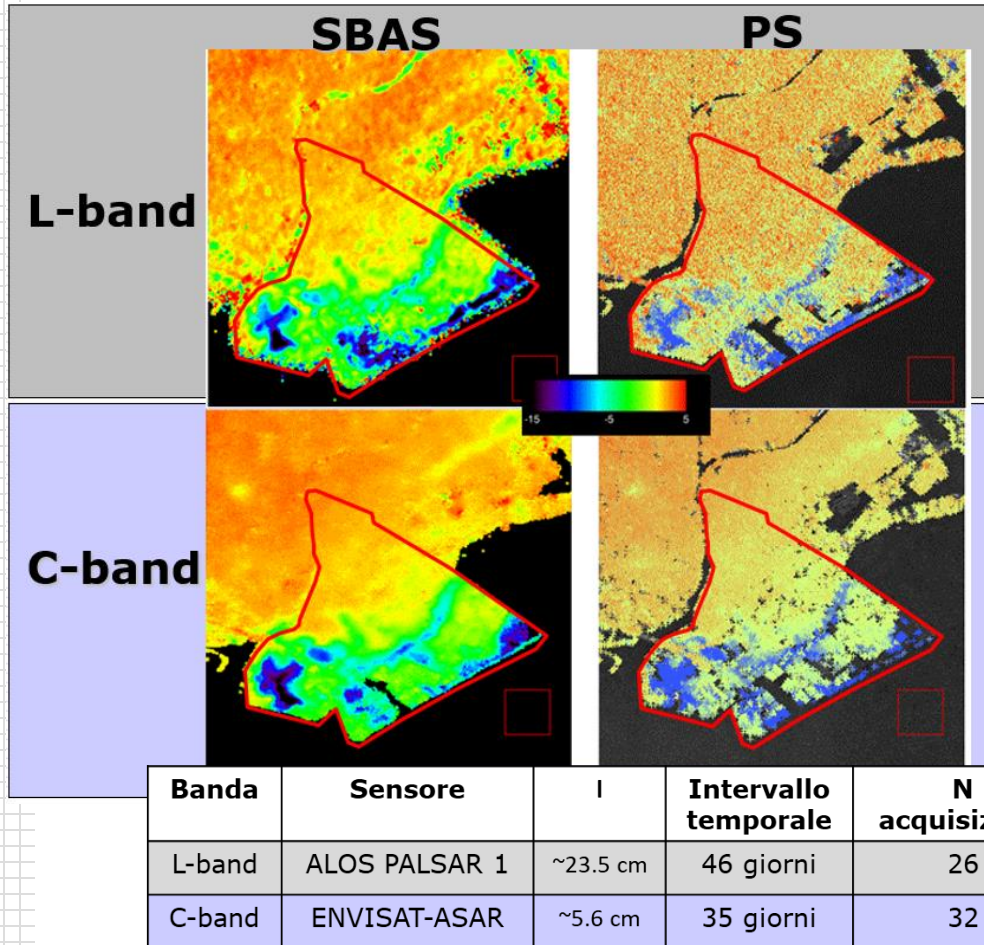


Ripascimento
(landfill) area a
Urayasu
(Giappone)

Consolidamento
naturale

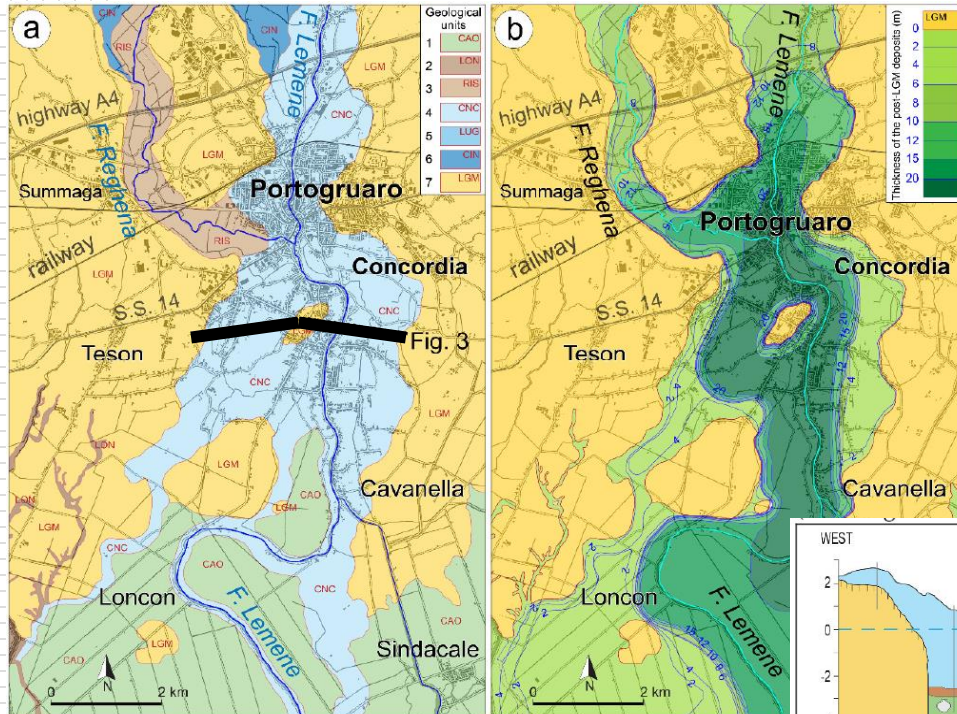


Deformazioni VS stratigrafie



Correlazione spaziale tra le aree in subsidenza e la mappa stratigrafica che rappresenta la profondità dello strato più competente.

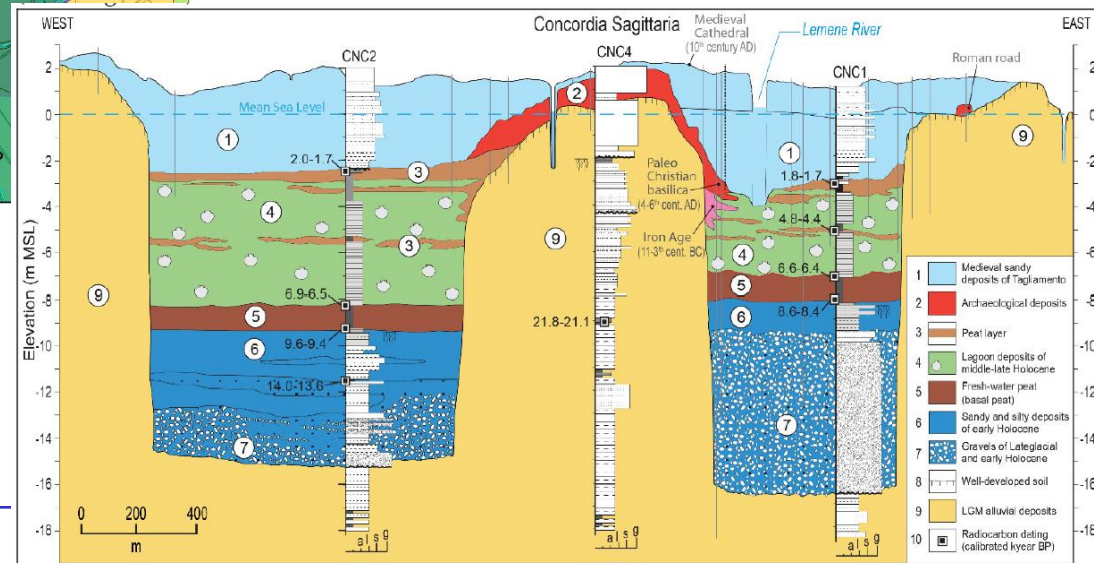
Cartografia da satellite: Portogruaro e Concordia Sagittaria

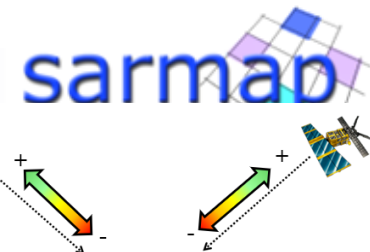
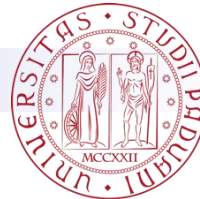


(a) Mappa delle unità geologiche
(b) Mappa della profondità dei depositi post-LGM

Floris et al. (2019)

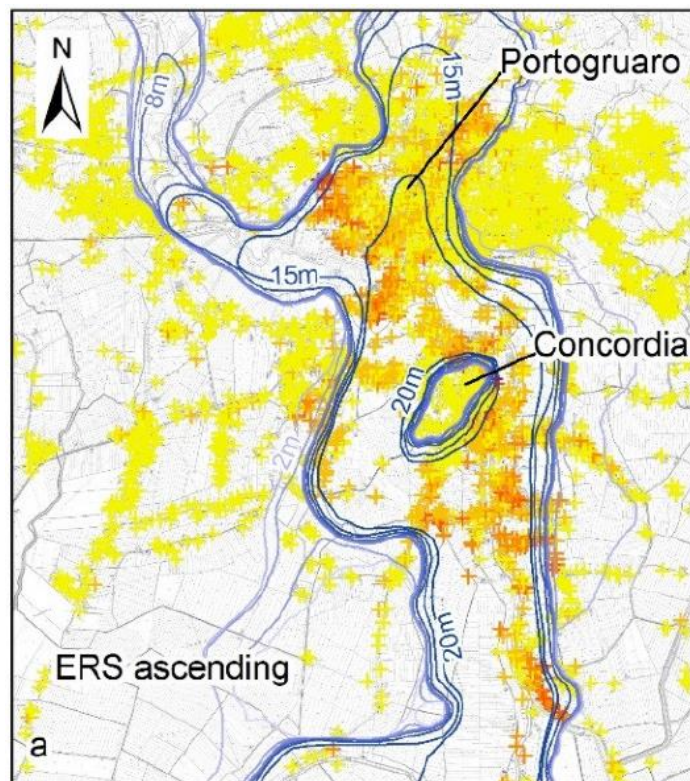
- Megafan del fiume Tagliamento
- Spessore: 500-800 m complessivi
- Durante il LGM si è sviluppato un suolo **sovraconsolidato** (in aree specifiche)
- **Incisioni** in corrispondenza del Reghena e Lemene, larghezza variabile 500-2000 m
- Le incisioni si sono riempite di sedimenti del tardo Quaternario per circa 15-20m



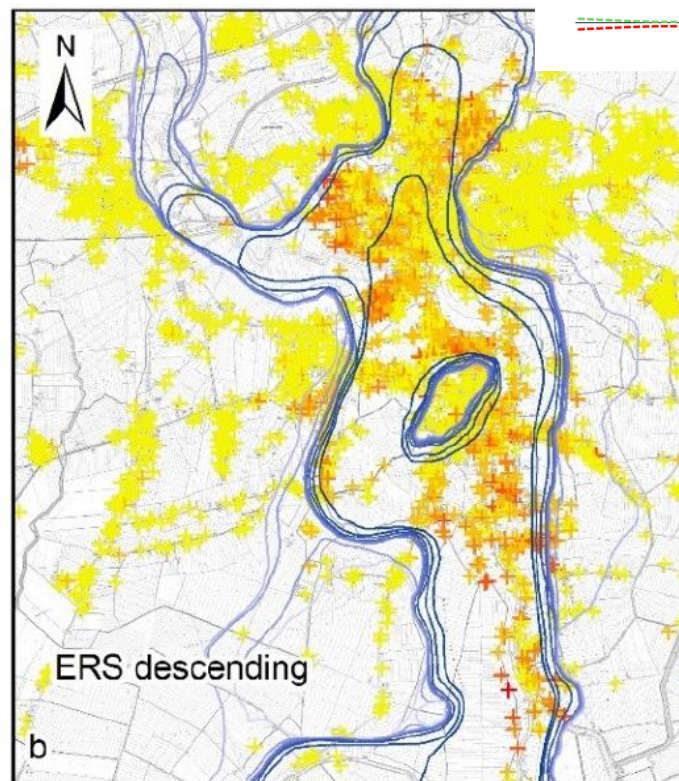


Velocità media LOS

Giu1992-Dic2000



Ago1995-Ago2000



PS vel (mm/year)

- + <= -10
- + > -10 - -5
- + > -5 - -3
- + > -3 - -1.5
- + > -1.5 - 1.5
- + > 1.5 - 3
- + > 3 - 5
- + > 5 - 10
- + > 10

Isopach (m)

- 0
- 2
- 4
- 6
- 8
- 10
- 12
- 15
- 20

Rosso: allontanamento dal sensore LOS
(*diverso dalla convenzione)

Risultati da acquisizioni ASC e DES
concordi: movimento verticale

Banda	Sensore	Geometria (N acq)	l	Periodo	Intervallo temporale	Risoluz. a terra
C-band	ERS	DESC(63) ASC(37)	~5.6 cm	Giu1992-Dic2000 Ago1995-Ago2000	36 gg	25 m
C-band	ENVISAT	DESC(71)	~5.6 cm	Feb2003-Lug2010	36 gg	25 m
X-band	CosmoSkyMED	DESC(66)	~3.1	Feb2012-Gen2016	12 gg	3 m
C-band	Sentinel 1	DESC(91)	~5.6 cm	Gen2014-Dec2019	6/12 gg	15 m

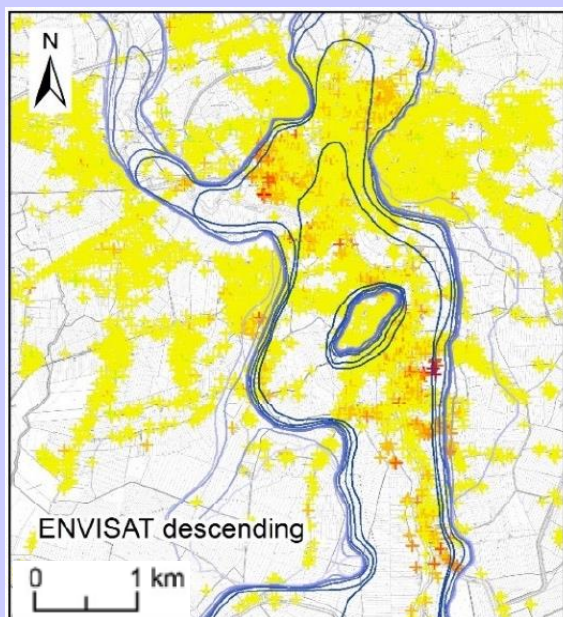
Velocità LOS

Ps vel (mm/year)



ENVISAT

Feb2003-Lug2010

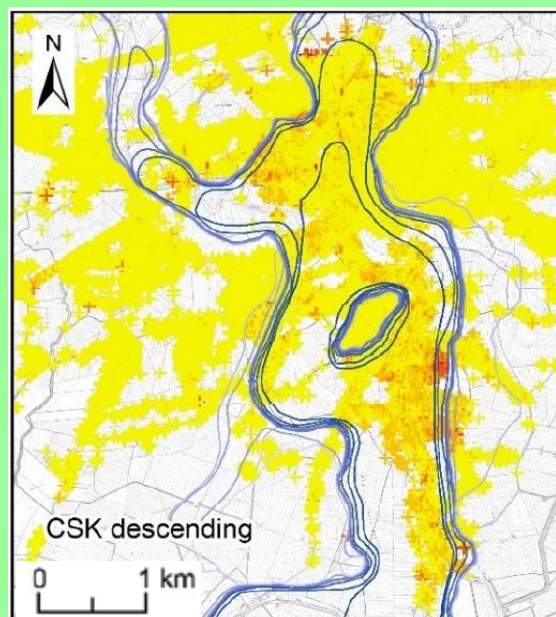


Vel LOS: + ~9% (ERS)

Densità PS*: 102 km²

CosmoSkyMED

Feb2012-Gen2016

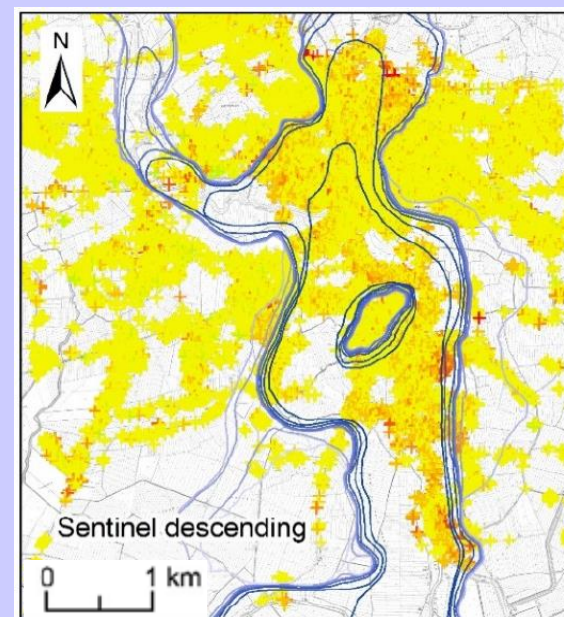


Vel LOS: + ~19% (ERS)

Densità PS*: 4765 km²

Sentinel 1

Gen2014-Dec2019

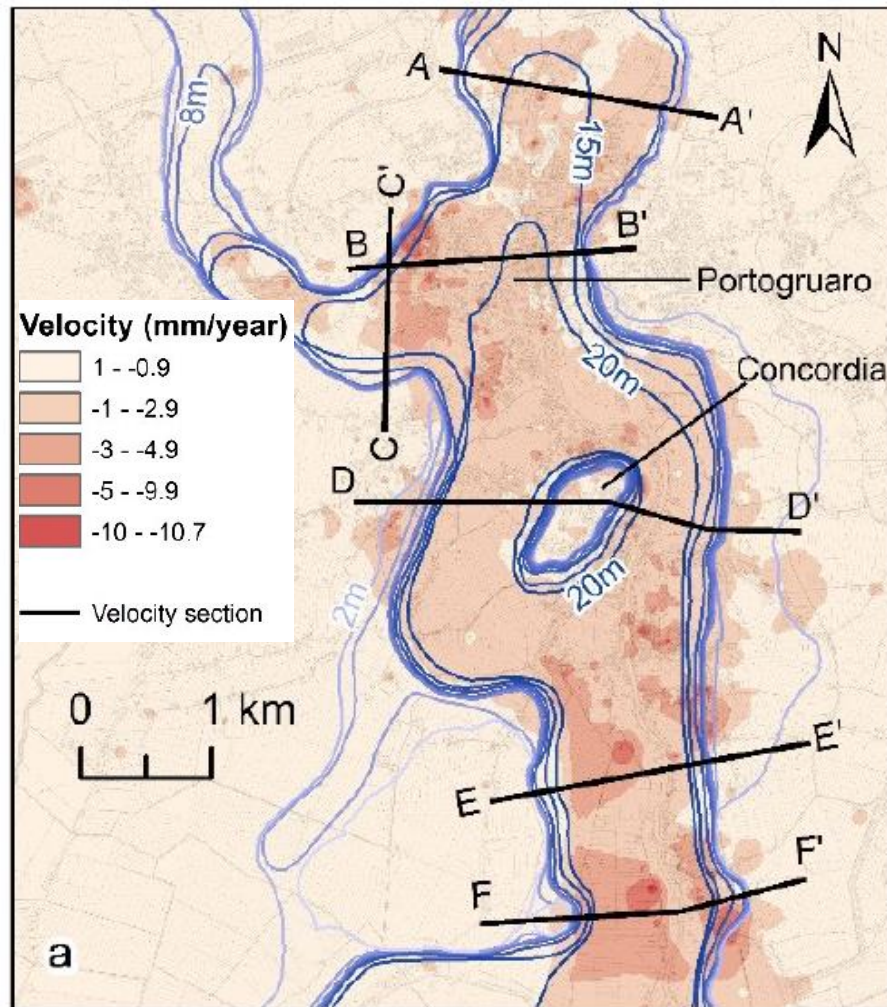


Vel LOS: + ~25% (ERS)

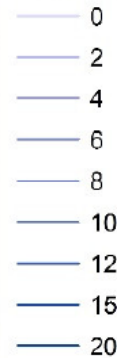
Densità PS*: 1266 km²

Deformazioni verticali ERS

Tasso di subsidenza diverso tra i **depositi** dell'Eocene nell'**incisione fluviale** (da -1 a -10 mm/anno) e i **depositi del LGM** nella **pianura** (da -0.9 a +1 mm/anno)

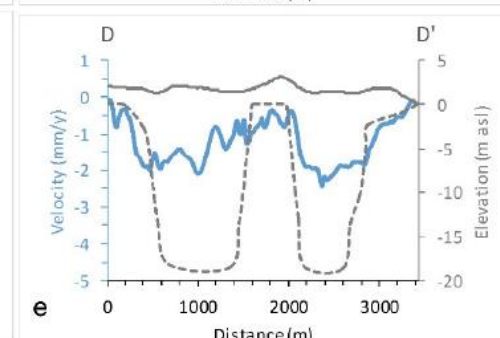
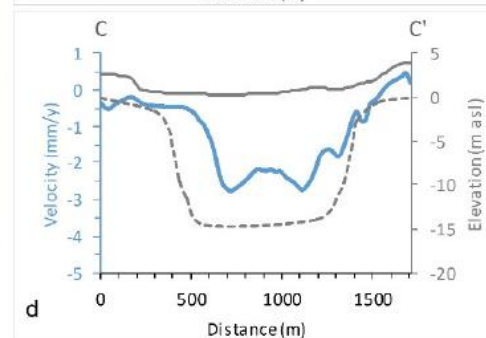
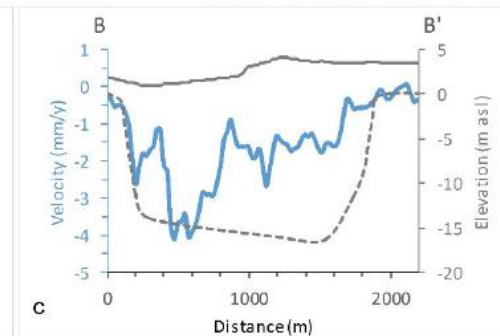
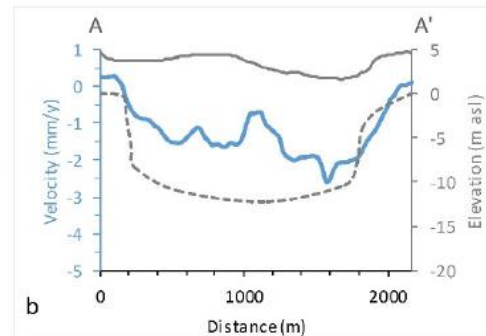


Isopach (m)

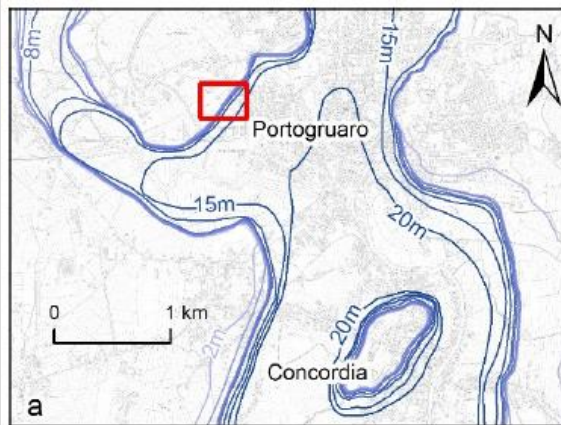


A Concordia Sagittaria è evidente la corrispondenza tra **velocità** e profondità del **LGM** in corrispondenza di un **terrazzo alluvionale**

Legend of cross sections

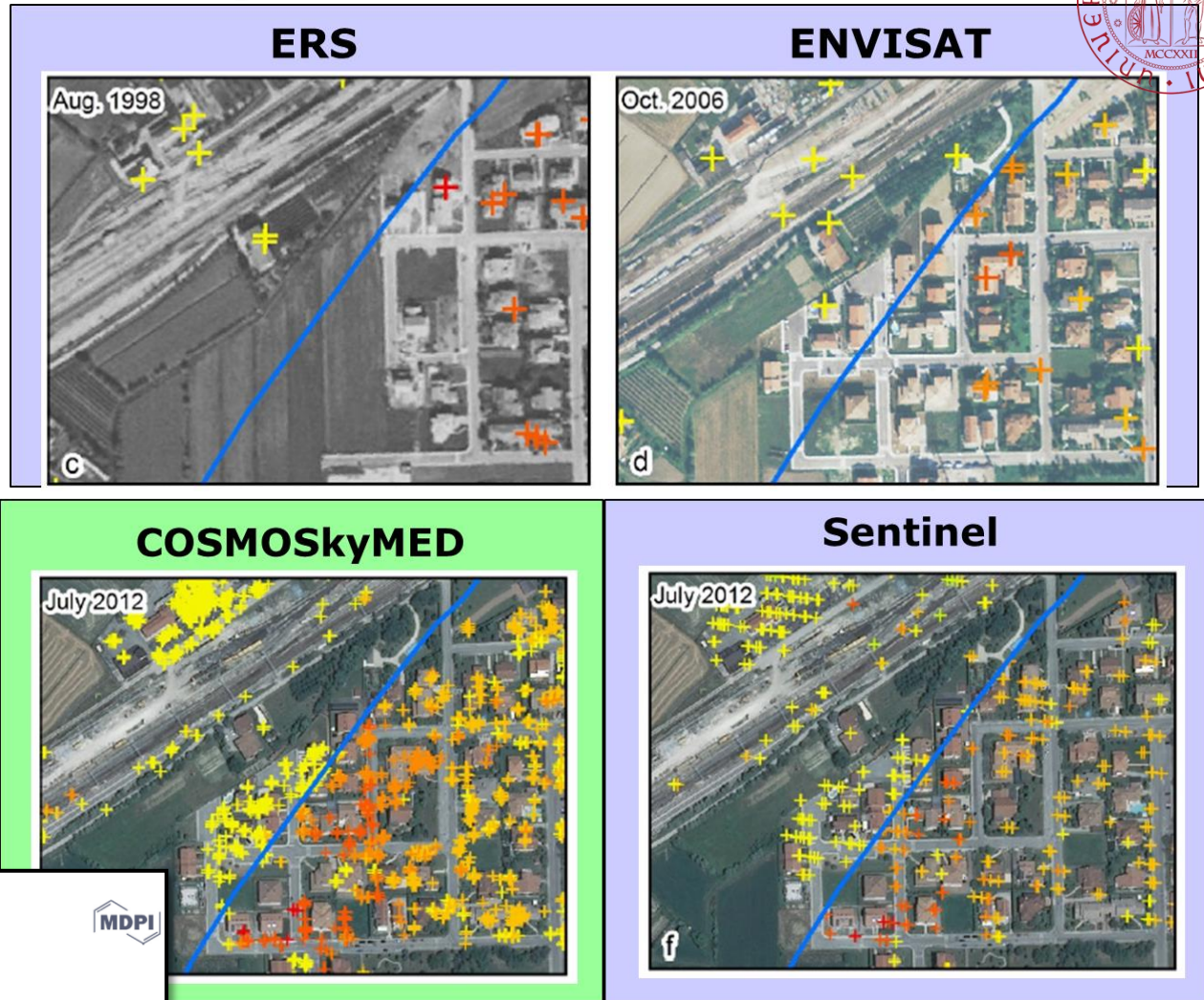


Evoluzione nel tempo: 1989 - 2012:



Per tutti i dataset:

- Tutte le aree all'interno dell'**incisione** sono caratterizzate da **subsidenza**
- Tutte le aree esterne all'incisione sono **stabili**



Ps vel (mm/year)



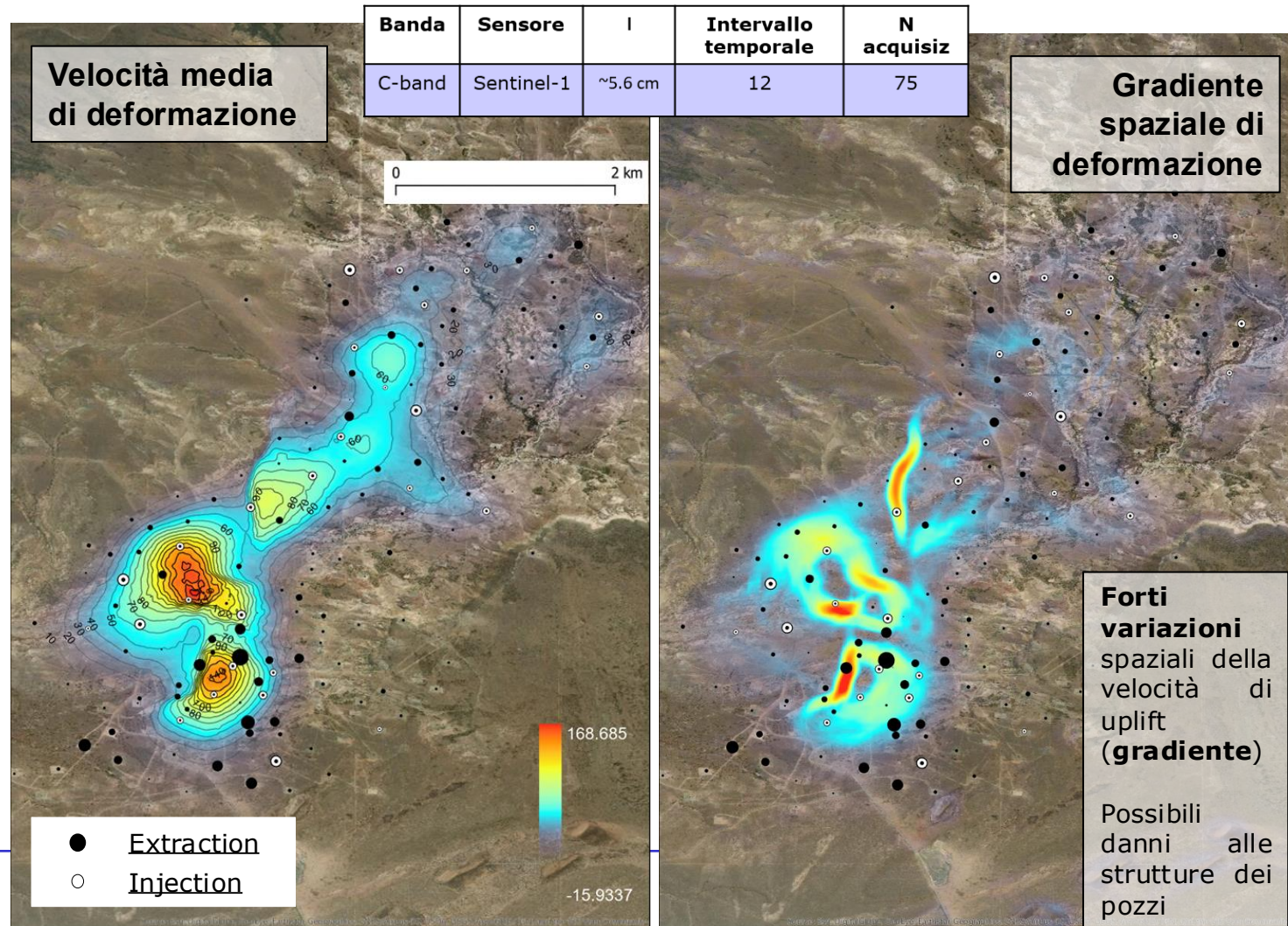
Estrazione di idrocarburi (Argentina)

Produzione di **idrocarburi** con metodi **convenzionali** e **non convenzionali**



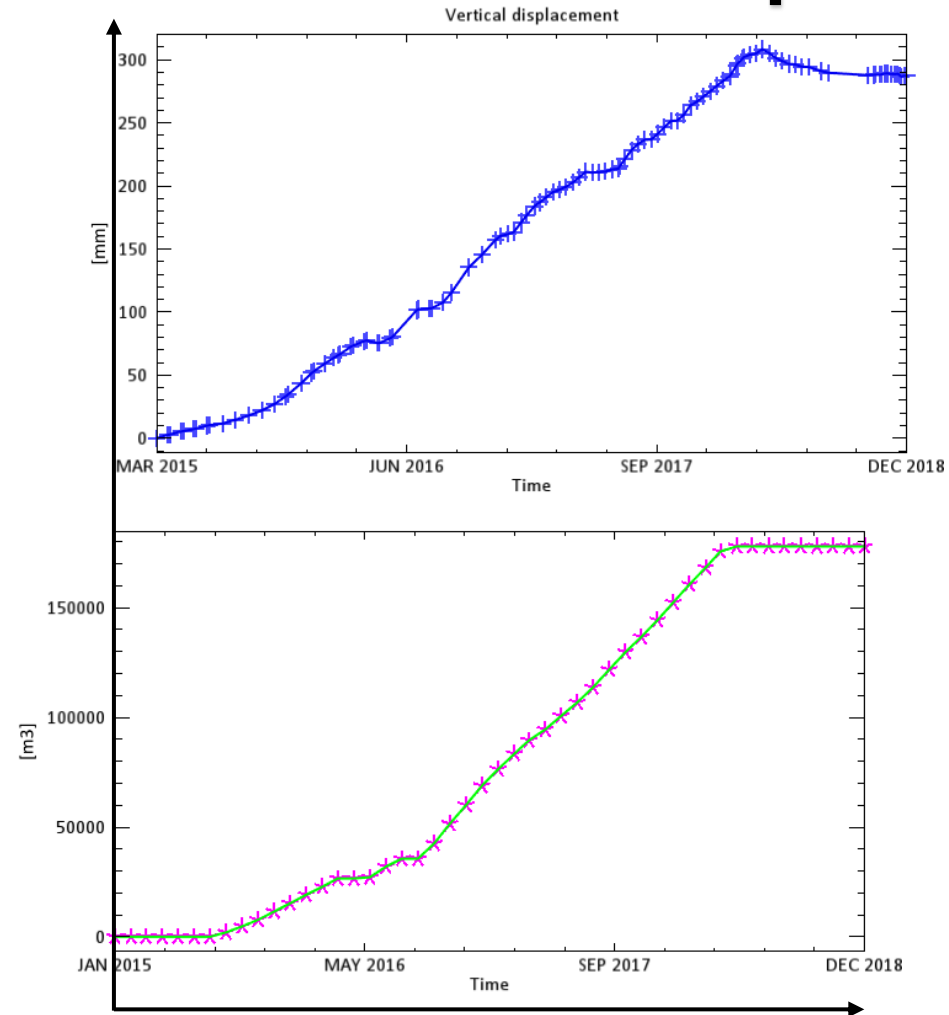
Tasso di spostamento
positivo -> uplift

Uplift **maggiore**
in prossimità dei
pozzi legati a
iniezione di
acqua



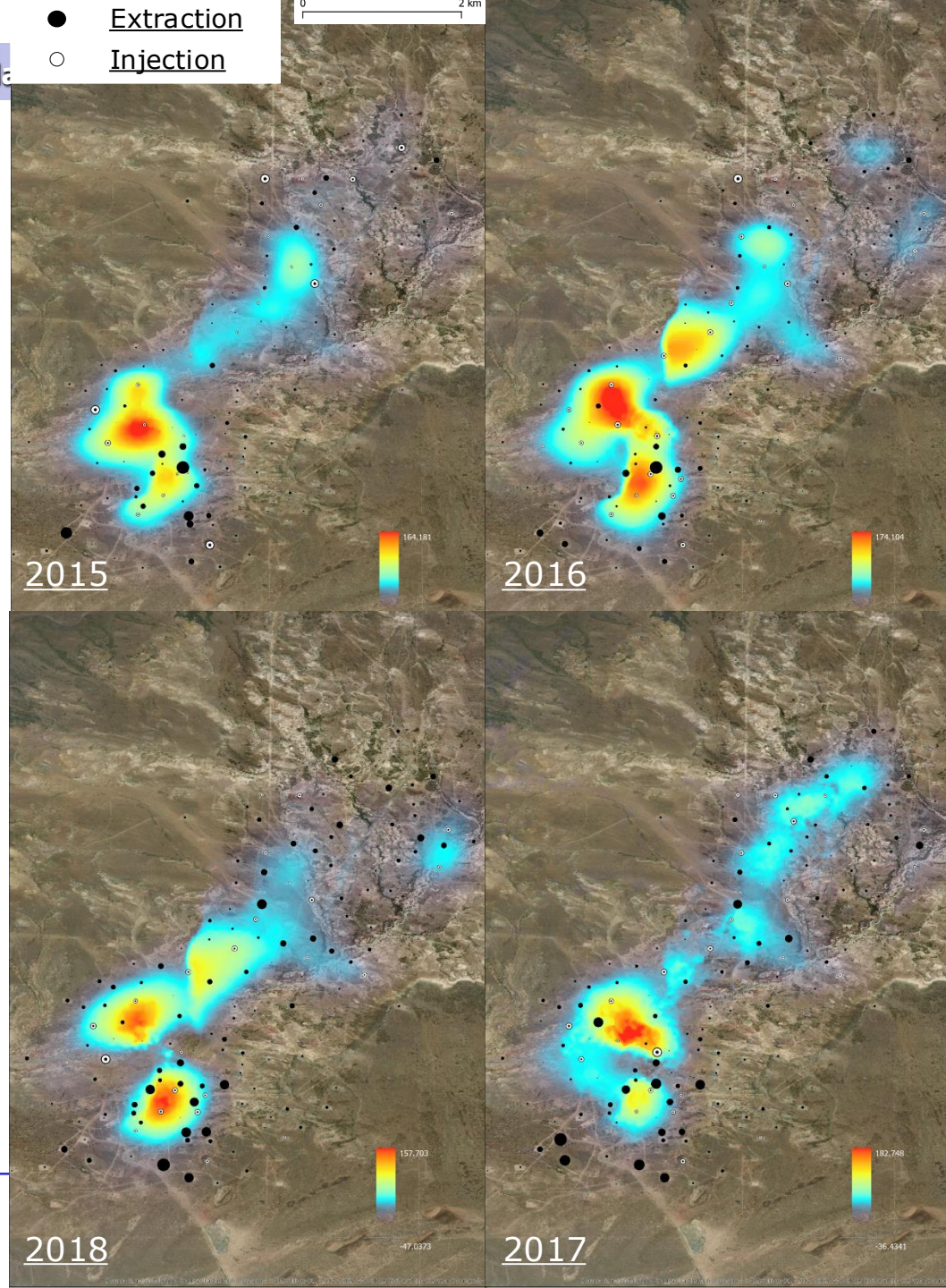
Confronto: uplift cumulato VS volume d'acqua

- Scelto di analizzare la **cumulata delle deformazioni** in corrispondenza di un punto a forti **uplift**
- Confronto con la cumulata nello stesso periodo del **volume di acqua** iniettata in corrispondenza del maggior gradiente
- **Alta correlazione temporale** tra l'uplift cumulato e il totale del volume d'acqua iniettato
- La **deformazione** subisce un **arresto** in corrispondenza dello stop alle iniezioni.
- E visibile una variazione di tendenza.



Uplift cumulato annuale

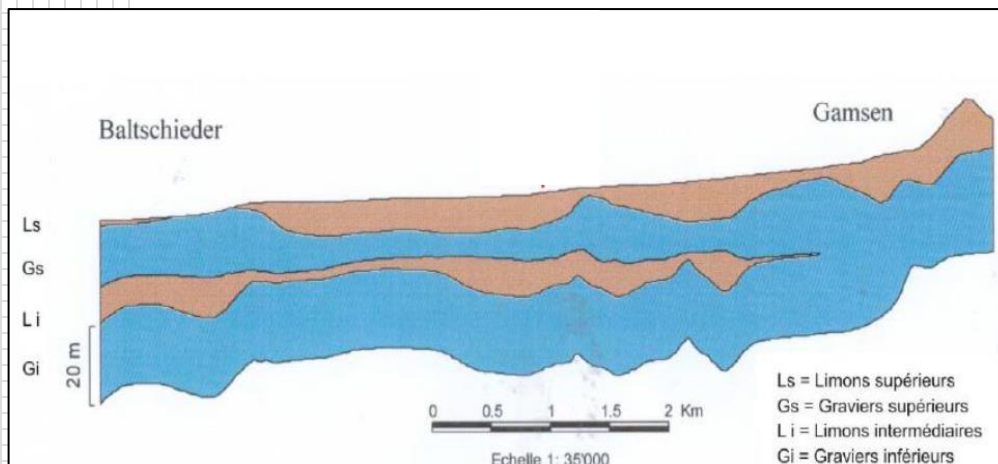
- Variazione totale annuale in mm dello spostamento
- Il **pattern spaziale** dell'uplift varia di anno in anno
- Il pattern varia in funzione della **distribuzione locale** di estrazione e iniezione.
- I valori **massimi** cumulati si osservano a fine **2016** e **2017**.



Subsidenza in Valle Alluvionale: Valle del Rodano (Valais, CH)

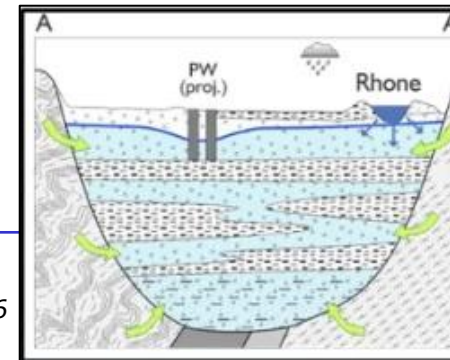


- Innalzamento dell'acqua di falda
- Interventi continui per abbassarla
- Opere di sistemazione idraulica alveo (3a correzione del Rodano)
- Costruzione tratta autostrada A9
- Danni per allagamento
- Possibile contaminazione della falda



Kimmeier, 2001

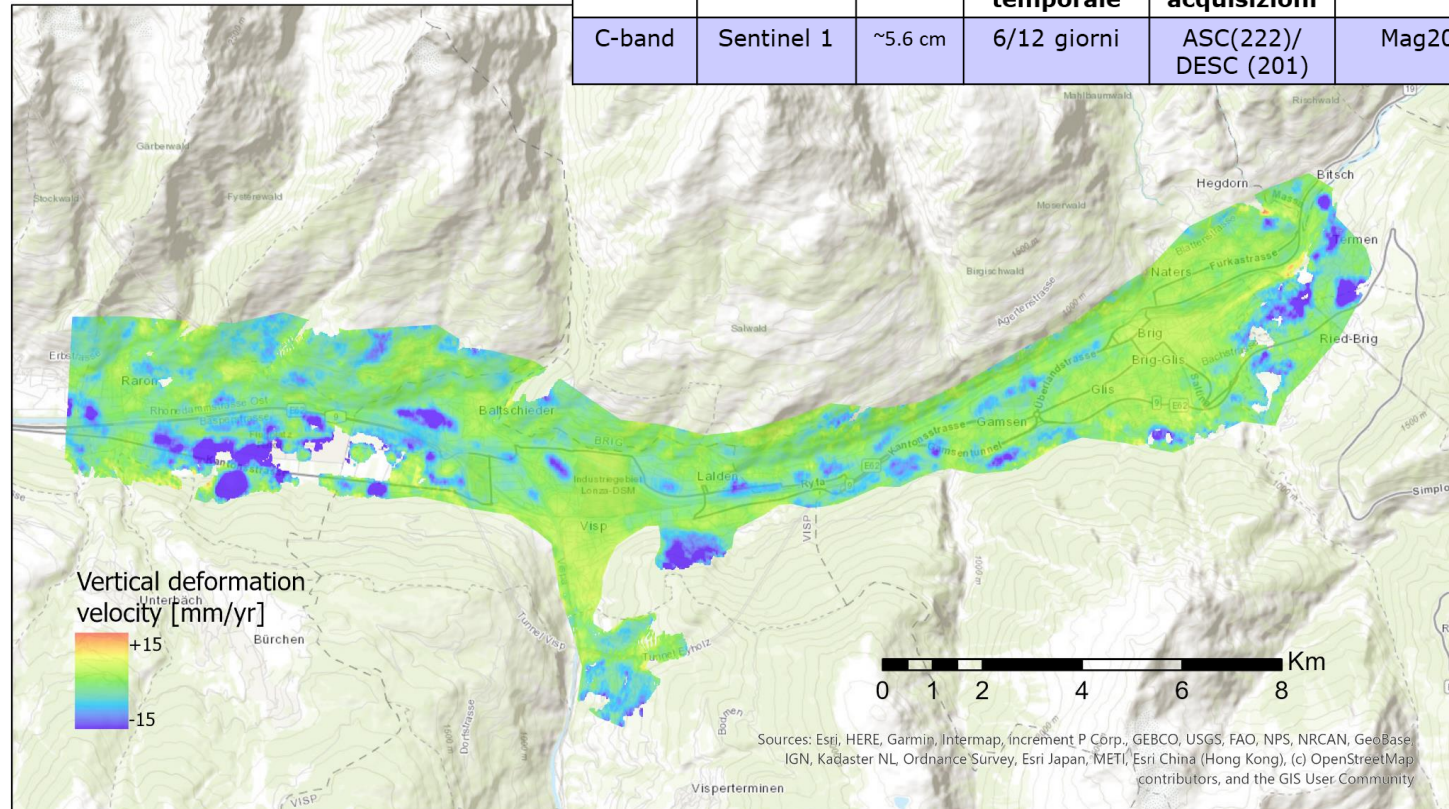
codice	descrizione	Spessore
Ls	depositi alluvionali superficiali	10 m
GS	Ghiaie	16 m
AC	depositi alluvionali intermedi	20 m (o assenti)
Gi	Ghiaie	20 m



- Bedrock: 100 (Visp) m
- Acquifero multistrato

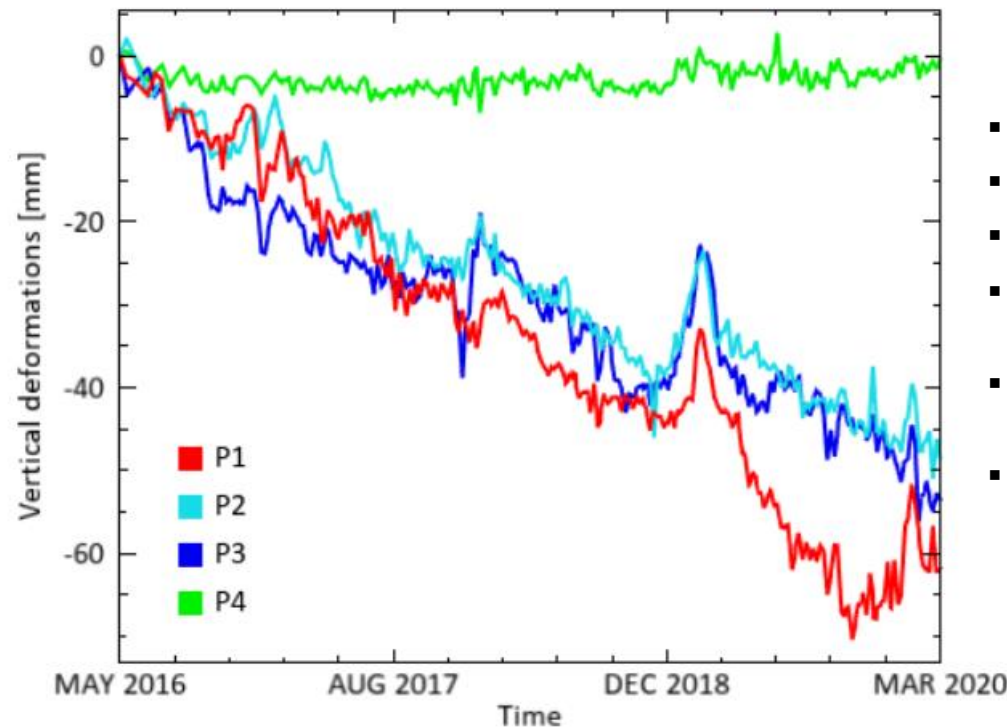
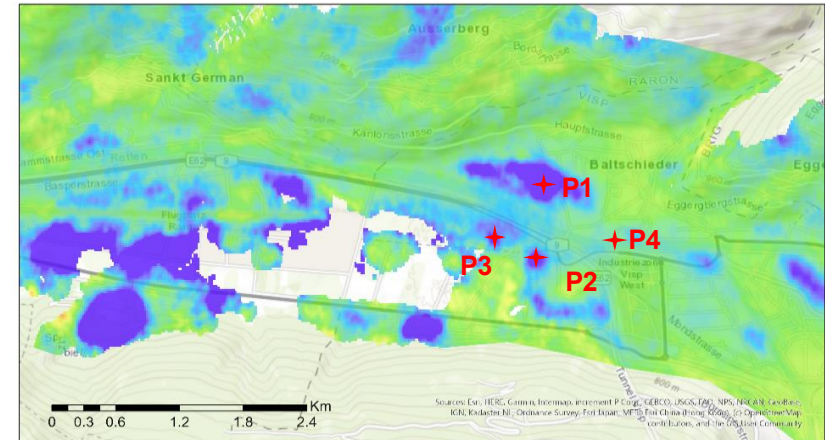
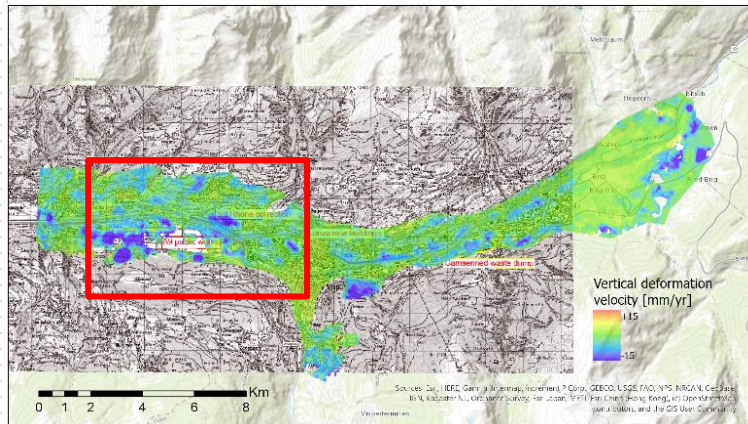
Subsidenza

Banda	Sensore	I	Intervallo temporale	N acquisizioni	Periodo di Analisi
C-band	Sentinel 1	~5.6 cm	6/12 giorni	ASC(222)/DESC (201)	Mag2016-Mar2020



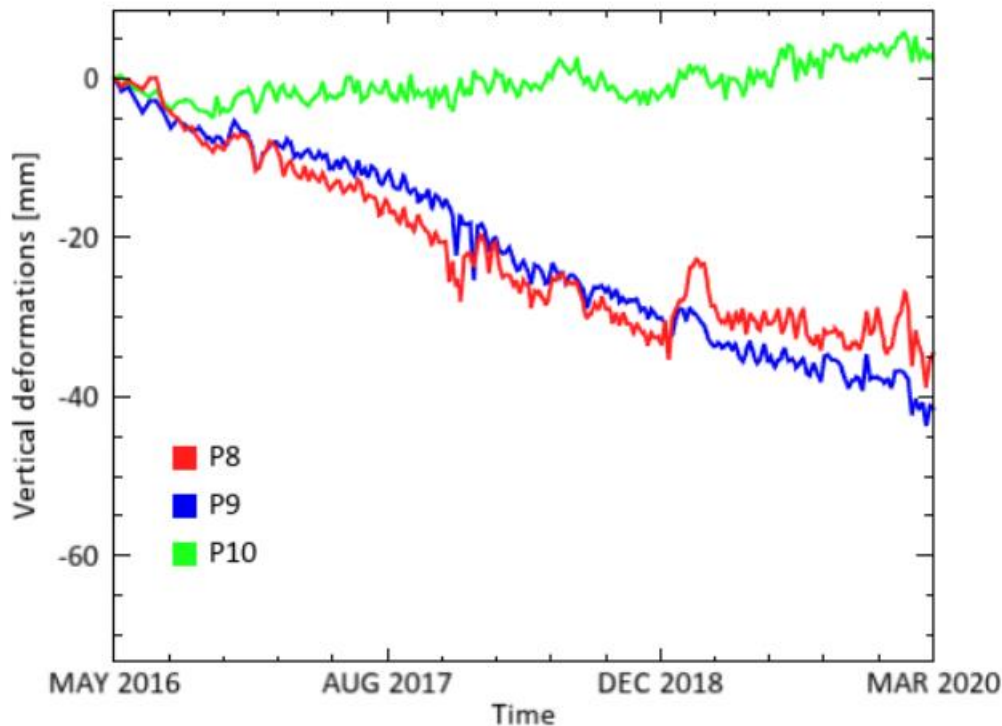
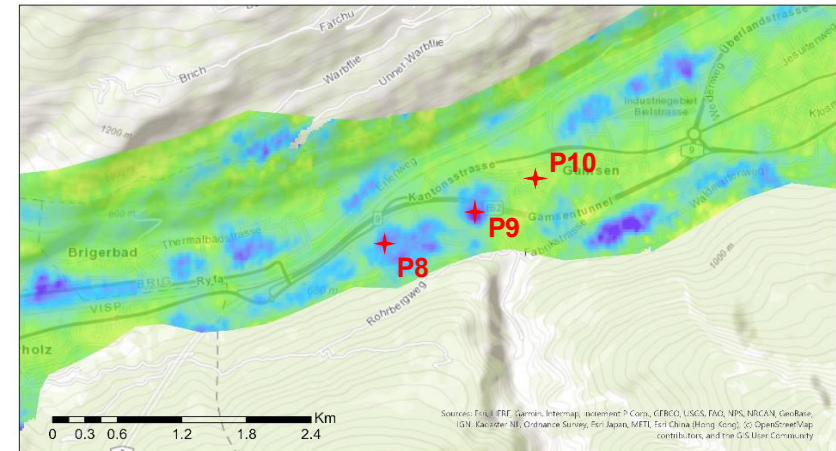
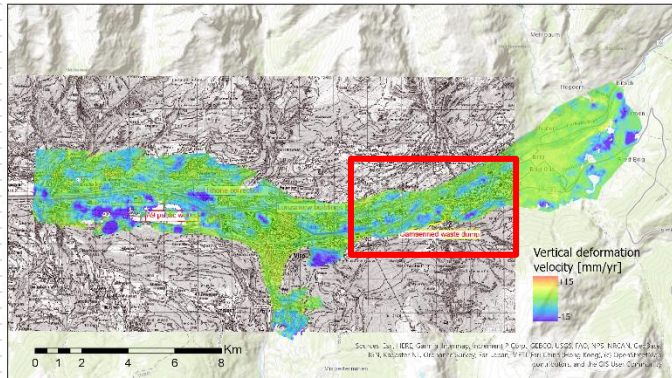
- Diverse aree sono soggette a subsidenza
- Subsidenza in tutti e 3 i punti interesse >15 mm/anno

Time series – Zoom 1



- P1: 3a correzione del Rodano
- P2 e P3: lavori per A9
- P4: zona stabile
- P1, P2, P3: deformazione verticale di ~ 60 mm in 4 anni
- Andamenti stagionali delle serie storiche di deformazione
- Locali inversioni di tendenza dei trend di deformazione

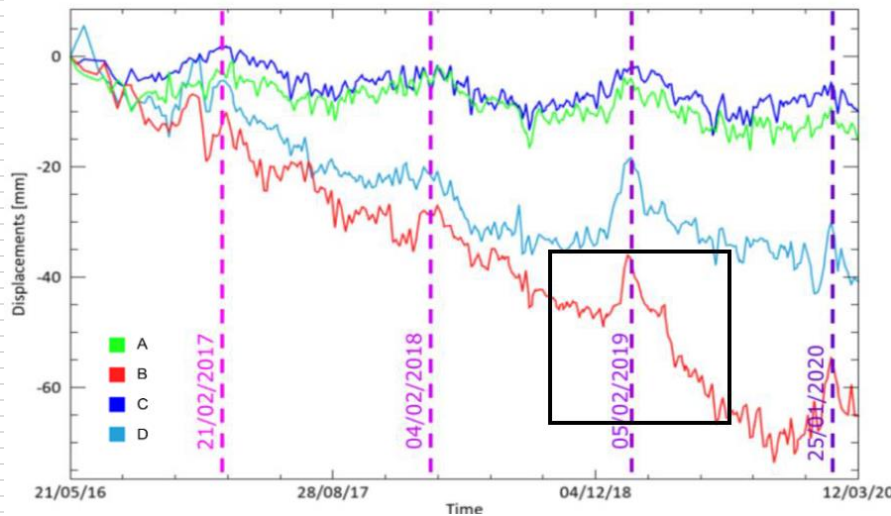
Time series – Zoom 2



- P8, P9: discarica **Attenzione**
- P10: zona stabile
- P8, P9: deformazione verticale di ~ 40 mm in 4 anni
- P8, P9: improvvisa accelerazione a Febbraio 2019

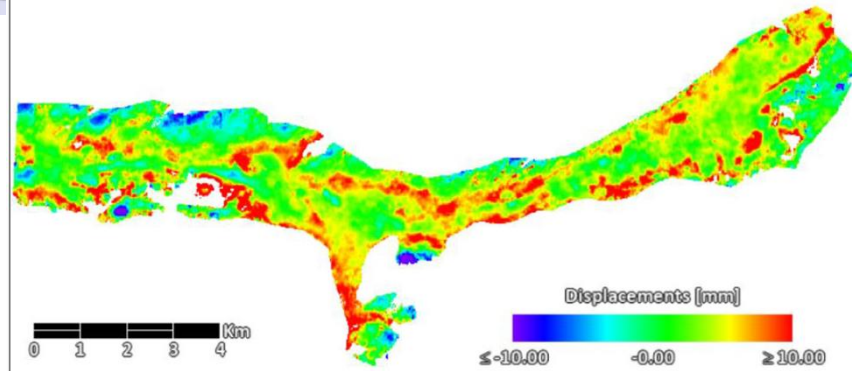
Trend stagionali

- Picco di spostamento: 5 Febbraio 2019
- Analisi nei 6 mesi precedenti e in quelli successivi
- Comportamento opposto uplift/subsidenza nel periodo di analisi Ago2018-Feb2019 vs Feb2019-Ago2019

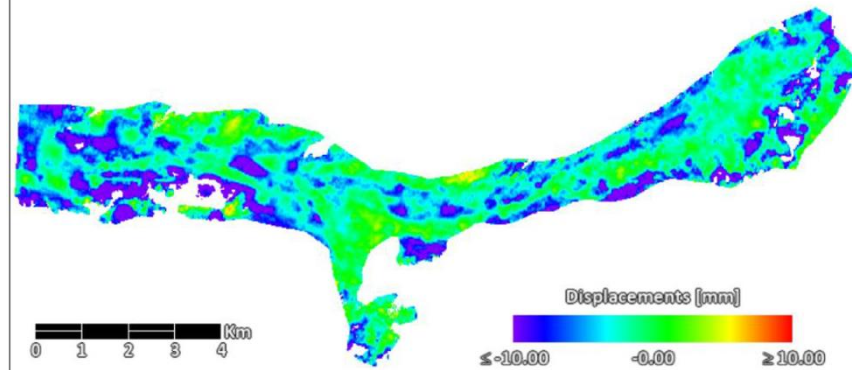


- Spostamento sia in aree subsidenti (B,D) che in aree stabili (A,C)
- A,B e C, D:
 - Stabilità vs subsidenza
 - Andamenti stagionali
- A,C: andamento stagionale

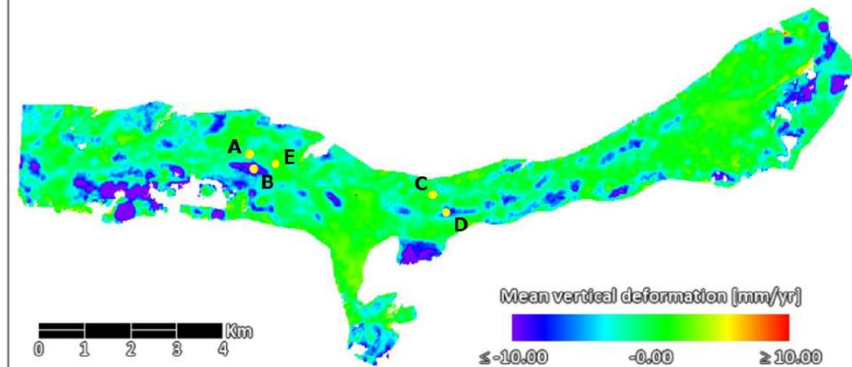
Spostamento cumulato 08 Agosto 2018-05 Febbraio 2019



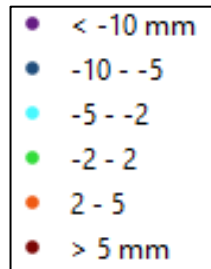
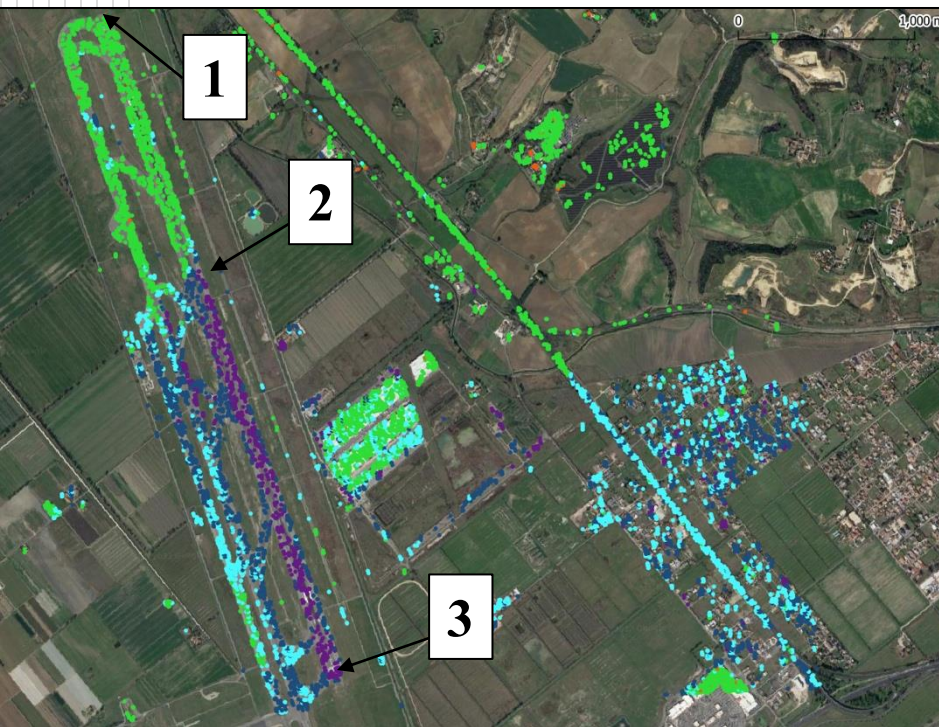
Spostamento cumulato 05 Febbraio 2019-04 Agosto 2019



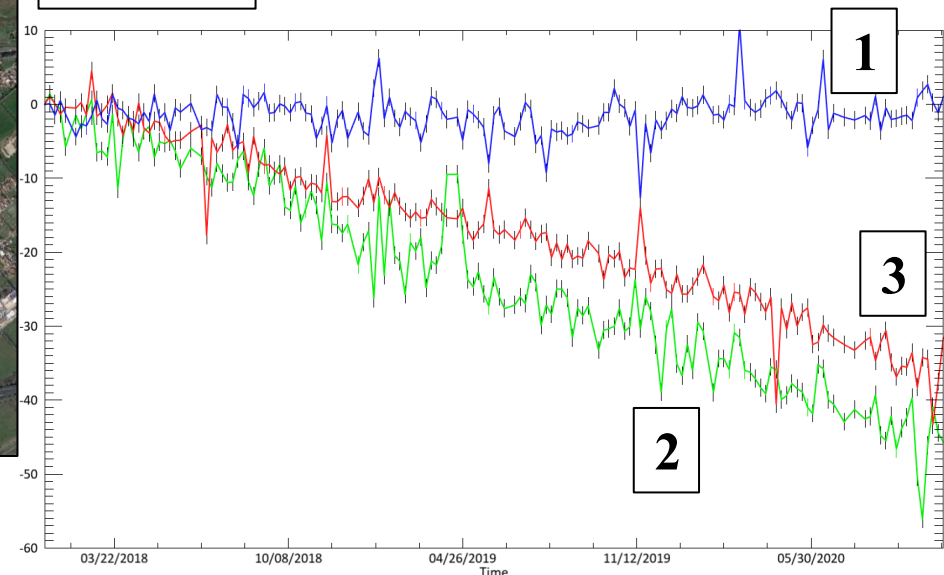
Spostamento cumulate 05 Febbraio 2019-04 Agosto 2019



Subsidenza in aree infrastrutture strategiche: Aeroporto di Roma Fiumicino



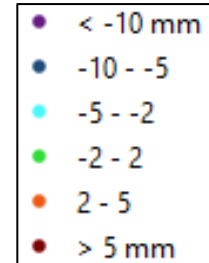
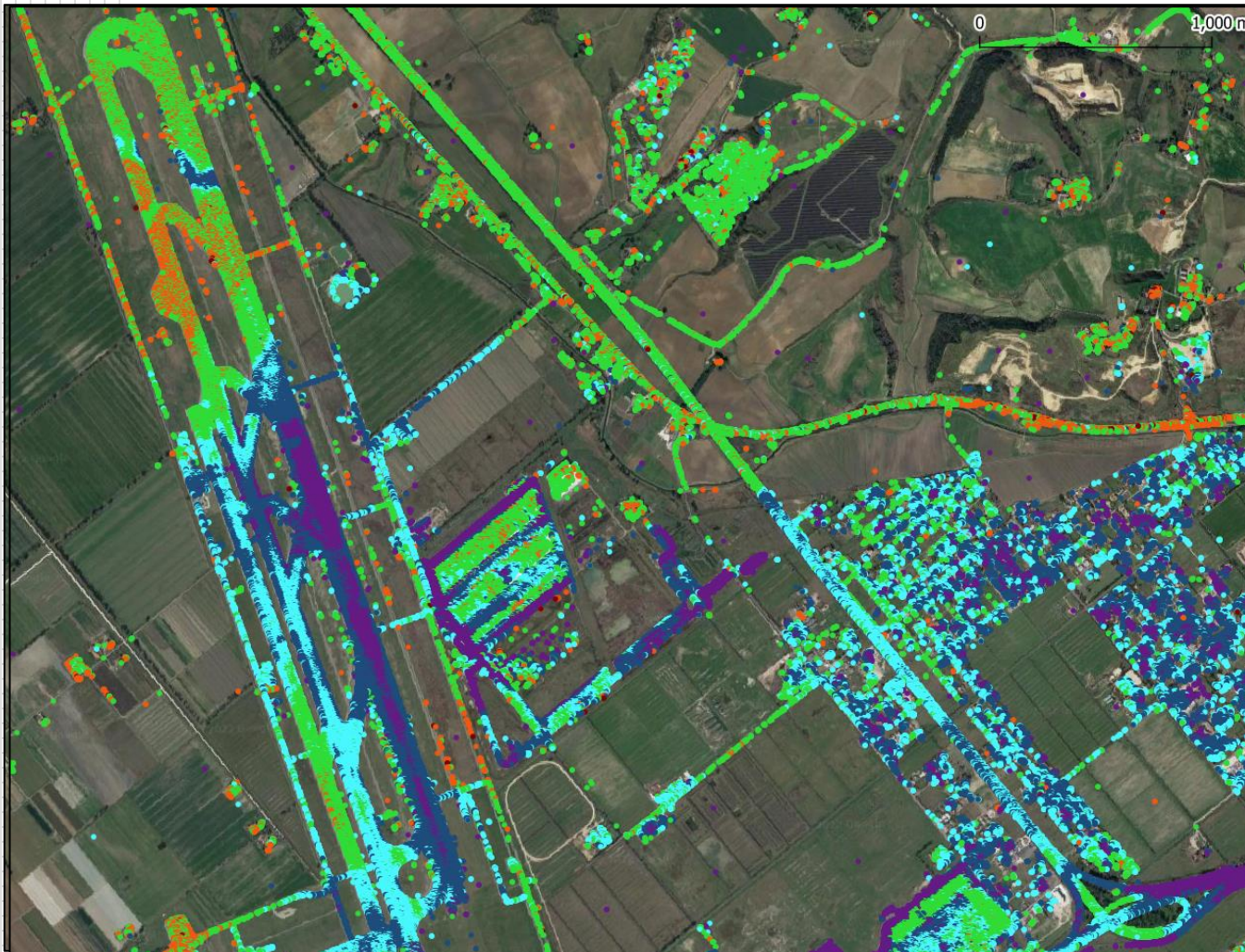
Evidente **differenza** tra il tasso di subsidenza in mm/anno tra l'area **nord** e l'area **sud** della pista 3 e delle piste di rullaggio



- Area nord pista 3 stabile, visibile dalla TS in 1
- Area centrale (TS 2): subsidenza elevata
- Area sud (TS 3): subsidenza elevata

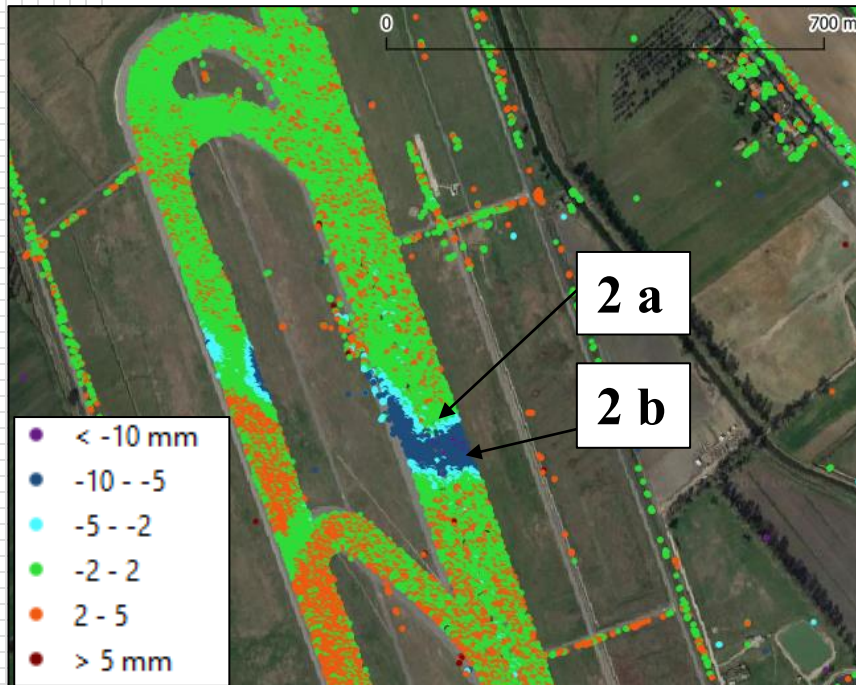
Sentinel-1 vs TerraSAR-X

Agosto 2011 – Maggio 2013



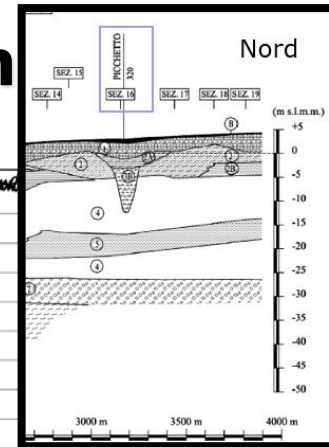
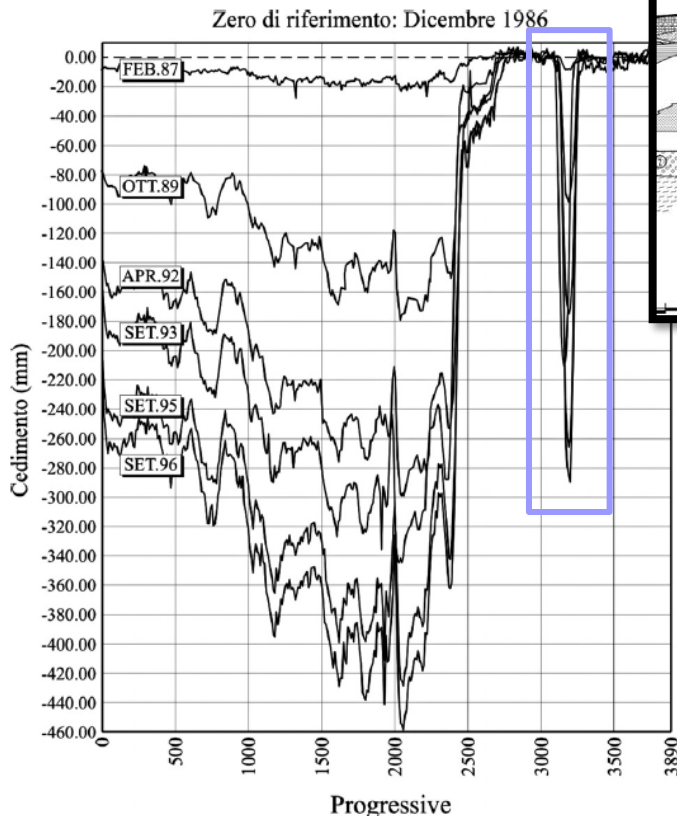
- Maggiore copertura PS con acquisizioni in X-band alta risoluzione (3 m)
- PS che ricoprono tutta la pista
- Visibili dettagli in X-band che erano solamente accenati in C-band

Dettaglio TerraSAR-X pista 3 nord

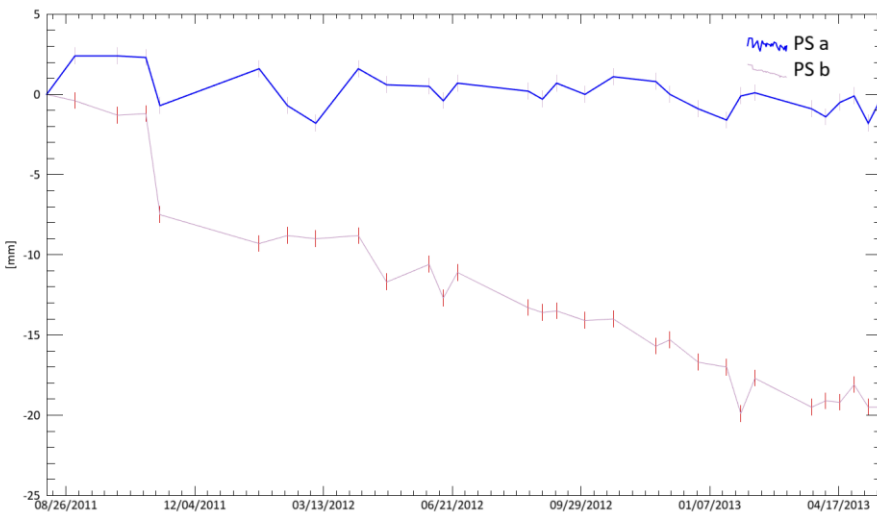


- Area nord della pista 3: area anomala instabile ma localizzata
- Cedimenti misurati corrispondenti alle misure da rilievi topografici dal 1986 al 1996

progr. 3190 m

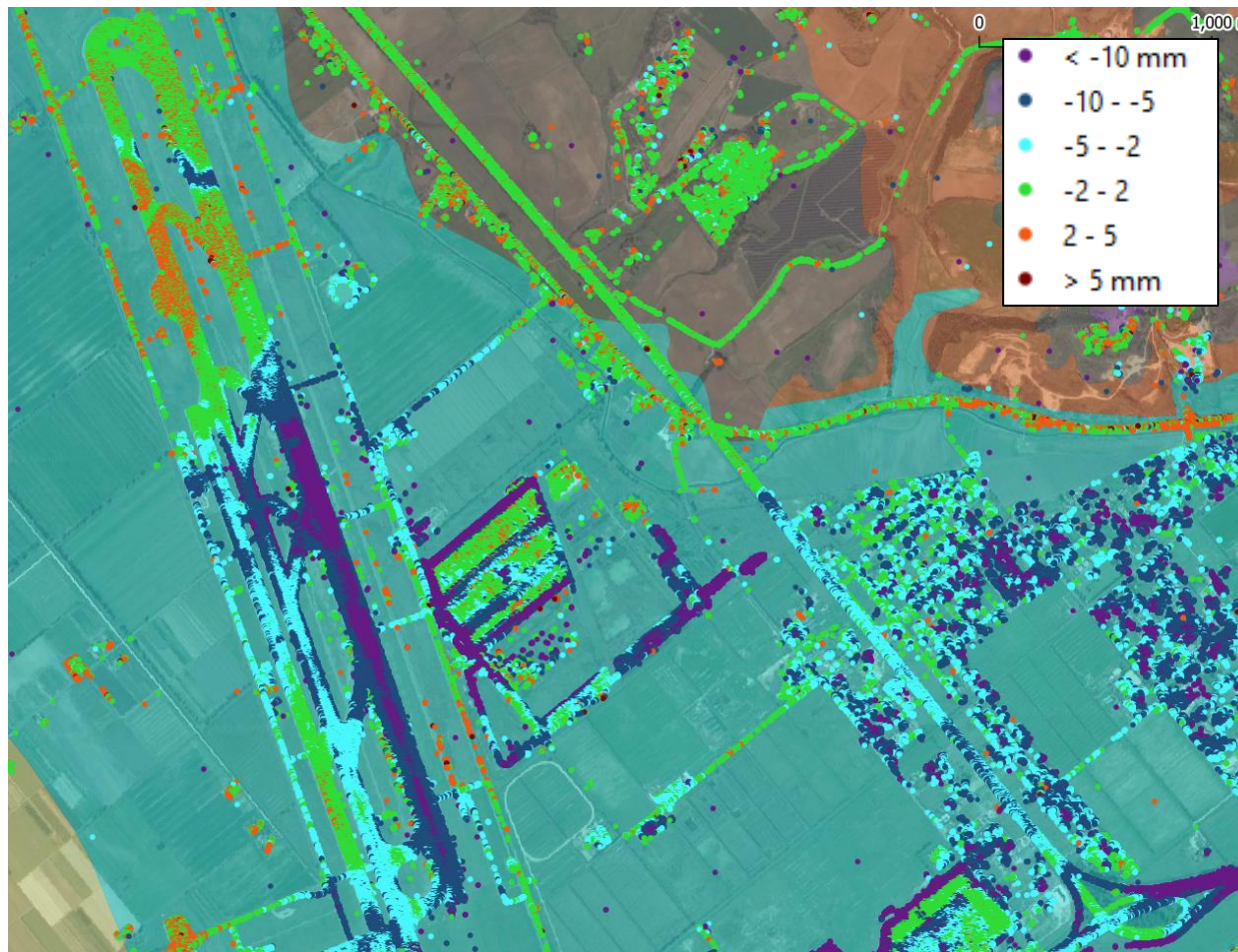


ari



Aggiornamento carte geologiche

- Ridefinizione di limiti litologici accoppiando più tecniche



Aeroporto in
Ghiaia/sabbia/argilla

- Argilla
- Ghiaia/conglomerato
- Ghiaia/sabbia/argilla
- Sabbia
- Sabbia/arenaria
- Tufo litoide

Aeroporto di Mumbai

A Ottobre 2018 l'aeroporto è stato chiuso per consentire la manutenzione della pista

- L'aeroporto è situato sulle rive del fiume Mithi
- ~ 1600 ha di terreno vengono bonificati in questa zona del bacino fluviale



THE TIMES OF INDIA
CITY

City Mumbai Delhi Bangalore Hyderabad Kolkata Chennai Agartala Agra Ajmer Amaravati Ahmedabad

Civic Issues Crime Politics Schools & Colleges Events Citizen Reporter Videos Photos

NEWS / CITY NEWS / MUMBAI NEWS / CIVIC ISSUES NEWS / MUMBAI AIRPORT TO BE CLOSED FOR 6 HOURS ON OCT 23 FOR RUNWAY

TOP SEARCHES: Amruta Fadnavis Shiv Sena Mumbai fire Floods in Mumbai Mumbai rains Mumbai

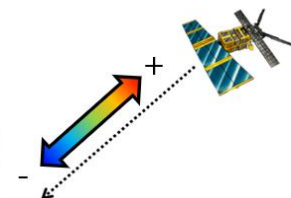
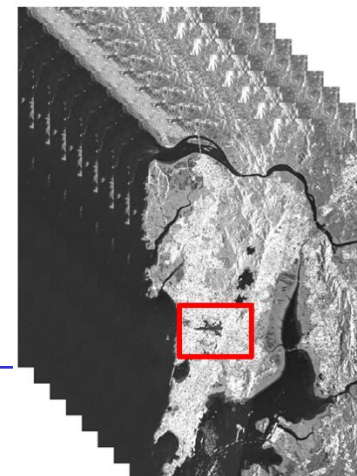
Mumbai airport to be closed for 6 hours on Oct 23 for runway work

TNN | Oct 4, 2018, 04:36 IST

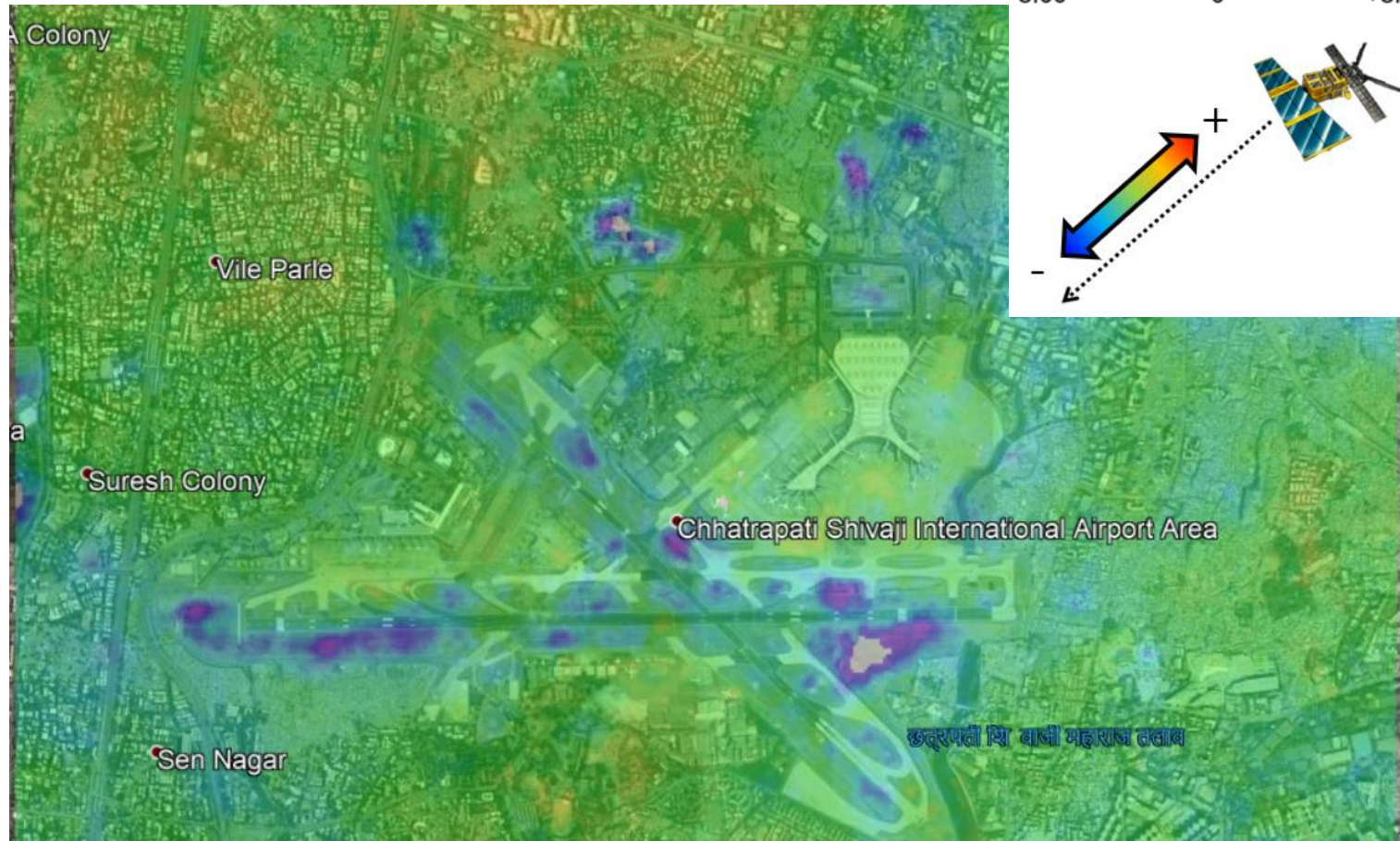
MUMBAI: Mumbai airport will be shut for six hours on October 23 and then for three days every week from February 7 to March 30 next year for runway maintenance.

Mumbai airport (File Photo)

Banda	Sensore	Geometria	I	Periodo	Intervallo temporale
C-band	Sentinel 1	(DESC)	~5.6 cm	Set 2016-Lug 2018	12 gg



Velocità media di deformazioni



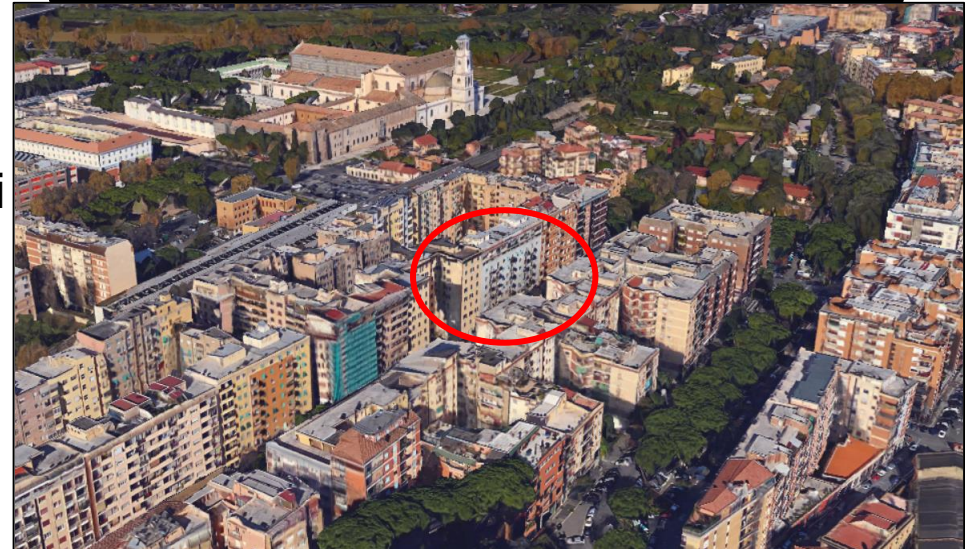
I cedimenti si stanno verificando vicino alle piste su superfici non asfaltate e in prossimità del fiume

Roma, Quartiere Ostiense

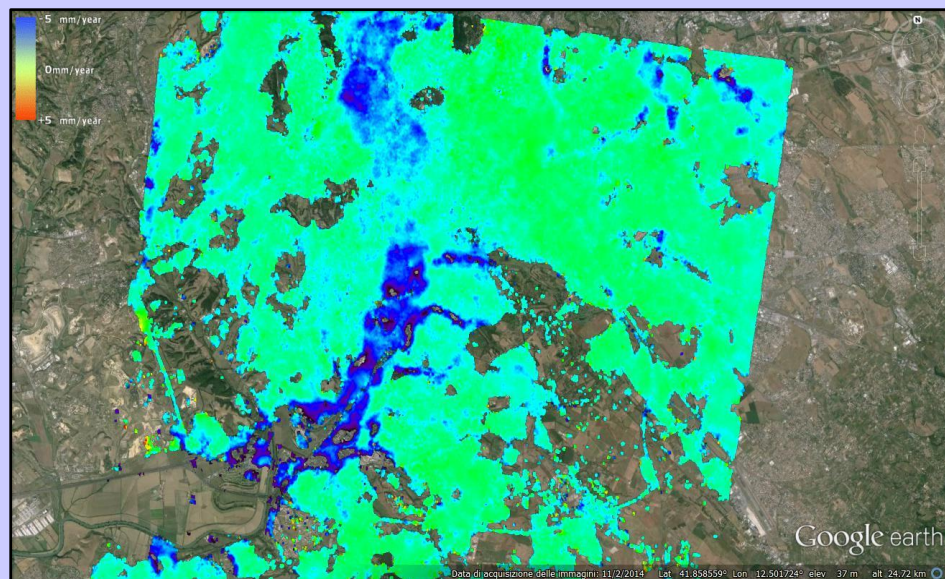
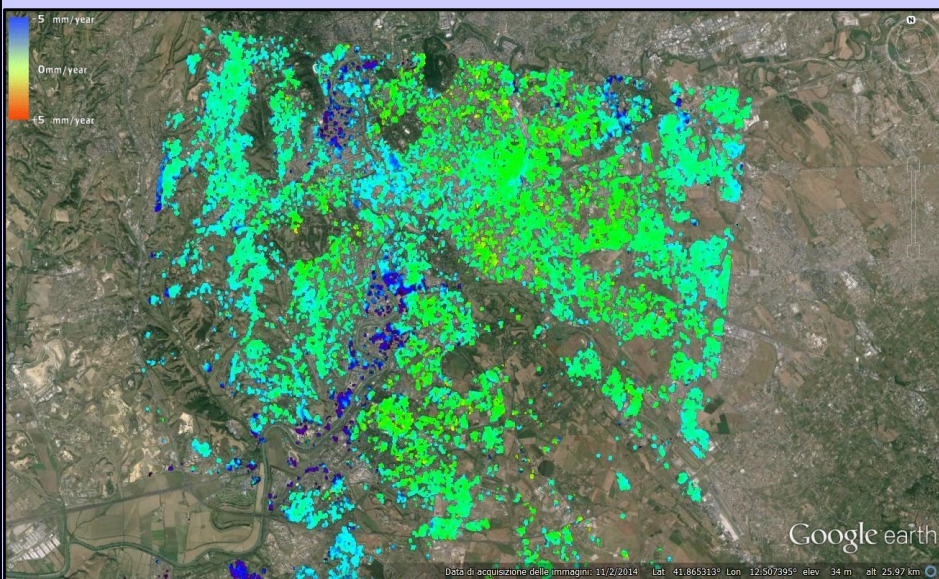


Edificio residenziale a più piani
(tipico edificio romano anni
1950/60)

Materiale: cemento armato
Altezza: 30 m (9 piani)
Larghezza = ~ 50 m

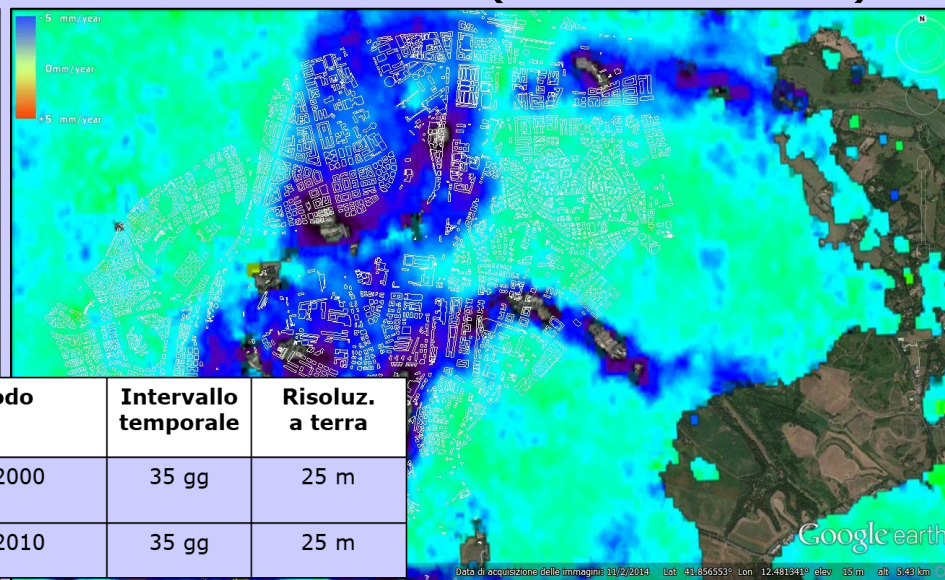
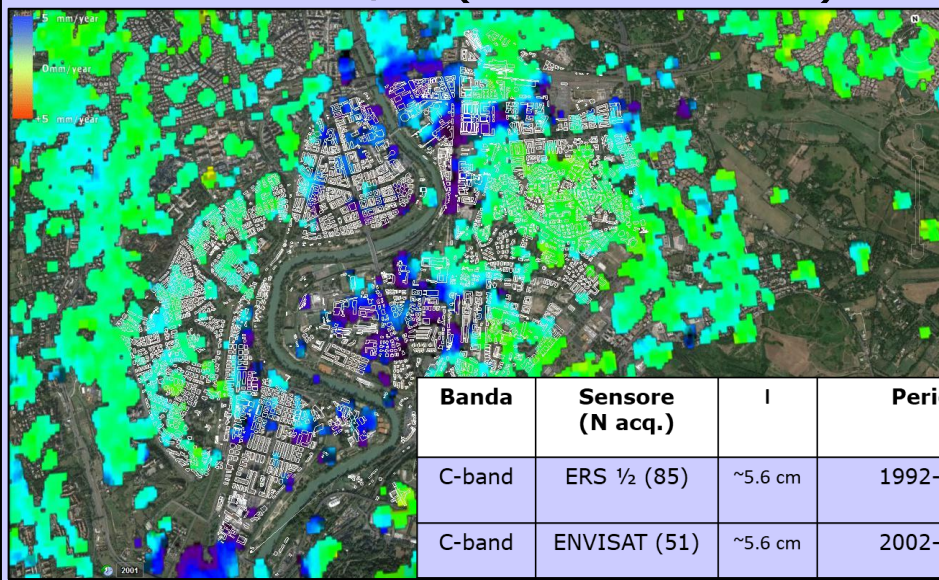


Mappe di deformazione



ERS-1/2 (1992 – 2000)

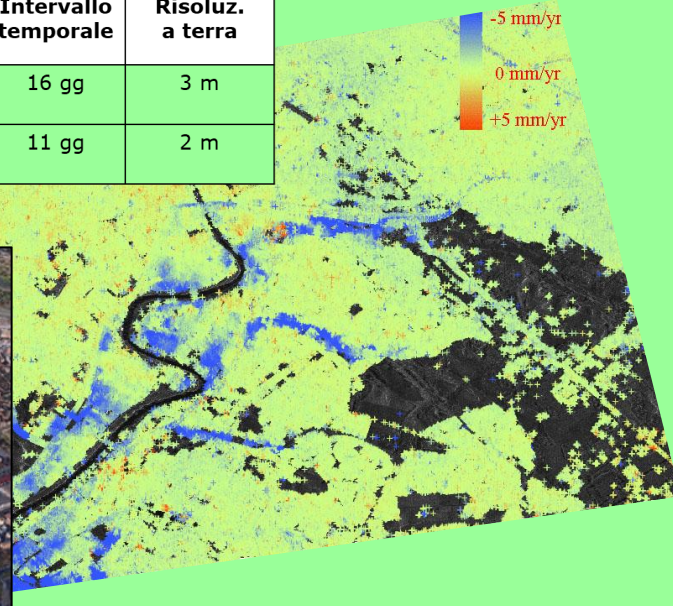
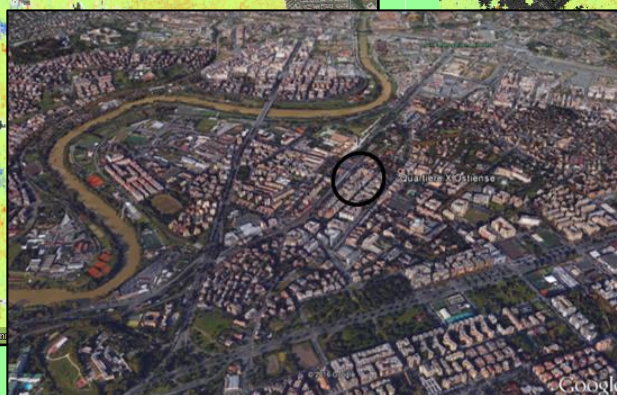
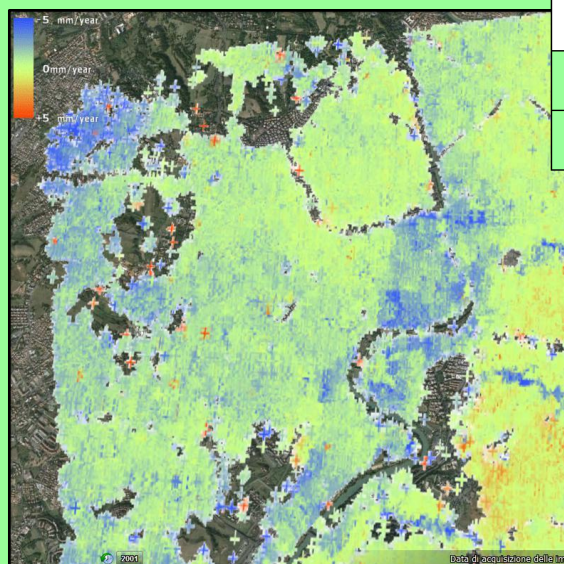
ENVISAT (2002 – 2010)



Banda	Sensore (N acq.)	l	Periodo	Intervallo temporale	Risoluz. a terra
C-band	ERS ½ (85)	~5.6 cm	1992-2000	35 gg	25 m
C-band	ENVISAT (51)	~5.6 cm	2002-2010	35 gg	25 m

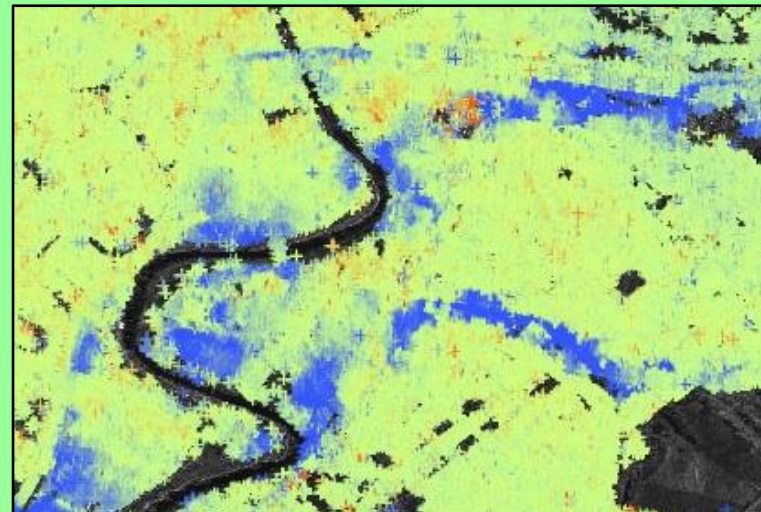
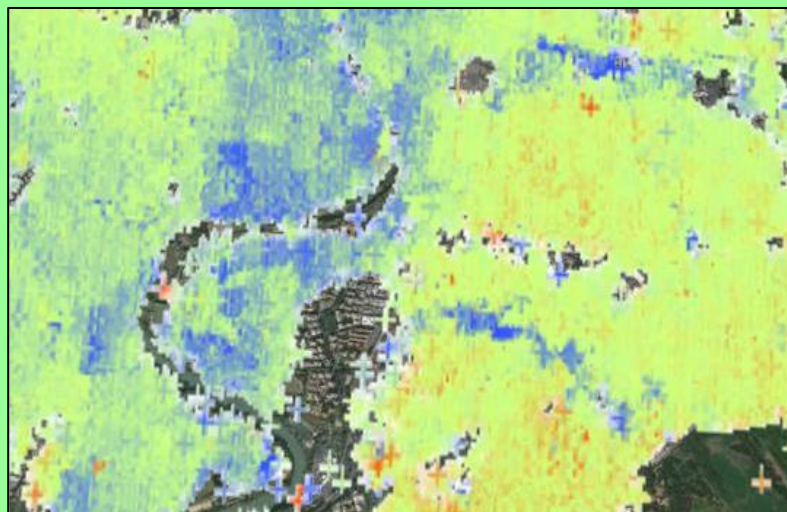
Mappe di deformazione

Banda	Sensore (N acq.)	l	Periodo	Intervallo temporale	Risoluz. a terra
X-band	CosmoSkyMED (25)	~3.1 cm	2011-Gen2012	16 gg	3 m
X-band	TerraSAR-X (30)	~3.1cm	2011-2013	11 gg	2 m

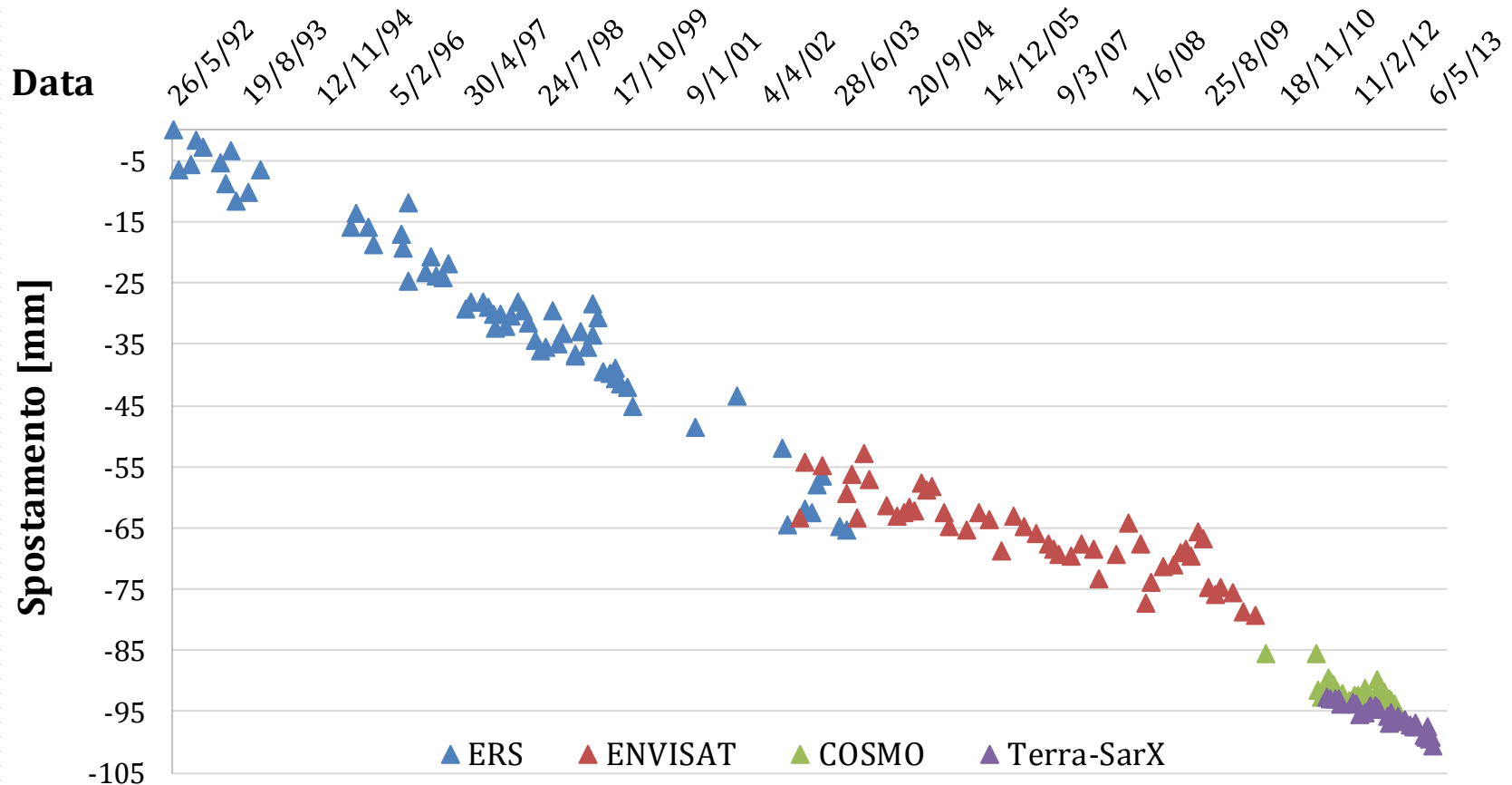


COSMO-SkyMed (2011 – 2012)

TerraSAR-X PS (2011 – 2013)



Time-series dello spostamento



Spostamento massimo in 20 anni : ~ -9.5 cm

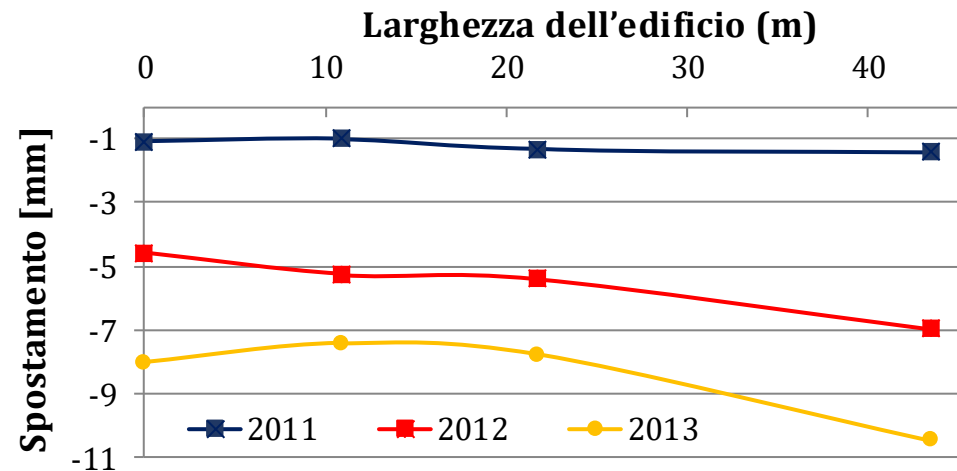
Edificio



- Modello Trave equivalente effettuato solo per una facciata come semplificazione dell'intera struttura
- Parametri strutturali sono stati valutati conoscendo le planimetrie degli edifici e consultando le mappe on-line
- Scelta di 4 punti per ogni facciata degli edifici e considerato lo spostamento medio dall'elaborazione SAR

Area 1

Area 2



IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 14, NO. 4, APRIL 2017

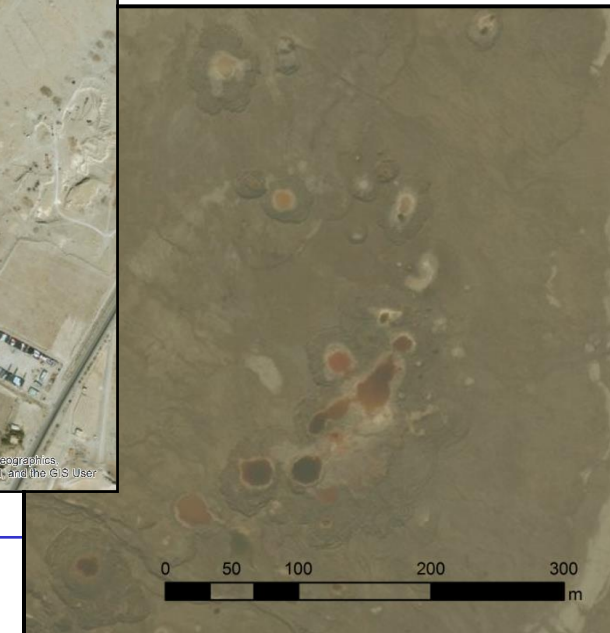
Building Damage Risk by Modeling Interferometric Time Series

Vania Cerchiello, Giulia Tessari, Emma Velterop, Paolo Riccardi, Marco Defilippi, and Paolo Pasquali

Subsidenza legata a fenomeni di sinkhole: Mar Morto

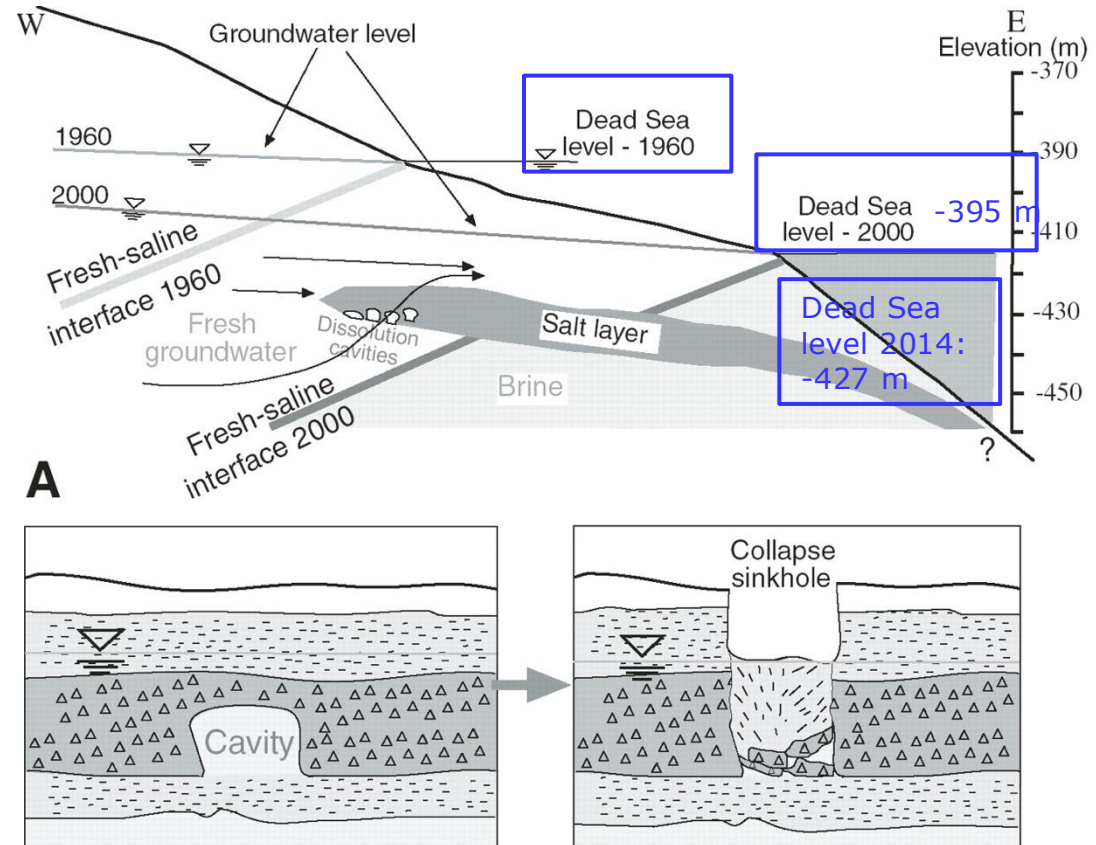


- Livello del Mar Morto si sta abbassando a causa dello sfruttamento incontrollato delle acque che lo alimentano.
- Dagli **anni '80** i sinkholes sono apparsi lungo la costa del Mar Morto.
- Negli ultimi 30 anni **centinaia** di sinkholes si sono sviluppati lungo la **costa Est e Ovest**, provocando notevole preoccupazione
- I sinkholes si sviluppano a causa della **dissoluzione** di livelli.



Fenomeno

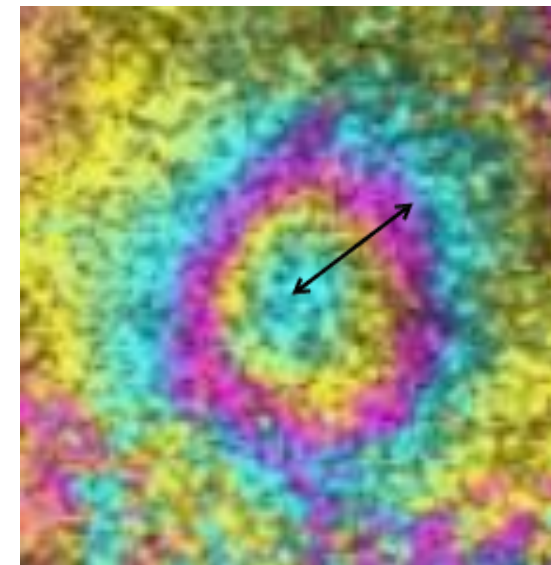
- L'abbassamento del livello del MM e l'arretramento delle coste causa un **gradiente** tra le acque di falda e il livello nel Mar Morto.
- Alcuni livelli di **depositi salini** sono esposti alla **dissoluzione** provocata dalle acque dolci causando la formazione di **cavità** talvolta provocandone il **collasso** del tetto.
- La dissoluzione è provata dalle analisi chimiche (NaCl dissolto nel groundwater).
- Dove si verifica la dissoluzione ci sono **potenziali sinkholes**.



Yechieli et al. Geological Society of America Bulletin 2006;118:1075-1087

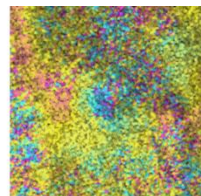
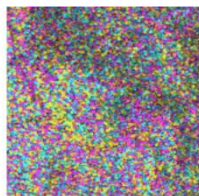
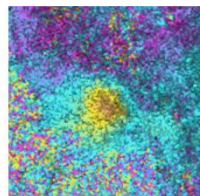
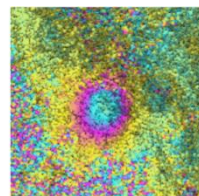
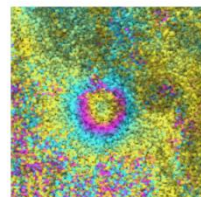
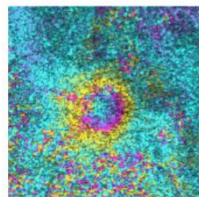
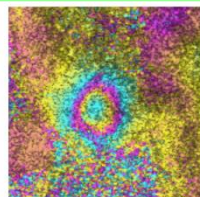
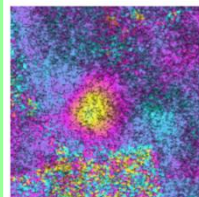
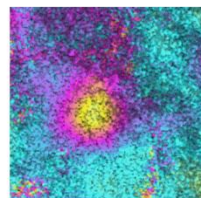
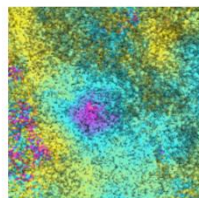
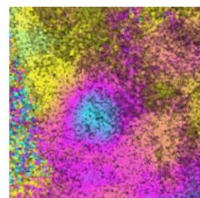
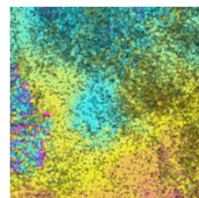
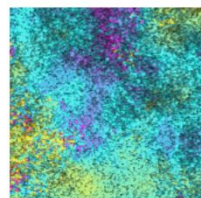
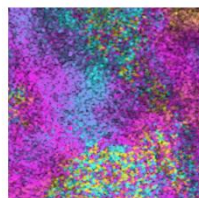
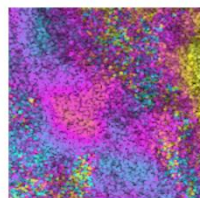
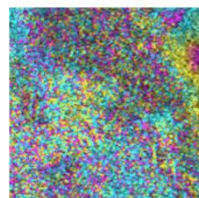
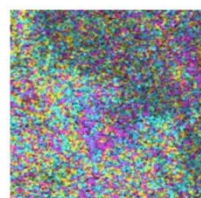
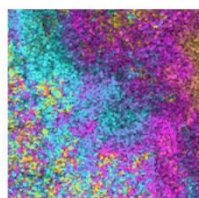
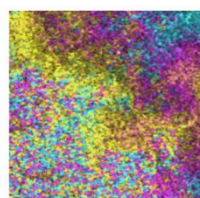
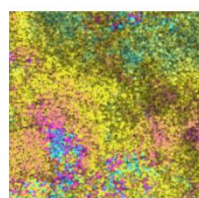
Abbassamento livello MM 1 m/ anno

Interferogrammi

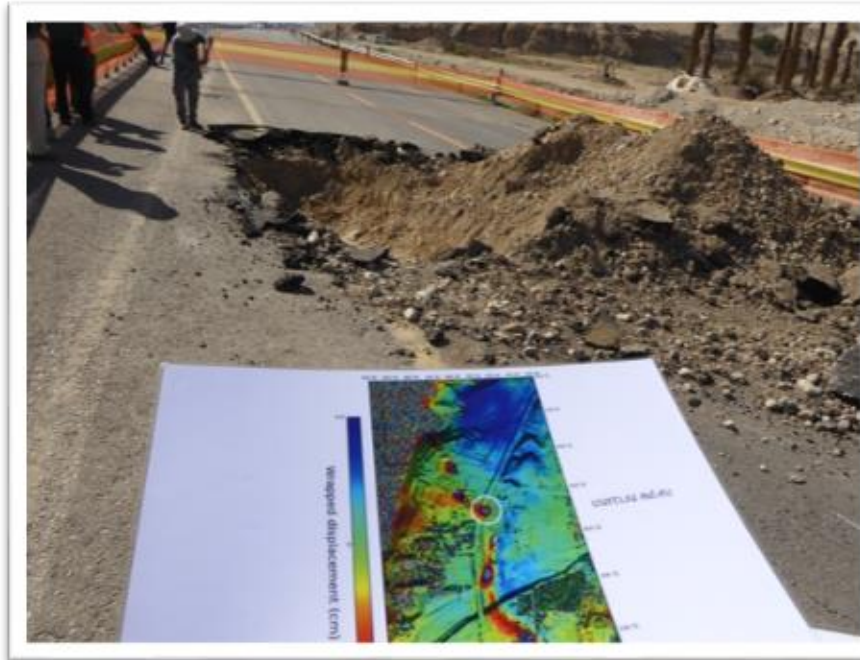


05-06/2012

Monitoraggio del movimento

m0(20111214) s1(20111230)
16 ddm1(20111230) s2(20120303)
64 ddm3(20120319) s2(20120303)
16 ddm4(20120404) s3(20120319)
16 ddm4(20120404) s5(20120420)
16 ddm6(20120506) s5(20120420)
16 ddm6(20120506) s7(20120607)
32 ddm7(20120607) s8(20120623)
16 ddm8(20120623) s9(20120709)
16 ddm9(20120709) s10(20120725)
16 ddm11(20120810) s10(20120725)
16 ddm11(20120810) s12(20120826)
16 ddm12(20120826) s13(20120911)
16 ddm15(20121013) s14(20120927)
16 ddm15(20121013) s16(20121029)
16 ddm18(20130101) s17(20121114)
48 ddm18(20130101) s19(20130306)
64 ddm19(20130306) s20(20130322)
16 ddm20(20130322) s21(20130423)
32 ddm21(20130423) s22(20130509)
16 dd

Prevenzione



Grazie alle **mappe** generate con tecniche InSAR, che evidenziavano un fenomeno di subsidenza, è stato programmato un intervento lungo una strada sulla costa del Mar Morto.

A febbraio 2015 è stato rimosso l'asfalto e il primo strato su cui poggiava.

Una cavità di **7 x 9 m** si era già formata.

Si possono utilizzare tecniche di costruzione protettive, in questo caso la strada è stata deviata.



Perchè utilizzare l'interferometria SAR?

Distribuzione spaziale



- Riconosce la **distribuzione spaziale della subsidenza** che è stata riconosciuta solo con strumentazione in situ puntuale

Valore aggiunto alle informazioni puntuali



- Aggiunge valore alle **informazioni puntuali** perchè consente di estenderle.

Ottimizzazione del monitoraggio in situ



- Permette di **ottimizzare** il monitoraggio in situ.

Rilevazione di fenomeni non locali



- Consente di **riconoscere fenomeni** che non interessano necessariamente l'area in esame

Ridefinizione limiti litologici e storico



- Possibilità di ridefinire i limiti litologici
- Possibilità di verificare il tasso di subsidenza passato

Pianificazione monitoraggio interventi



- Possibilità di pianificare il monitoraggio di interventi

Grazie dell'attenzione

gtessari@sarmap.ch