

# Fenomeni bradisismici dei Campi Flegrei: deformazioni lente, sismicità e anomalie geochimiche

Giuseppe De Natale  
INGV, Napoli

*con il contributo di:*

Claudia Troise, Renato Somma  
INGV, Napoli

Roberto Moretti

Università Vanvitelli, Napoli

*e con ulteriori contributi di:*

A. Giannola (SVIMEZ); P.M. Buscema (Univ. Colorado USA, SEMEION); A. Coviello (CNR-IRISS); G. Maurelli (SEMEION); A. Trocciola (ENEA); S.M. Petrazzuoli, S. Villani (Un. Napoli Fed. II)

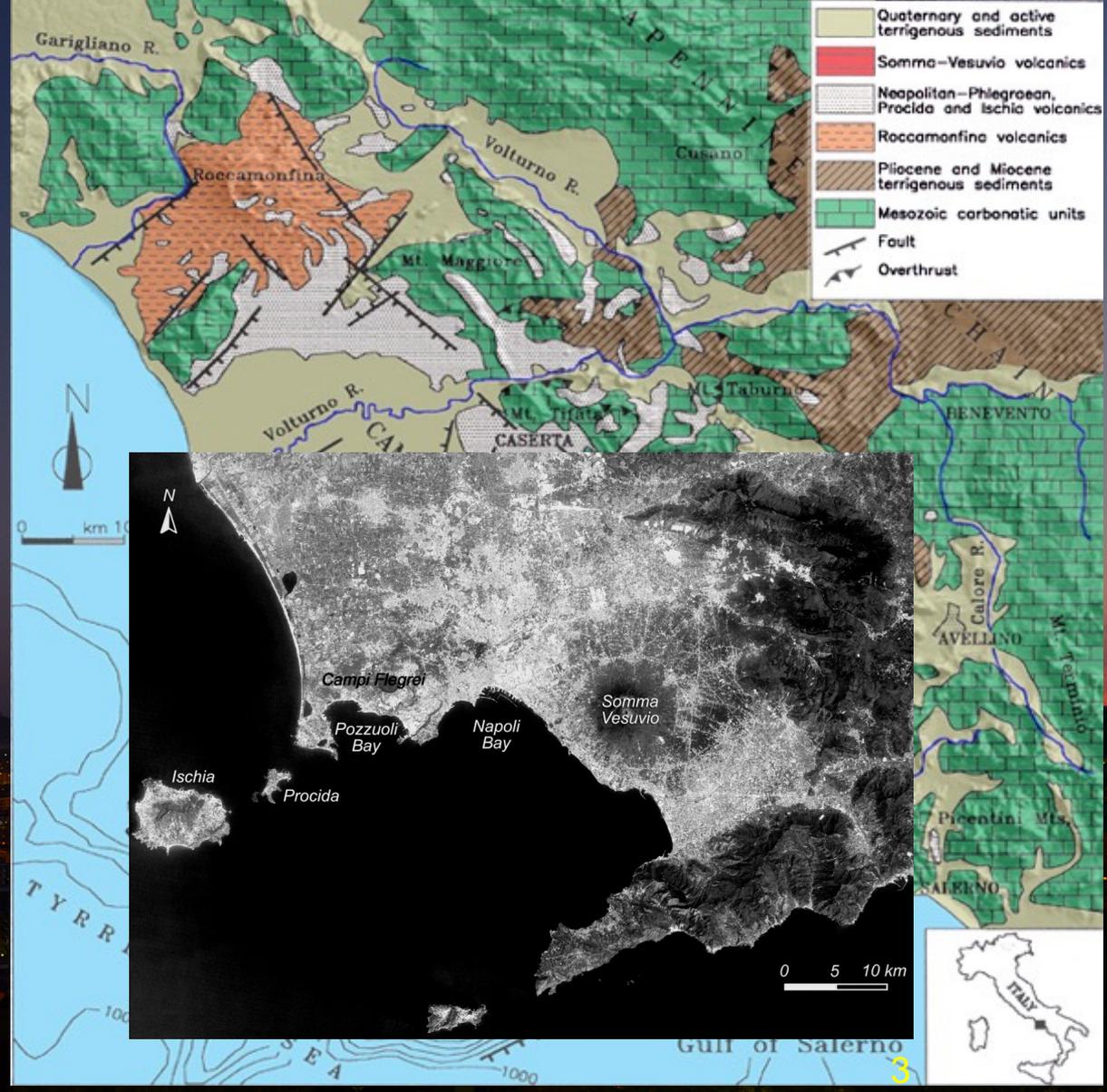
# Argomenti Presentazione

- L'area vulcanica Napoletana: come mitigare il più alto rischio vulcanico al Mondo
- I fenomeni di bradisisma dei Campi Flegrei: genesi e possibile evoluzione

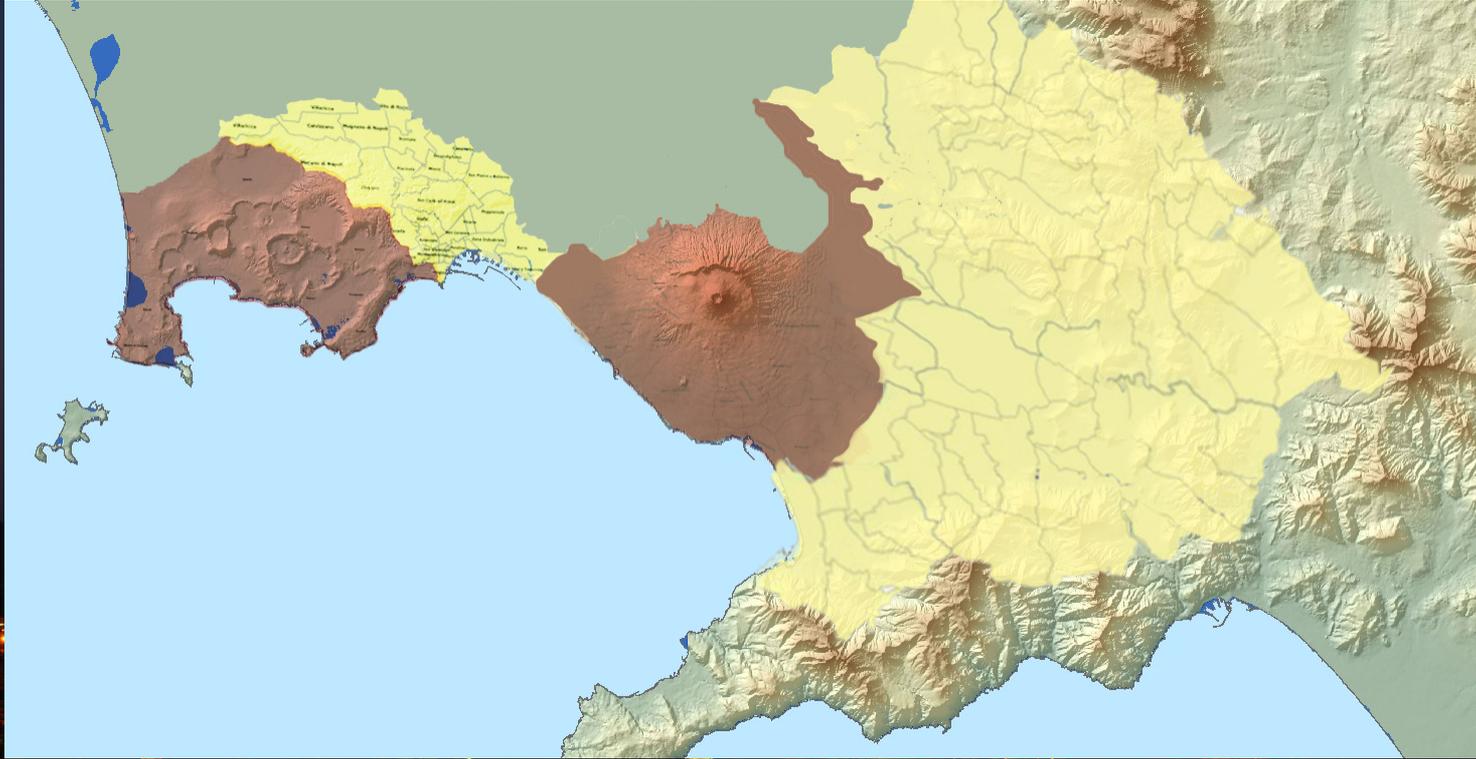


Mappa strutturale della Piana Campana e del margine Tirrenico dell'Appennino

Area Napoletana:  
4 milioni di  
residenti



# L'area vulcanica Napoletana



Area Rossa:  $P > 5\%$  di nubi ardenti area Gialla: possibile accumulo di ceneri  $> 300 \text{ kg/m}^2$

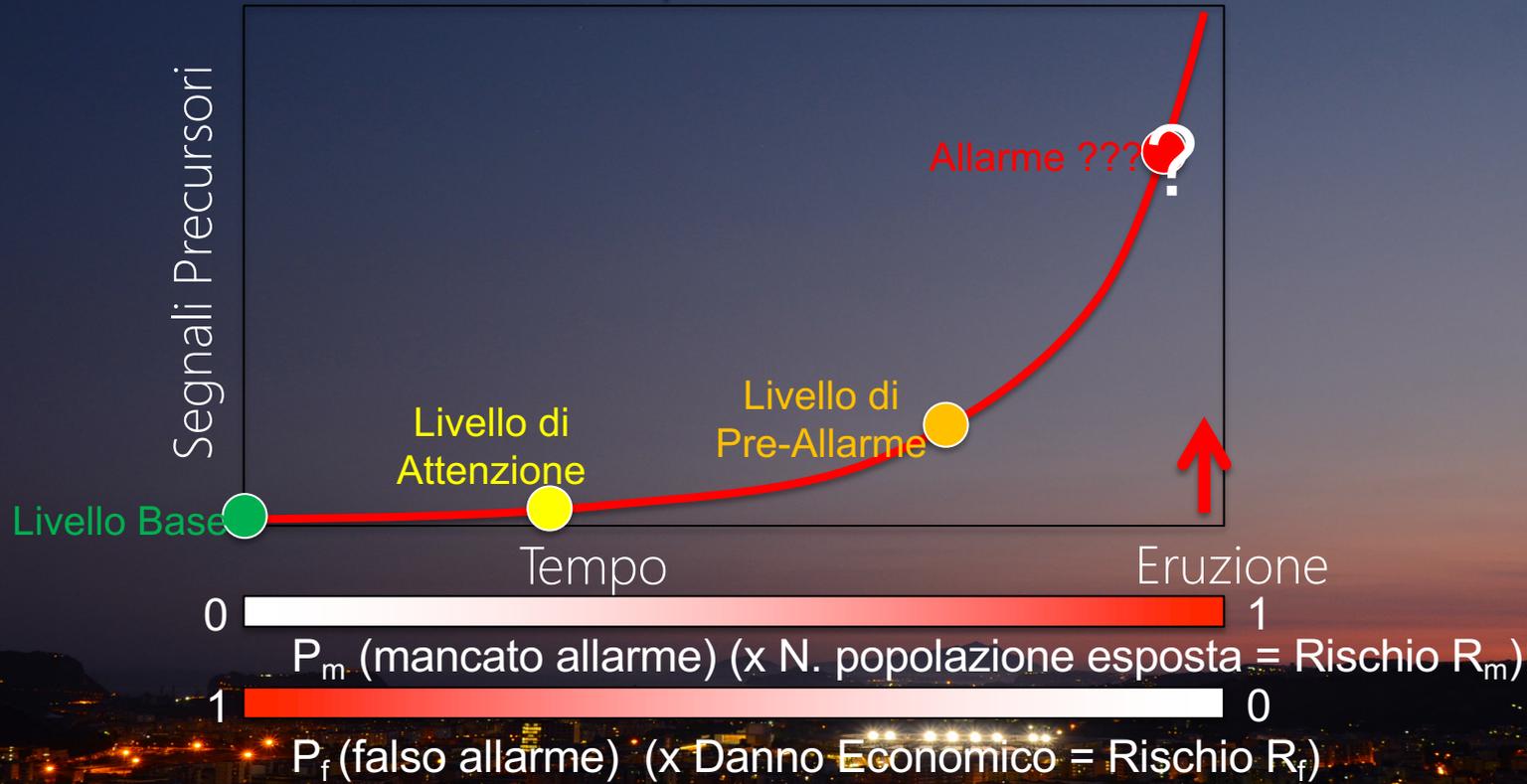
# Quattro livelli di allerta, decisi dalla Protezione Civile (DPC) fino ad *Arancione*.

LIVELLI DI ALLERTA	STATO DEL VULCANO	PROBABILITÀ DI ERUZIONE	TEMPO DI ATTESA ERUZIONE	FASI OPERATIVE DEL PIANO
Base	Nessuna variazione significativa di parametri controllati	Molto bassa	Indefinito, comunque non meno di diversi mesi	Attività ordinaria
Attenzione	Variazione significativa di parametri controllati	Bassa	Indefinito, comunque non meno di alcuni mesi	I FASE Attenzione
Preallarme	Ulteriore variazione di parametri controllati	Media	Indefinito, comunque non meno di alcune settimane	II FASE Preallarme
Allarme	Comparsa di fenomeni e/o andamento di parametri controllati che indicano una dinamica pre-eruttiva	Alta	Da settimane a mesi	III FASE Allarme
	Evento in corso (Eruzione)			IV FASE Evento in corso

Livello attuale: *Giallo* (da Dic. 2012)

Il livello massimo, **ROSSO**, **EVACUAZIONE**, è deciso dal Capo di Governo

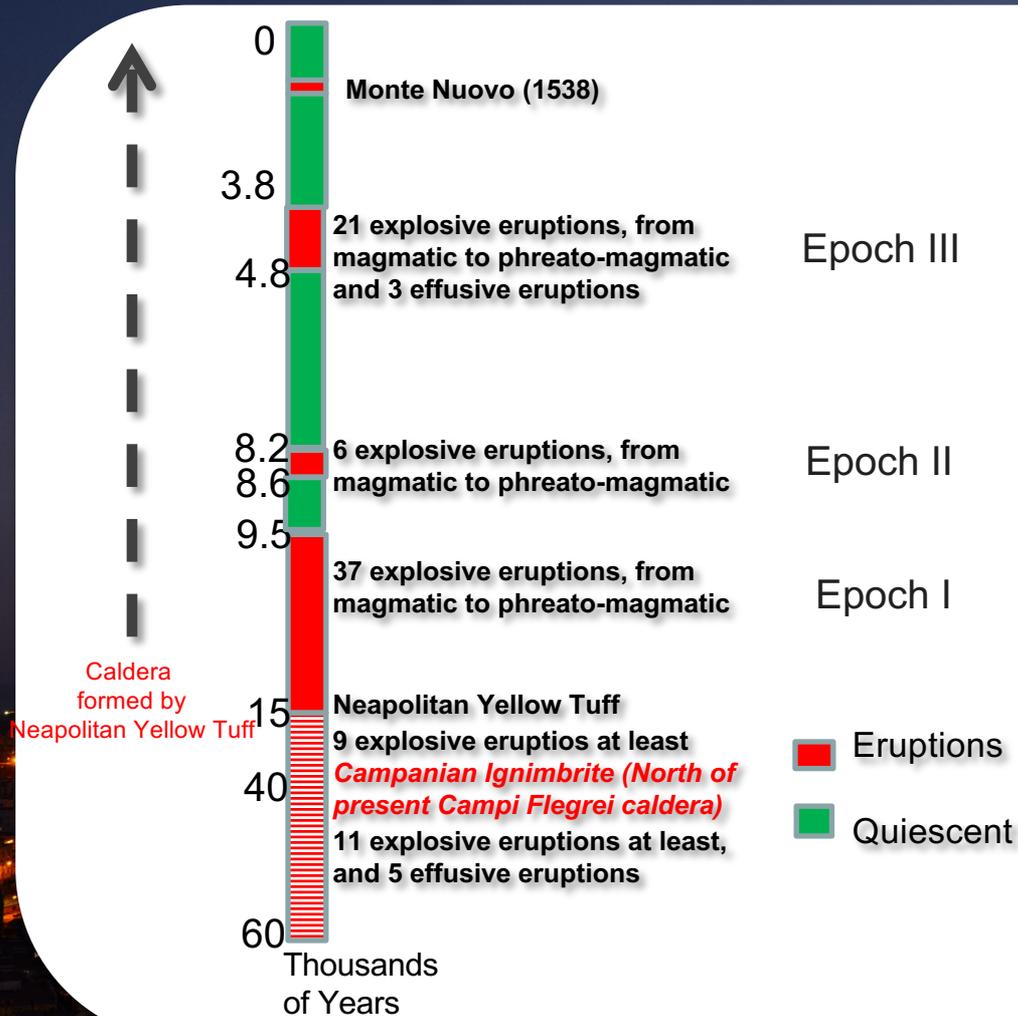
# Il Problema della previsione delle eruzioni



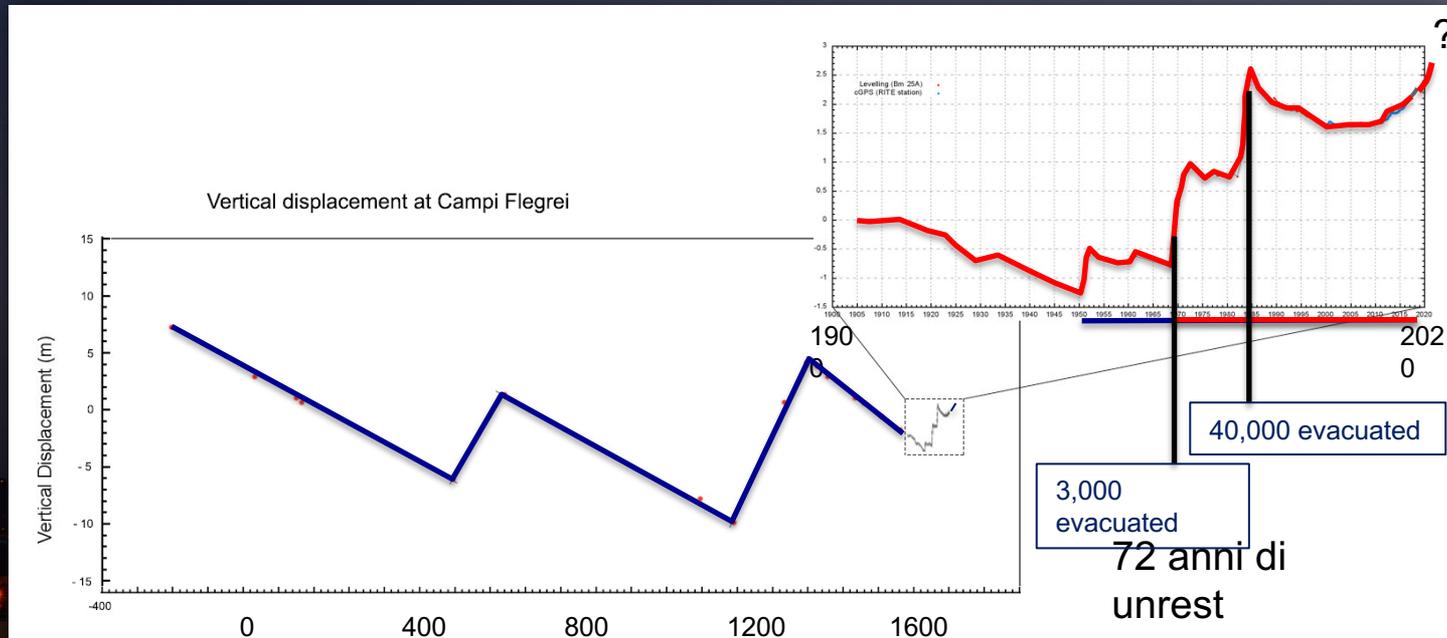
Lavori recenti basati sullo studio di tutte le eruzioni nel Mondo degli ultimi decenni indicano che la probabilità di una previsione corretta è di circa il 20%; risale a circa 30% per le eruzioni maggiori,  $VEI > 3$  (Winson et al., 2014)

*In aree estremamente popolate, anche probabilità molto basse di mancato allarme sono inaccettabili. Ciò implica che bisogna necessariamente accettare probabilità molto alte di falso allarme.*

# Campi Flegrei eruptive record



# Campi Flegrei: Il più tipico esempio di unrest ed allerta di lunga durata (con esito ignoto)



Dal 2005, un sollevamento continuo di circa 97 cm, superando il massimo livello raggiunto nel 1984. Poichè il sollevamento rispecchia la sovrappressione interna, *le rocce dei Campi Flegrei stanno ora sperimentando livelli di pressione mai raggiunti negli ultimi secoli* (dopo l'Eruzione del 1538). Per questo la sismicità sta aumentando, in frequenza e magnitudo; la composizione geochimica dei gas emessi indica che la proporzione di CO<sub>2</sub> (uno dei gas magmatici più indicativi) sta progressivamente crescendo dal 2000.

Data la grande incertezza e scarsa affidabilità delle attuali tecniche di previsione delle eruzioni, è possibile basare la difesa della popolazione esclusivamente sulla previsione certa dell'eruzione, peraltro con almeno 3 giorni di anticipo?



# Piani di Evacuazione Vulcani Campania:

## Problema 1 – Probabilità di Falso Allarme

- ✧ Zone da evacuare: contengono 600.000-700.000 persone. Anche una probabilità di eruzione relativamente molto bassa, in tempi brevi, non è accettabile.
- ✧ **ESEMPIO: il 10% di probabilità di eruzione nel prossimo mese comporta un rischio altissimo, inaccettabile per il numero enorme di popolazione esposta.**
- ✧ Ma, evacuare con il 10% di probabilità di eruzione, comporta una probabilità del 90% di 'falso allarme'.
- ✧ **La decisione di evacuare comporta una responsabilità altissima, perché si azzerà l'economia locale e si producono danni economici su scala nazionale/europea. Senza contare i problemi di disagio sociale.**
- ✧ L'unica via d'uscita razionale da questo 'dilemma' è far sì che un'eventuale evacuazione comporti il minimo danno economico ed il minimo disagio sociale.
- ✧ **Nei Piani di Evacuazione attuali: Non è definito dove andranno tutte queste persone, né cosa faranno; senza produrre e senza servizi, a carico dello Stato; il problema sociale ed economico posto dall'evacuazione è quindi oggi quello massimo possibile.**

# Piani di Evacuazione Vulcani Campania: Problema 2 - Durata

- ✧ 500.000-800.000 persone evacuate: per quanto tempo?
- ✧ 2 possibilità: 1) l'eruzione avviene dopo breve tempo – 2) l'eruzione non avviene
- ✧ Nel caso 1, parte del territorio è devastato, e comunque non potrà essere abitato di nuovo per anni (verosimilmente decenni). Inoltre, date le mutate condizioni del vulcano, sarà quasi impossibile stabilire se e quando il nuovo ciclo eruttivo terminerà
- ✧ Nel caso 2, se i fenomeni osservati erano tanto forti da far ordinare l'evacuazione, sarà quasi impossibile (praticamente impossibile) stabilire quando l'allerta potrà dirsi terminata (anni, o decenni)
- ✧ Quindi, in ogni caso l'evacuazione durerà molti anni, o più probabilmente sarà di durata indefinita, al limite permanente

# Piani di Evacuazione Vulcani Campania: Problema 3 - Costi

- ✧ 600.000-700.000 persone evacuate per molti anni
- ✧ Costo A: azzeramento economico di un'area con popolazione pari a circa l'1% di quella totale Italiana – stima: 1% PIL (circa 20 miliardi €)
- ✧ Costo B: mantenimento di 600.000-700.000 persone a completo carico dello Stato – stima minima 15.000-20.000 €/p.c.: 10-15 miliardi €
- ✧ Costo economico totale A+B = circa 30-35 miliardi €/anno
- ✧ Costo sociale: non definibile ma certamente incalcolabile (600.000-700.000 persone sparse sul territorio nazionale, senza lavoro e senza servizi, a completo carico dello Stato, per anni/decenni)

# Piani di Evacuazione Vulcani

## Campania: Problema 4 - Attività

- ✧ La popolazione evacuata, per tempi molto lunghi (indefiniti), nella nuova sistemazione deve svolgere le normali attività sociali: alloggio, lavoro, studio, salute, svago
- ✧ I centri urbani in cui viene ri-allocata devono quindi possedere la dovuta capacità di accoglienza e servizi (questi ultimi necessariamente integrando la nuova popolazione), oppure essere in grado di svilupparle in tempi brevissimi
- ✧ In ogni centro urbano 'allargato' i servizi essenziali dovranno essere garantiti e dimensionati (ad esempio: numero medici di base, capacità di scuole ed ospedali, numero insegnanti, medici ospedalieri e infermieri, numero farmacie, ecc.)
- ✧ La programmazione di una ri-collocazione per 600-700 mila persone è complessa, e dev'essere programmata e realizzata con tempi adeguati: non può essere fatta con evacuazione improvvisa, per un'emergenza imminente.

# Piani di Evacuazione Vulcani

## Campania: Problema 5 – Valorizzare i territori

- ✧ Uno dei cardini della proposta presente dev'essere: non 'desertificare', bensì 'valorizzare' le zone rosse
- ✧ Il problema è la popolazione 'residenziale', non le attività turistiche ed in generale le attività sostenibili, compatibili e ad alto valore economico
- ✧ Spostare la popolazione in zone prevalentemente limitrofe, e migliorare i collegamenti: si può risiedere esternamente, ma svolgere attività di lavoro e tempo libero nelle zone rosse
- ✧ Queste aree vulcaniche, infatti, sono da almeno 4000 anni tra le più popolate e le più ambite al Mondo
- ✧ Per tale motivo, incentivare economicamente la diminuzione della popolazione 'residente', disincentivare, allo stesso tempo rendendo partecipi al rischio (ad esempio con una procedura 'assicurativa' obbligatoria), l'afflusso di nuova popolazione residente, e contemporaneamente migliorare l'urbanizzazione e le infrastrutture, privilegiando l'uso turistico, il terziario e l'industria leggera e sostenibile, aumenterà il valore del territorio, rendendolo nel contempo più 'resiliente'.

# Azioni Necessarie

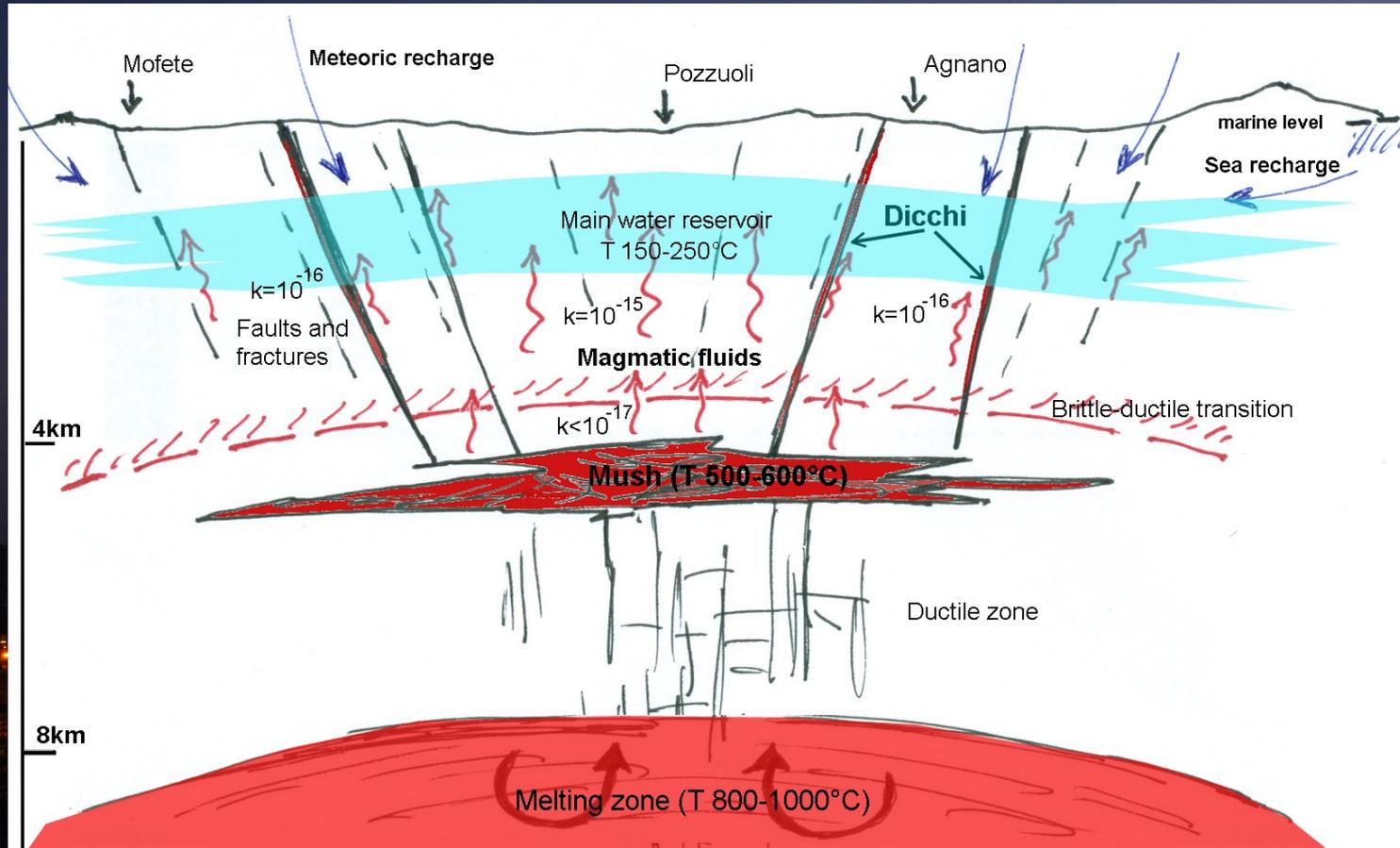
- ✧ Prevedere una 'evacuazione preventiva dilazionata nel tempo' dalle aree troppo densamente popolate. Incentivare lo spostamento in aree esterne (anche limitrofe), disincentivare economicamente l'ingresso in zona rossa.
- ✧ **Lo spostamento progressivo in aree interne, se fortemente incentivato, può risolvere anche i problemi delle aree di spopolamento del Nezzogiorno.**
- ✧ Anche l'evacuazione dei residenti rimasti, in caso di allerta rosso, dovrebbe essere progressiva, a partire dalla zona più a rischio ed allargandola progressivamente se serve.
- ✧ ***Deve essere contemplata anche la possibilità di evacuazione ad eruzione iniziata***
- ✧ Pianificare accuratamente il re-insediamento di 600.000-700.000 persone, ricostruendo l'ambito lavorativo, ricreativo, sociale ed i servizi, e mantenendo costantemente aggiornato il Piano
- ✧ **Rinforzare gli edifici nella zona rossa, per renderli resistenti ai terremoti attesi di magnitudo massima**
- ✧ Può essere importante il ruolo delle Assicurazioni, che si potrebbero rendere obbligatorie per chi entra da residente in zona rossa, a copertura parziale dei rischi di perdita abitazione e ri-allocazione

De Natale et al., Invited Perspective: The Volcanoes of Naples: How can the highest volcanic risk in the World be effectively mitigated?, *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 2020.

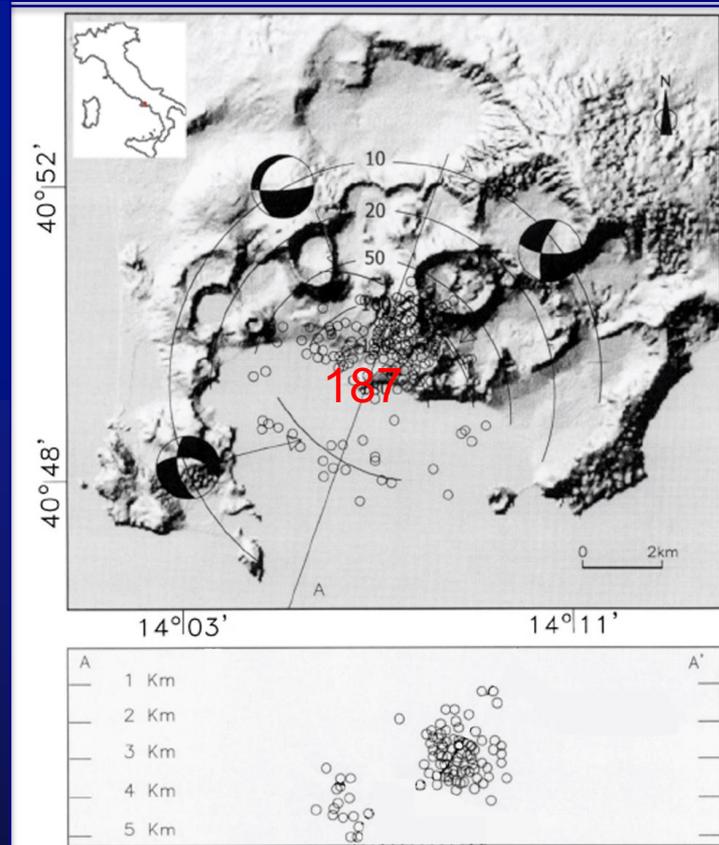
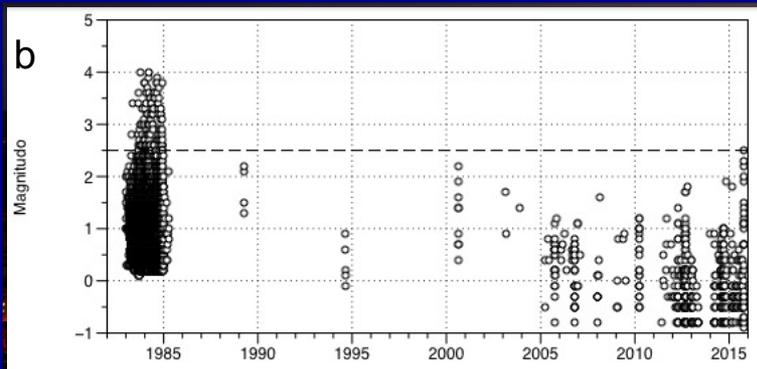
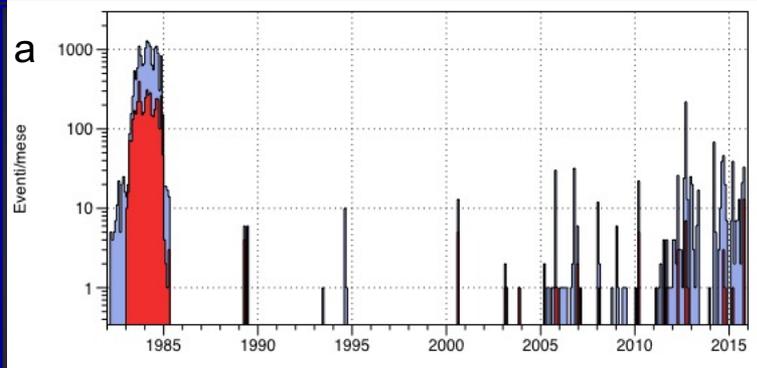
# Il Problema della Zona Gialla (Napoli centro)

- La parte centrale di Napoli (circa 700.000 persone) è sottovento rispetto alle eruzioni flegree: rischio altissimo di sfondamento dei tetti per accumulo di cenere, con conseguente collasso degli edifici
- L'unica possibile difesa è dotare gli edifici di sopratetti spioventi, magari anche montabili alla bisogna
- Sarebbe fondamentale prorogare il sisma-bonus 110% in tutta la provincia di Napoli (o almeno per le zone rosse o gialle) e prevedere l'obbligo di dotarsi dei sopratetti spioventi.

# La caldera dei Campi Flegrei: modelli di genesi del bradisismo



# Deformazioni statiche e sismicità 1982-1984



1982-1984 Unrest

# Effetto di confinamento delle 'ring faults' sulla deformazione del suolo e sulla genesi della sismicità

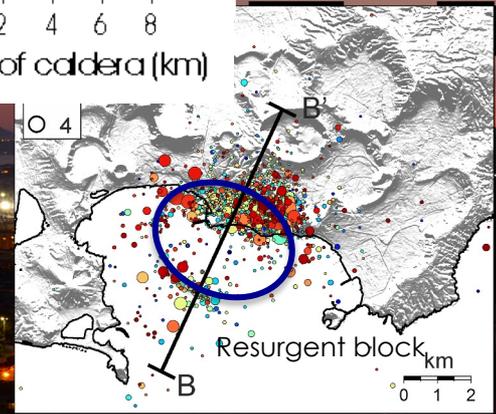
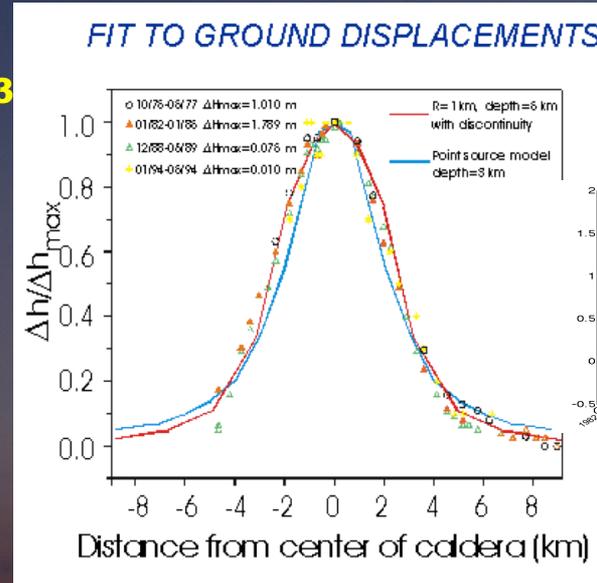
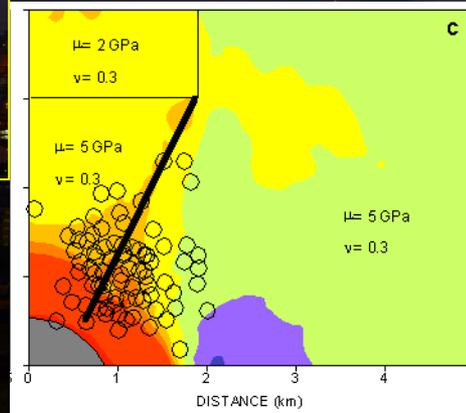
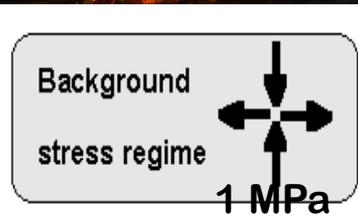
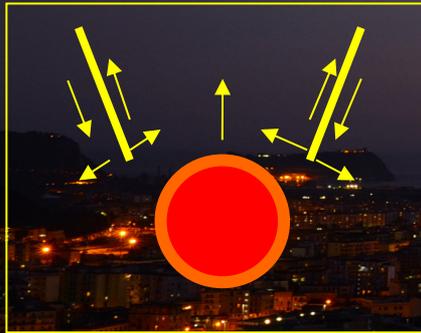
De Natale and Pingue, JVGR, 1993

De Natale et al, GRL, 1997

De Natale et al., GSL, 2006

Folch and Gottsmann, GSL, 2006

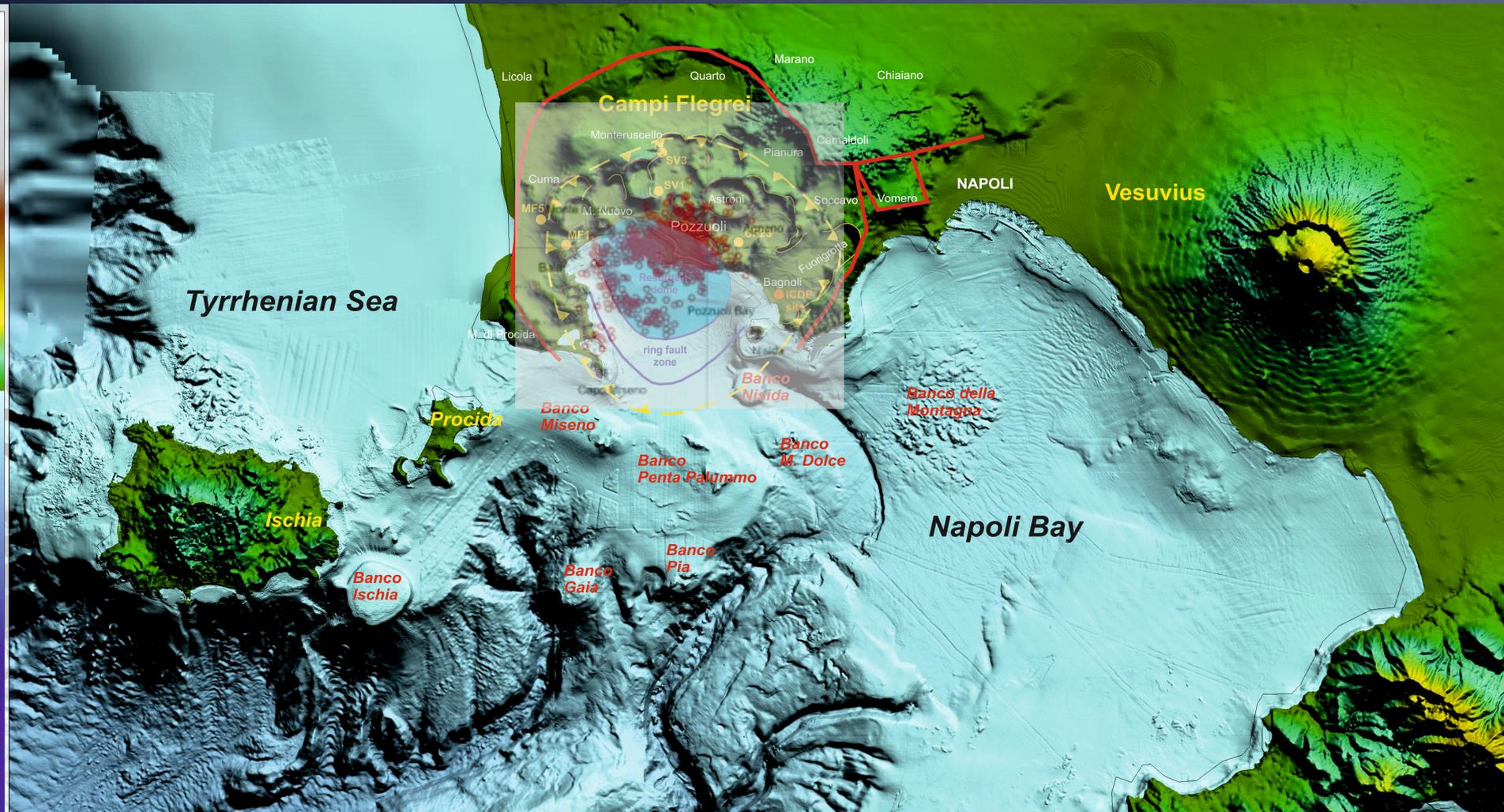
## Effetti delle 'ring faults'

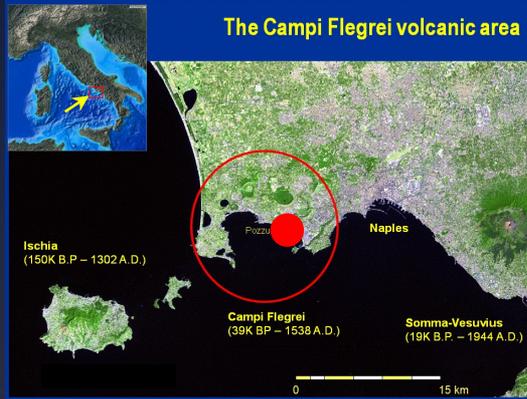


Troise et al, GRL, 1997;  
JGR, 2003

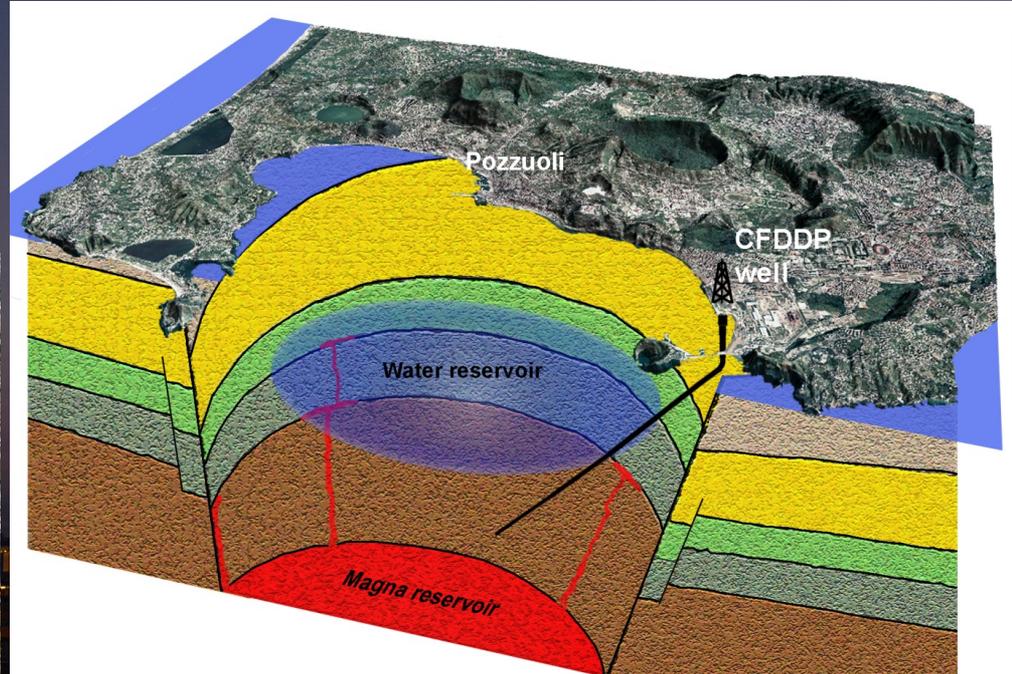
1982-1984 Unrest

# Sismicità e Deformazioni statiche concentrate in una piccola area: blocco risorgente





CFDDP: pozzo pilota (P=500 m)  
Stratigrafia e Proprietà delle rocce  
(stime accurate di permeabilità, per  
modellazioni Termo-fluido-dinamiche)



Pozzo profondo 3500 m: proprietà reologiche  
delle rocce profonde, estrapolazione temperature  
per determinare la profondità del magma

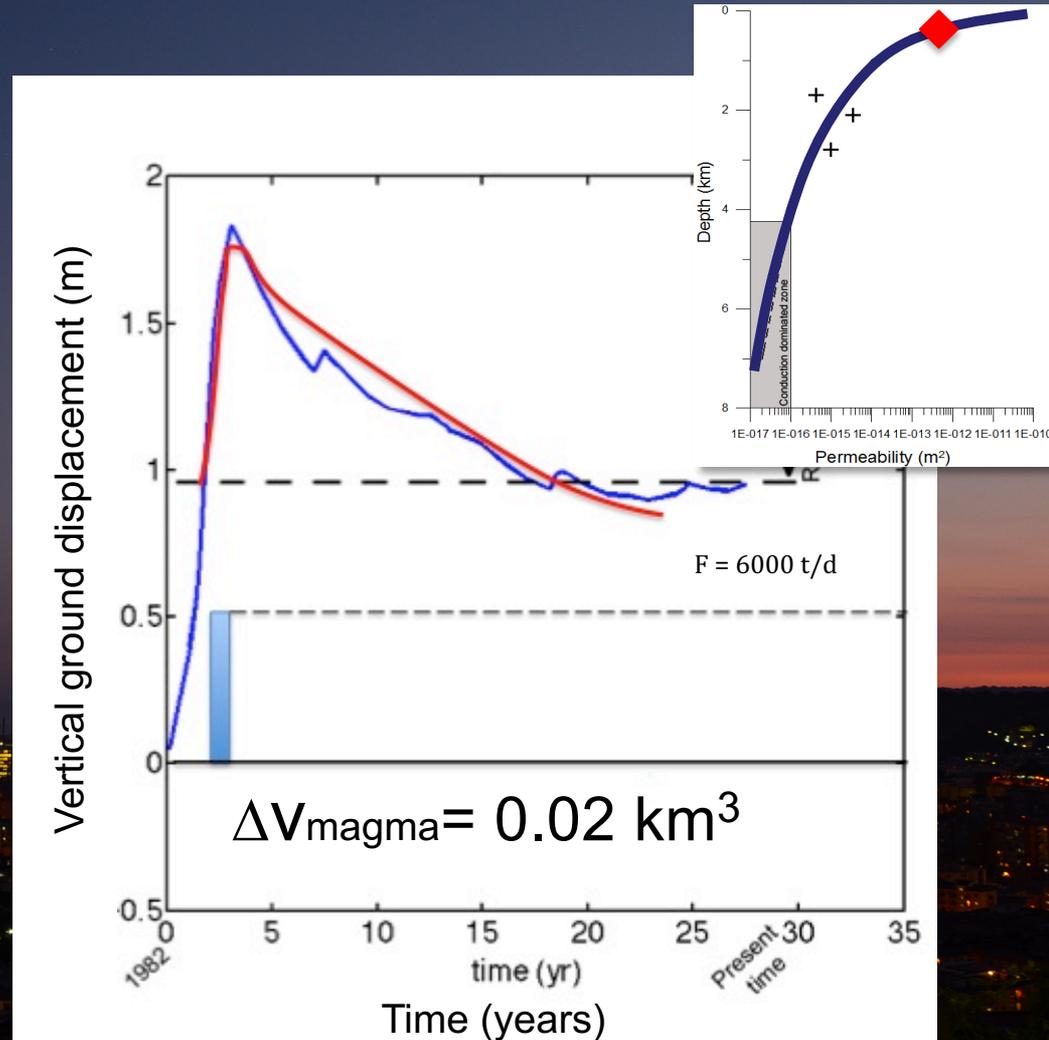


# Permeabilità misurate e modelli di unrest

Modelli termo-fluido-dinamici in mezzi porosi, che utilizzano i parametri ricavati dai pozzi, mostrano che circa 0.7 di sollevamento nel 1982-1984 (parte transiente) possono essere attribuiti alla sovrappressione causata dall'iniezione di fluidi profondi, caldi negli acquiferi.

La parte di sollevamento restante può essere interpretata come dovuta all'intrusione di un 'sill' magmatico a circa 3 km di profondità.

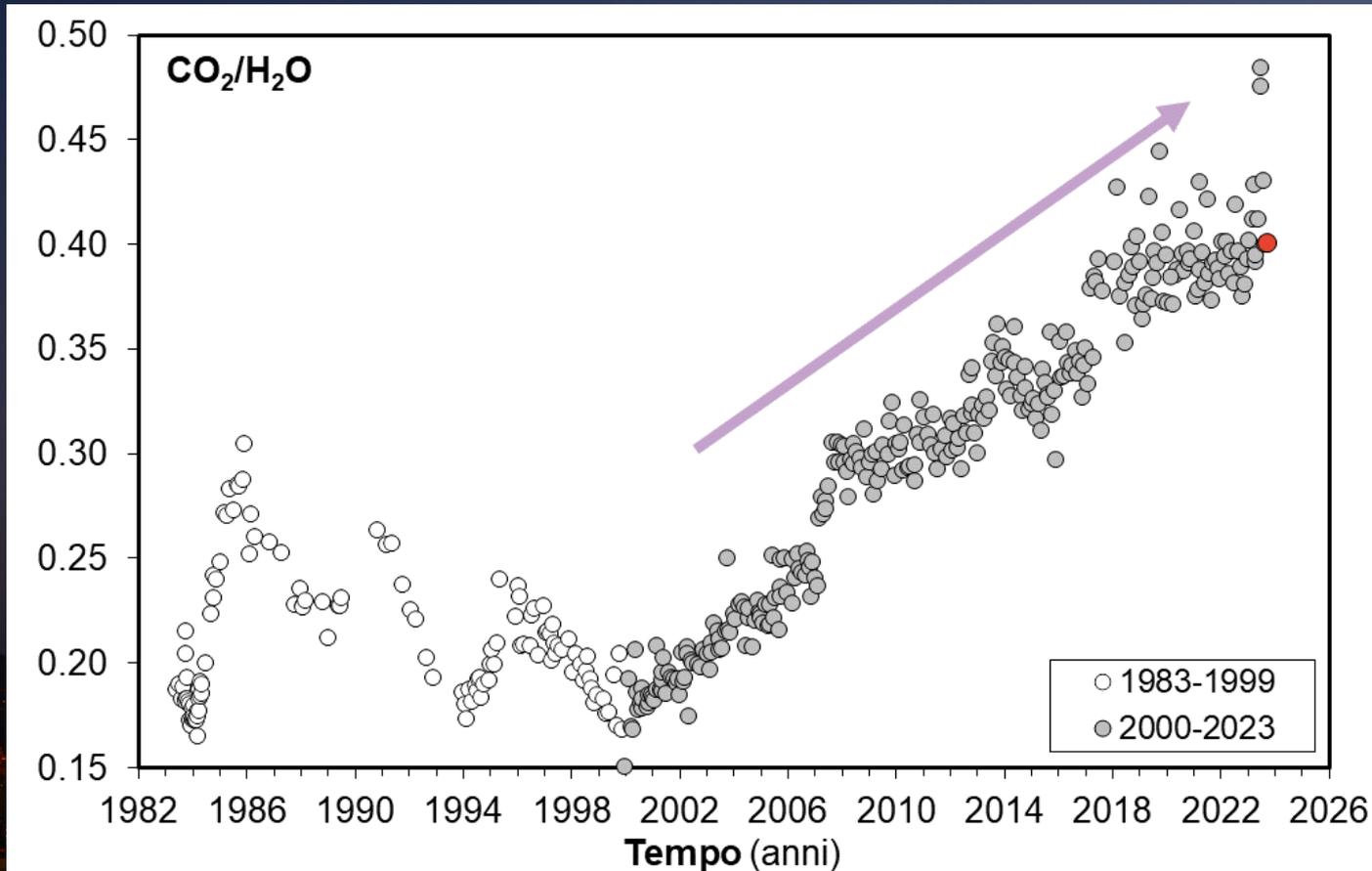
Il volume di magma intruso, che sieghi 1.0 m di sollevamento, è stato di circa 0.02-0.03 km<sup>3</sup>



# Domanda: i fenomeni attuali sono causati da intrusioni magmatiche?

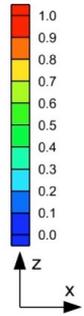
- Per rispondere, dobbiamo considerare i seguenti dati: Deformazioni statiche, sismicità, geochimica
- Alcuni evidenti errori nella letteratura scientifica recente hanno condizionato le interpretazioni fino a qualche anno fa. Oggi sembra che le tesi ufficiali utilizzino il nostro modello del 2017-2019.
- Quando la gestione di un'emergenza su un fenomeno in gran parte sconosciuto deve basarsi su ricerche in corso, sorgono grossi problemi (un esempio evidente è stato il caso della pandemia di COVID-19)

# Dati Geochimici (rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ )

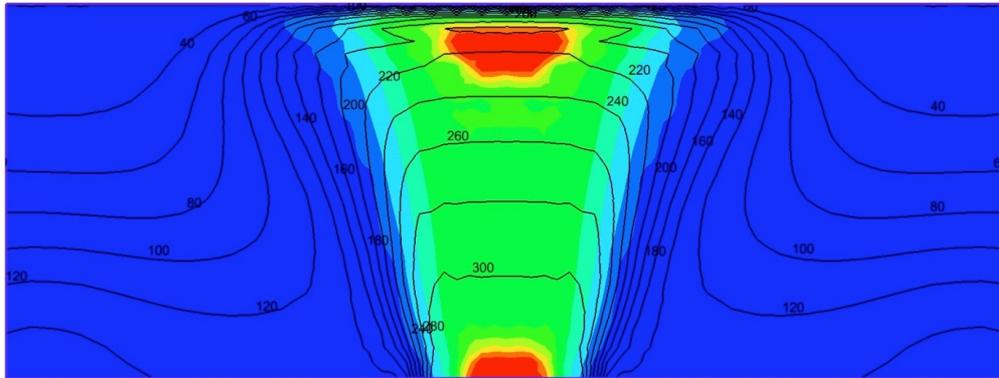


Moretti, R., De Natale, G., Troise, C. (2017) G-cubed  
doi:10.1002/2016GC006569

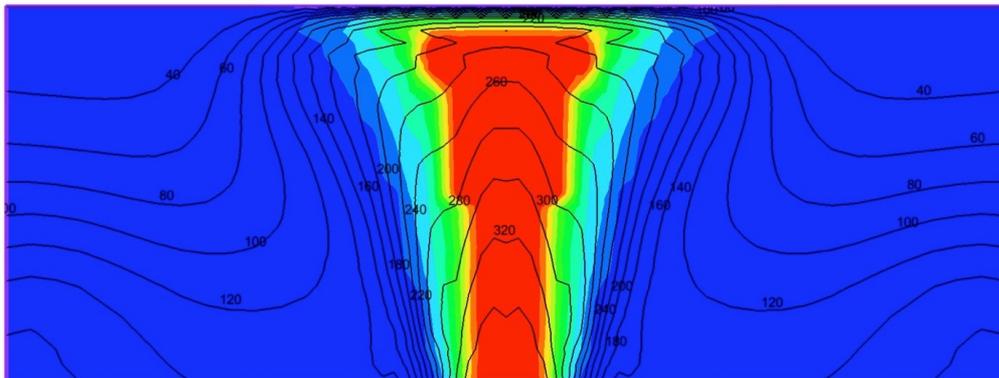
# Un esempio di errore che ha a lungo influenzato le interpretazioni geochimiche: Il Modello Termico degli acquiferi flegrei



H<sub>2</sub>O gas fraction



doi:10.1029/2002GL016 e lavori successivi



Modello Corretto (con parametri identici)

Troise, C. et al., Earth Sci. Rev., 2019

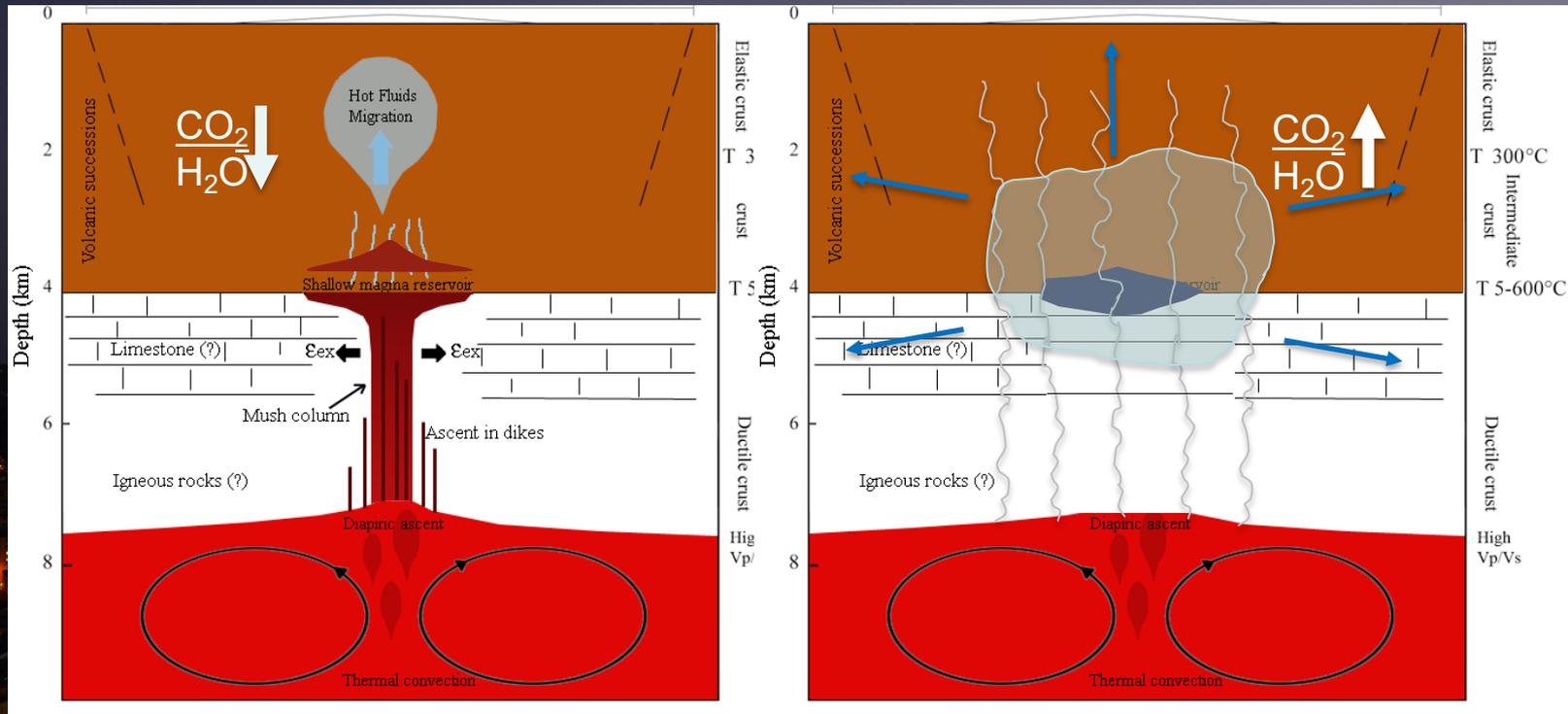
L'assunzione errata di coesistenza acqua-gas ha portato a diverse interpretazioni errate delle osservazioni geochimiche, anche in lavori importanti (i.e. Nat. Comm. doi:10.1038/ncomms1372)

In realtà, nella parte centrale del sistema, per l'intera profondità degli acquiferi, l'acqua può essere presente solo in forma gassosa, e non può esistere fase liquida. Questo risultato, non considerato per 15 anni assumendo il modello errato, ha profondamente influenzato le interpretazioni geochimiche

# Dal 1982 ad oggi: da una piccola intrusione magmatica ( $0.025 \text{ km}^3$ ) al degassamento di magma profondo

1982-1984

2000-OGGI



La crisi attuale è verosimilmente causata dall'incremento di pressione degli acquiferi, riscaldati dai fluidi magmatici in risalita dalla camera magmatica ad 8km

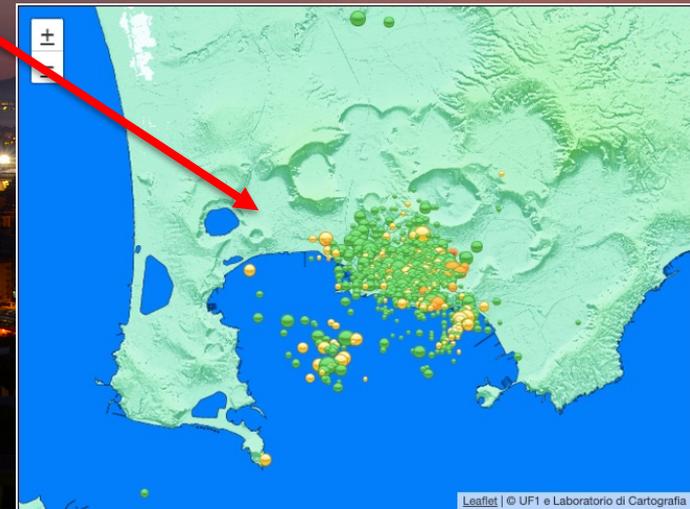
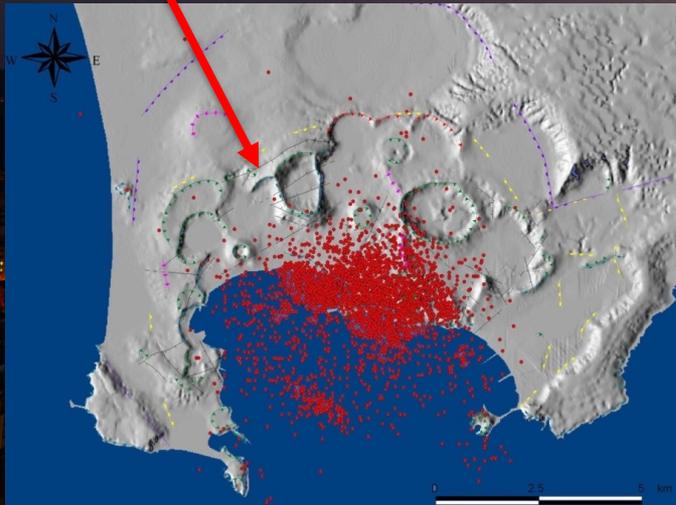
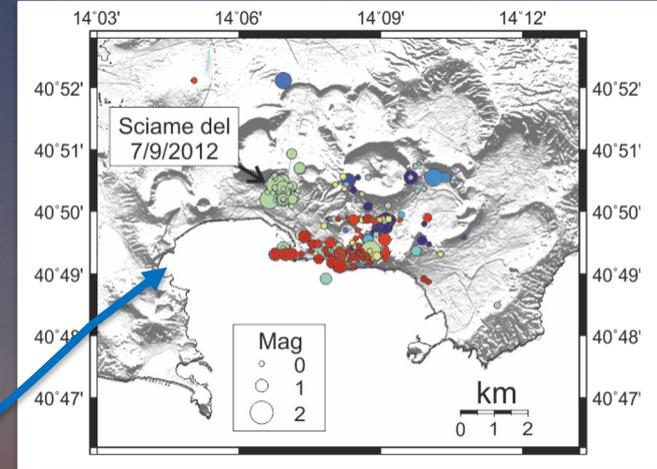
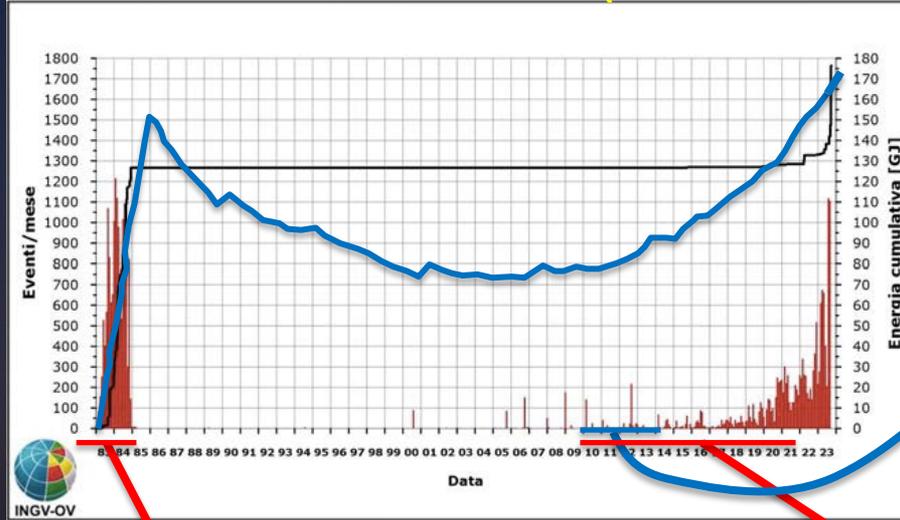
La sovrappressione interna genera sia sollevamento del suolo che terremoti

Più sale il livello del suolo, più aumenta la sismicità, in frequenza e magnitudo massima

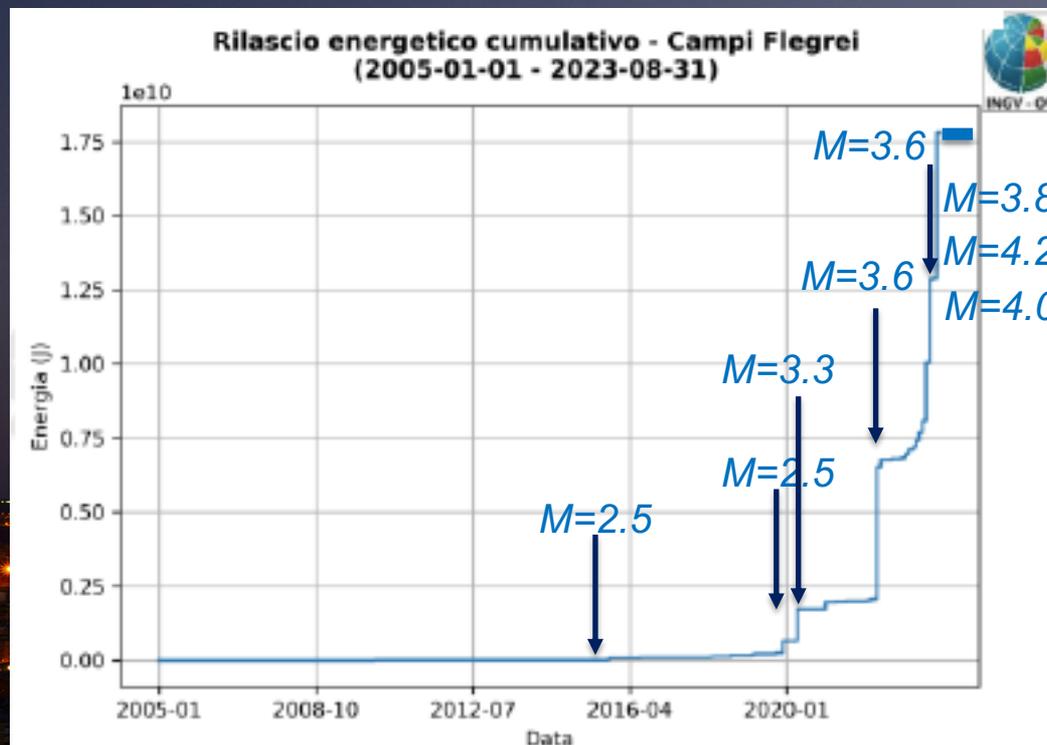
Quindi, l'incremento della sismicità era prevedibile e previsto (già dal 2017-2018)

Oggi il livello del suolo è maggiore di quello del 1984, e quindi il massimo negli ultimi secoli.

# Comparazione 1982-1984 vs. 2005-2023 (Dati INGV-OV)



# Incremento delle magnitudo massime 2005-2023 (Dati INGV-OV)



*GRAZIE PER L'ATTENZIONE*

