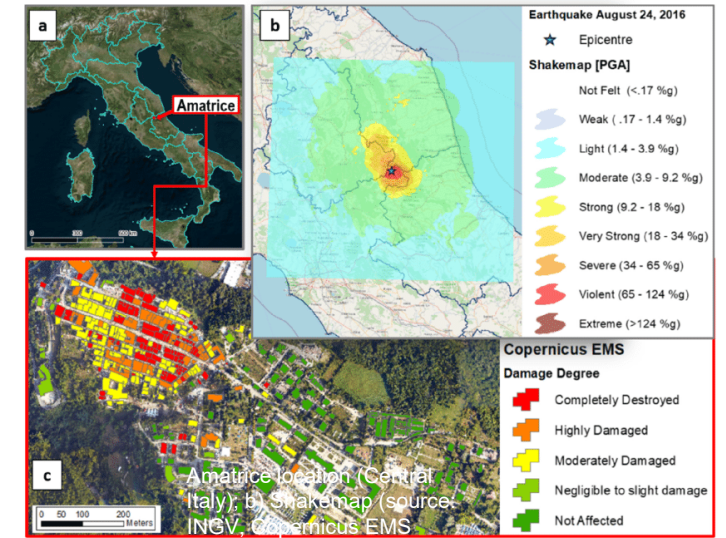
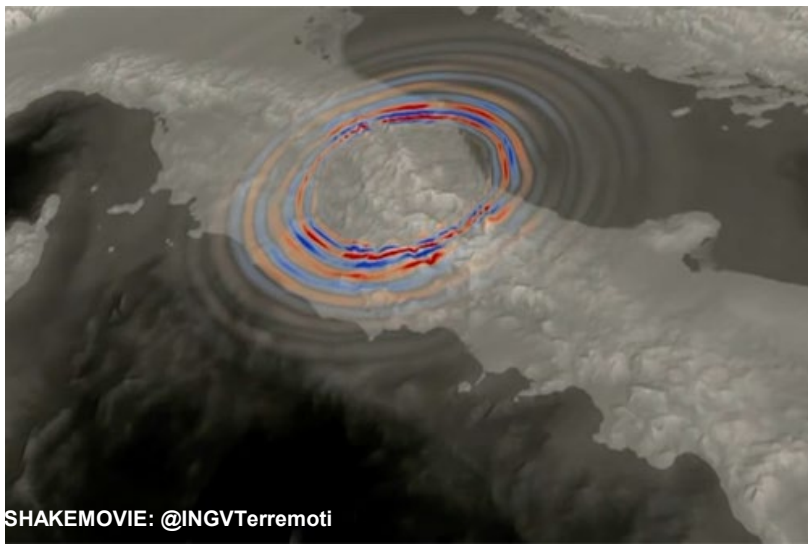




Risultati delle simulazioni deterministiche 3D del moto del suolo nell'Italia centrale

Aybige Akinci¹, Arben Pitarka², Pietro Artale Harris¹ and Pasquale De Gori¹

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV, Rome, Italy, aybige.akinci@ingv.it

² Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL, Livermore, U.S.A. pitarka1@llnl.gov

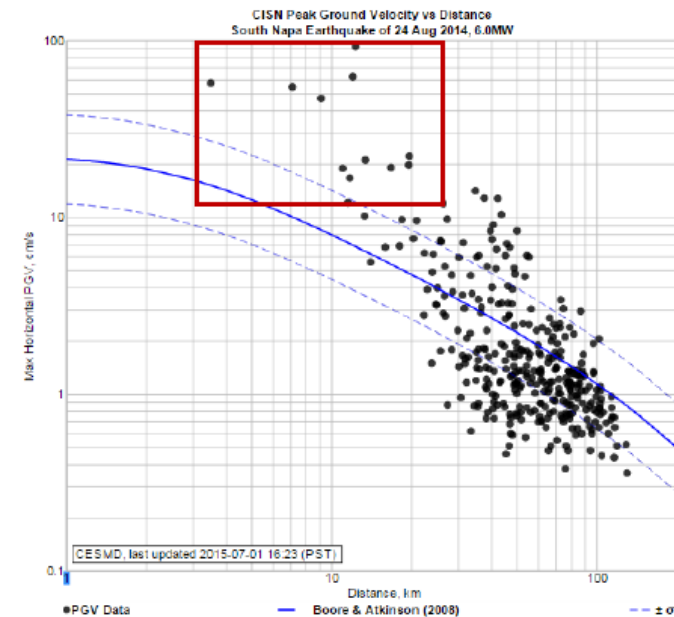
Struttura della presentazione:

- Obiettivi,
- Motivazioni,
- Metodologia,
- Modelli generati,
- Risultati relativi a tre recenti terremoti nell'area di studio:
 - M6.3 L'Aquila (6 aprile 2009)
 - M6.2 Amatrice (24 agosto 2016)
 - M6.5 Norcia (30 ottobre 2016) — terremoti da faglia normale

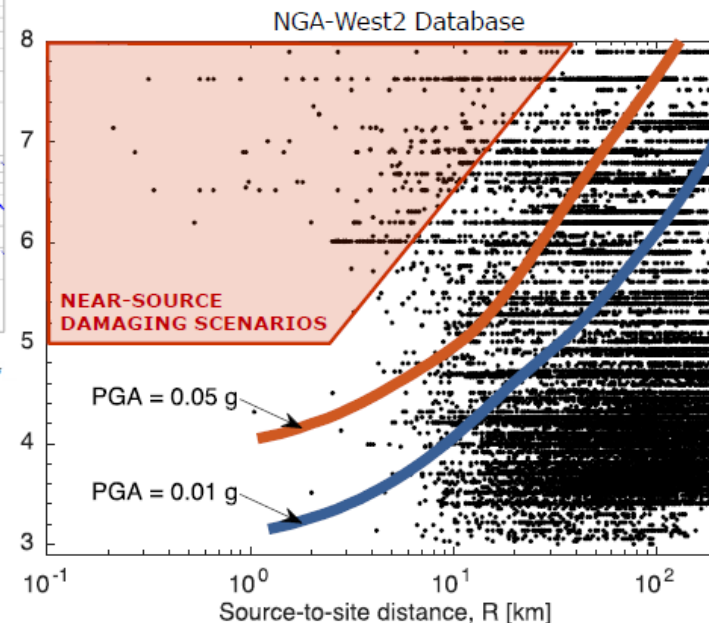


Obiettivi

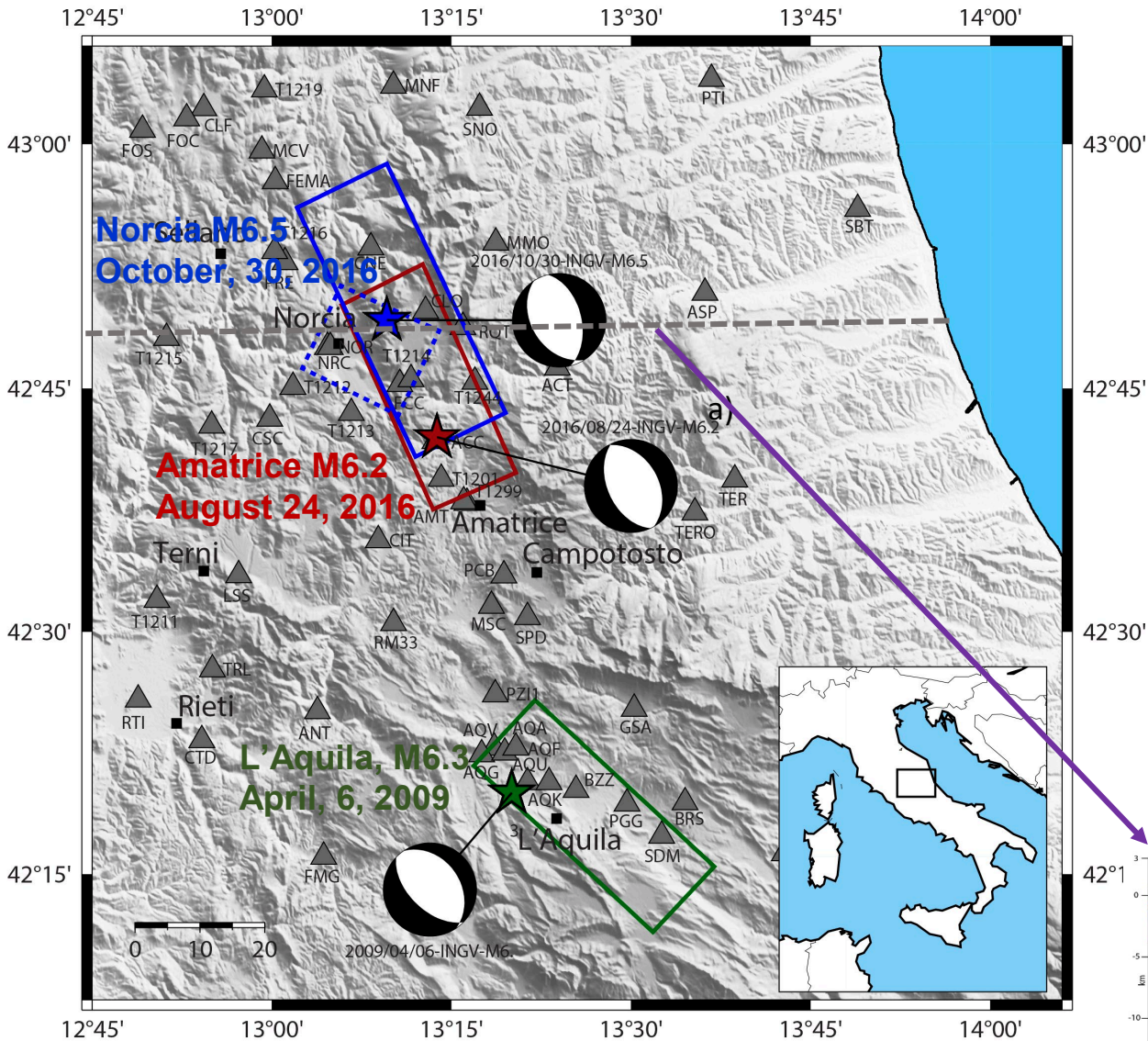
- Esplorare le **caratteristiche del moto del suolo** con un approccio deterministico in 3D fino ad **alte frequenze nell'Appennino Centrale**.
- Investigare la **variabilità** del moto del suolo in relazione alla **topografia** e al **modello di rottura della faglia**.
- Esplorare l'**incertezza** su moto del suolo nella distanza **vicino alla faglia**.
- Testare la **capacità delle simulazioni** attraverso dati ben registrati e dei modelli empirici.



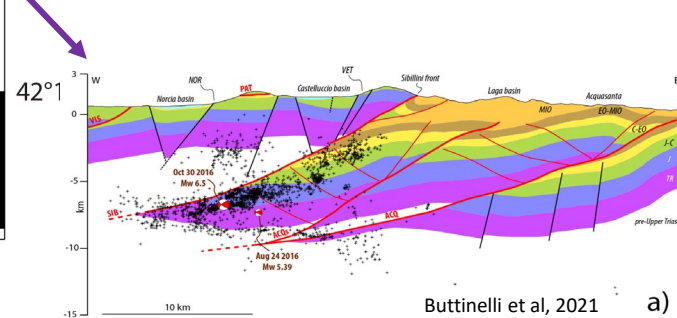
Mw6 Napa Valley earthquake Aug 24, 2014
Source: CESMD



Motivazioni

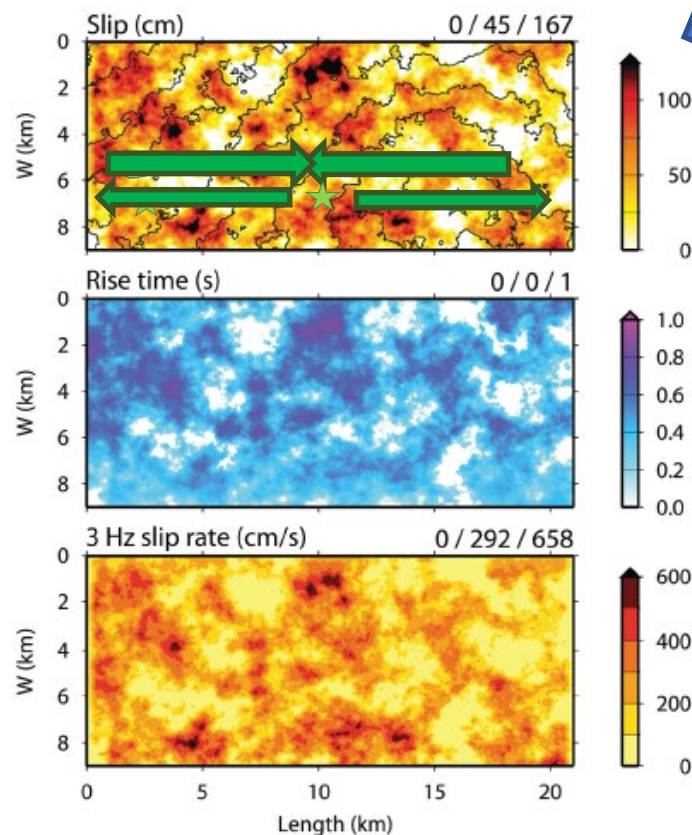


- Negli ultimi **secoli**, la regione ha vissuto una serie di **forti terremoti** lungo la catena appenninica, con **magnitudo** che hanno raggiunto valori fino a **7.0**.
- **Nel 2009**, il terremoto dell'Aquila (Mw 6.3) ha **colpito** l'area, situata circa 50 chilometri a sud dell'epicentro del terremoto di Amatrice.
- **Dopo sei anni** di quiete, la sequenza sismica dell'Italia centrale è iniziata con il terremoto di Amatrice (Mw 6.2) il 24 agosto 2016.
- **Due mesi** dopo si è **verificato** il terremoto di Norcia (Mw 6.5), il più forte e ultimo evento della sequenza.
- Il terremoto di Norcia è stato uno dei terremoti che sono stati registrati da un **elevato numero di stazioni digitali permanenti e temporanee**, installate subito dopo l'evento di Amatrice.



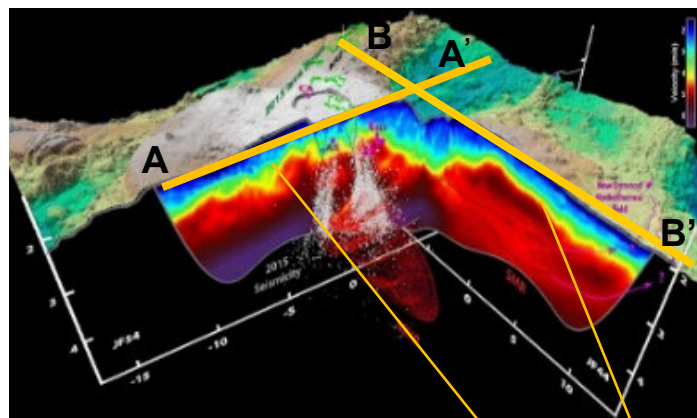
Metodo: Approccio deterministico per simulazioni del moto del suolo basate sulla fisica

Modello di rottura cinematica



Metodo GP (Graves & Pitarka, 2016) una tecnica sviluppata da GP16 dove diversi parametri fisici (rise time, slip, velocità di rottura, ...) sono stati generati sia nel spazio che nel tempo con un processo stocastico a piccola e grande scala.

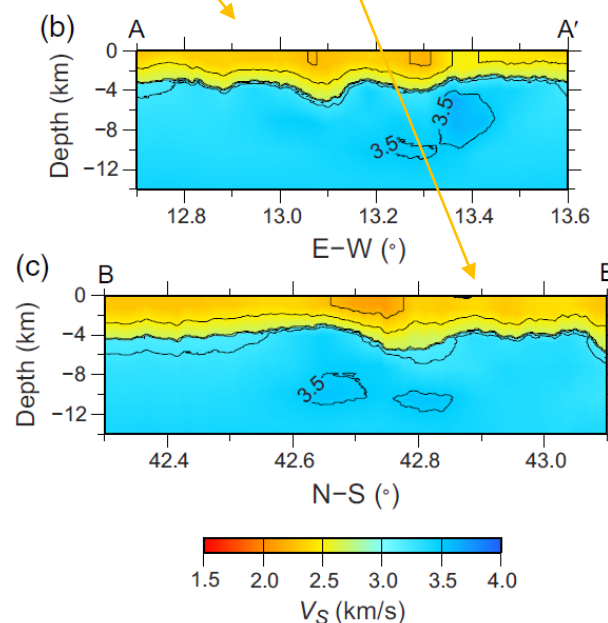
Propagazione anelastica lineare 3D delle onde con Q costante



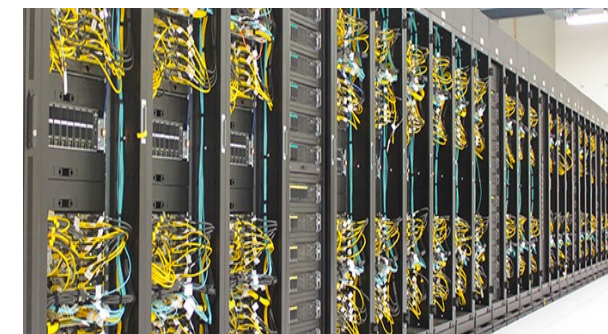
Un **modello di velocità locale 3D** ottenuto da un **modello tomografico** della crosta (Chiarabba et al., 2018).

Codice SW4 (Peterson & Sjogreen, 2018)

Un codice di differenze finite del quarto ordine nel dominio temporale sviluppato presso il LLNL. Utilizza un design di mesh curvilinea vicino alla superficie per modellare la topografia con elevata precisione numerica.



Requisiti computazionali



Le simulazioni vengono eseguite utilizzando un approccio deterministico basato sulla fisica, modellando la rottura della faglia e la propagazione delle onde elastiche e eseguendo la versione parallelizzata per CPU del codice SW4.

Supercomputer QUARTZ del LLNL

Terremoto di Norcia M6.5

Dimensioni del modello: 102 km × 88 km × 31 km

Spaziatura minima della griglia: 25 m

Velocità di taglio minima: 400 m/s

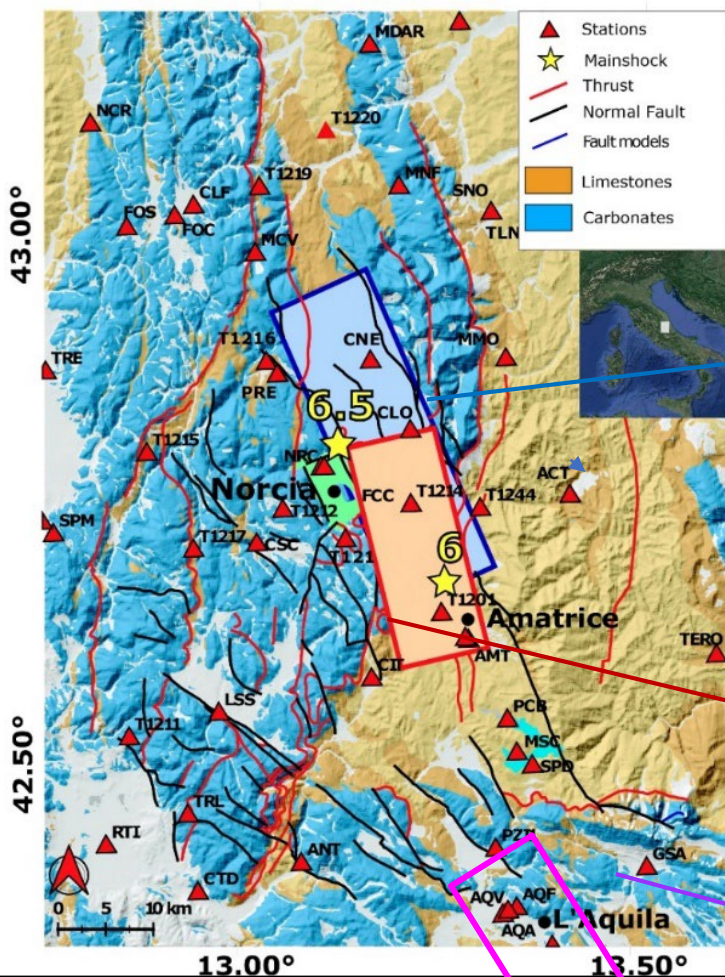
Frequenza massima: 5 Hz

Durata del moto del suolo: 40 s

Con topografia: 10.800 CPU, tempo di esecuzione: 21 ore

Senza topografia: 3.600 CPU, tempo di esecuzione: 4,5 ore

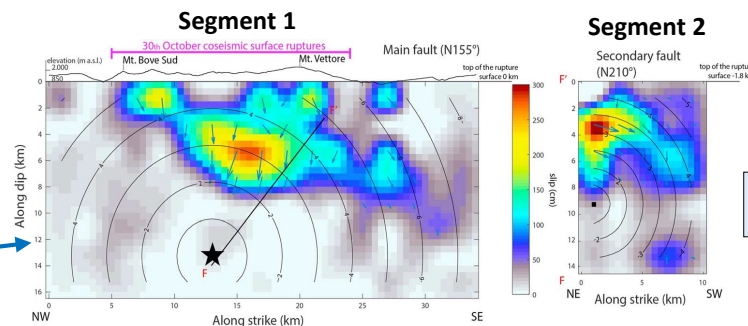
Modelli di rottura utilizzati nelle simulazioni: generati con il metodo ibrido GP



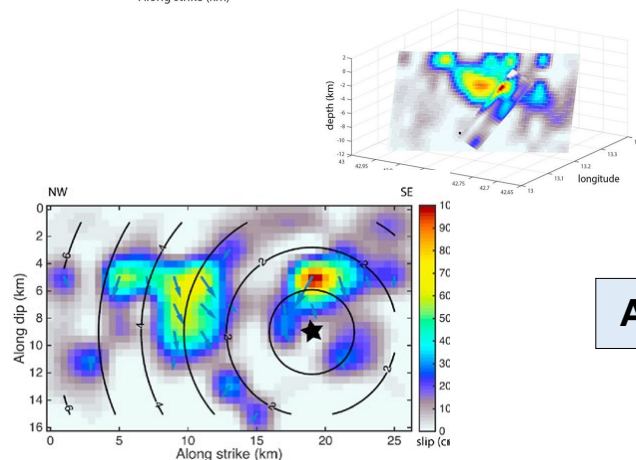
Per la rottura cinematica dei terremoti di Amatrice e Norcia, L'Aquila: abbiamo generato un modello ibrido basato sui modelli di inversione proposti da Scognamiglio et al. (2010; 2018) e Tinti et al., (2016) e considerando le dimensioni e le posizioni degli slip (patch) di questi modelli.

Modello di slip cinematico derivato da inversione

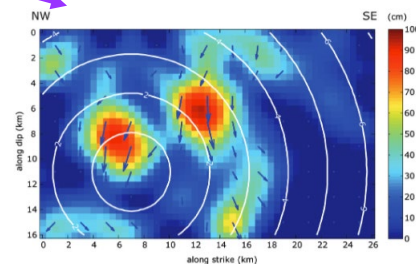
(Scognamiglio et al., 2018, Tinti et al., 2016; Scognamiglio et al., 2010)



Norcia M6.5

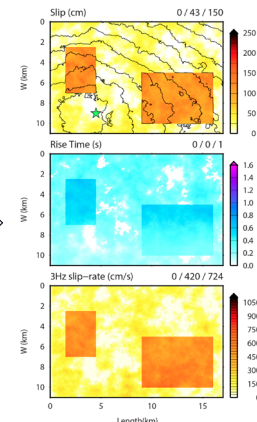
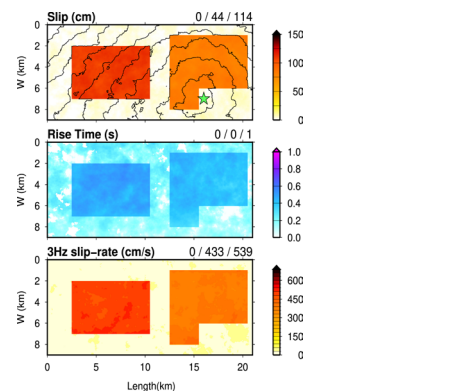
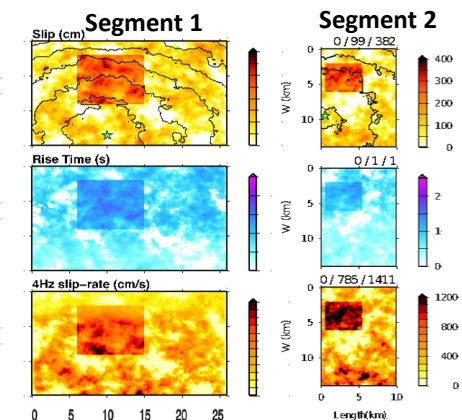


Amatrice M6.2



L'Aquila M6.3

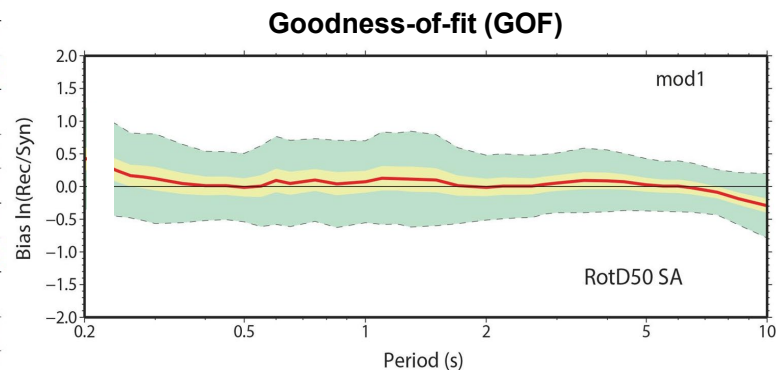
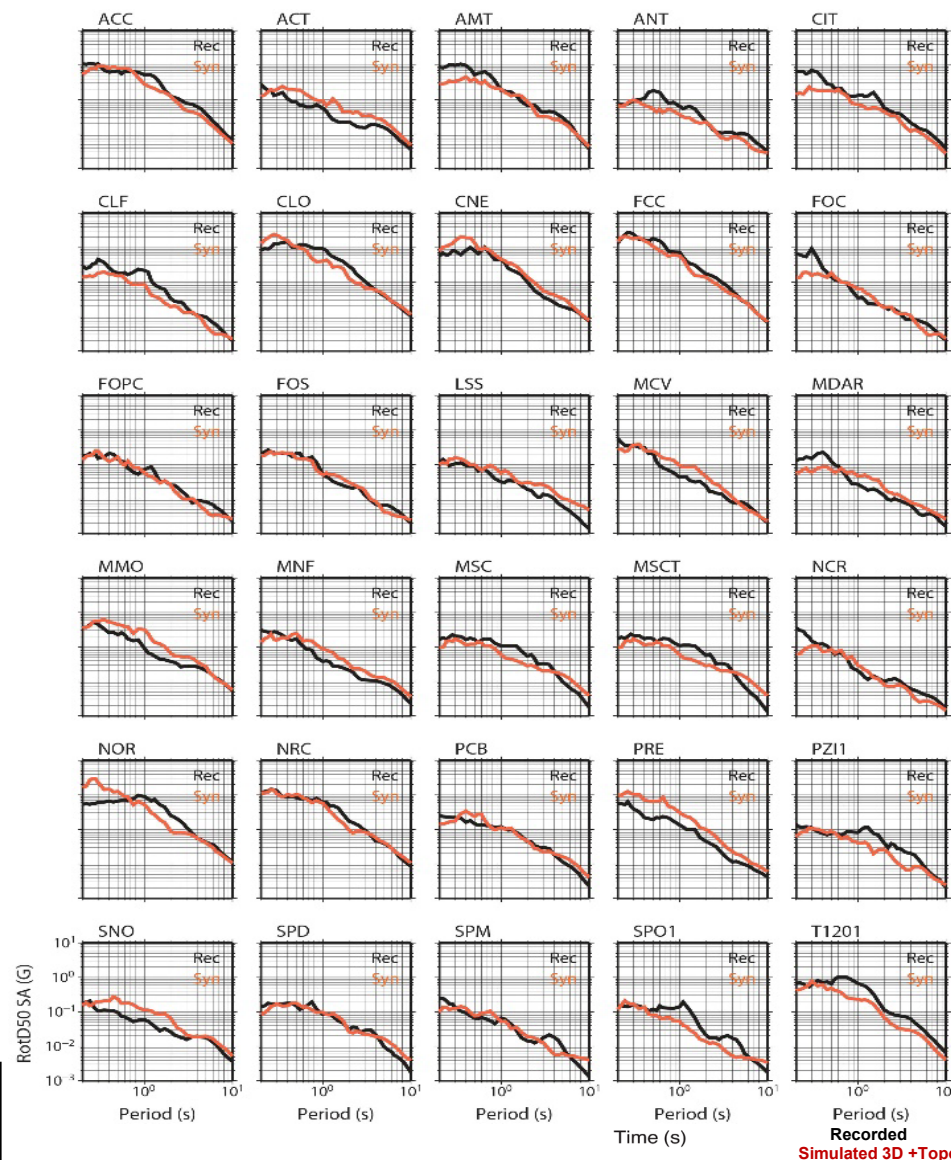
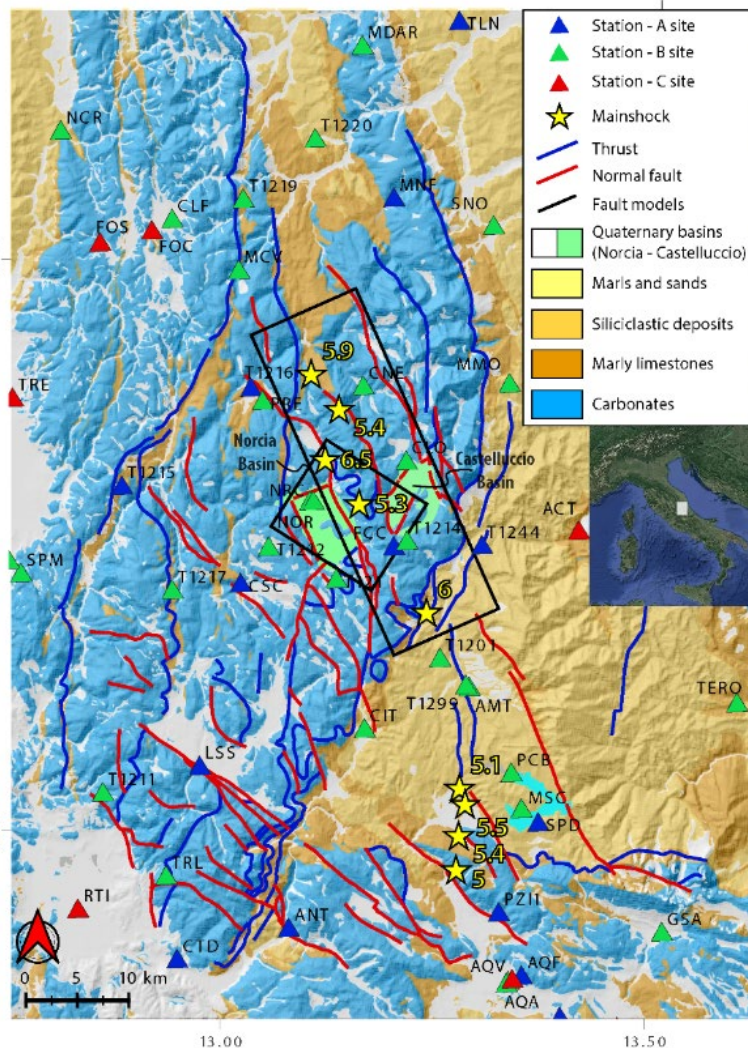
Modelli di slip ibridi da GP16



Il rise-time e la velocità di rottura dipendono dalla profondità. Un tempo di salita più lungo a profondità superficiali e più corto a profondità maggiori influenzano il contenuto in energia sismica sia a lunghi che a corti periodi.

Risultati (1): Simulazioni e validazioni del moto del suolo (0-5 Hz) - Norcia M6.5

Confronto fra accelerazioni simulate e osservate e gli spettri di accelerazioni

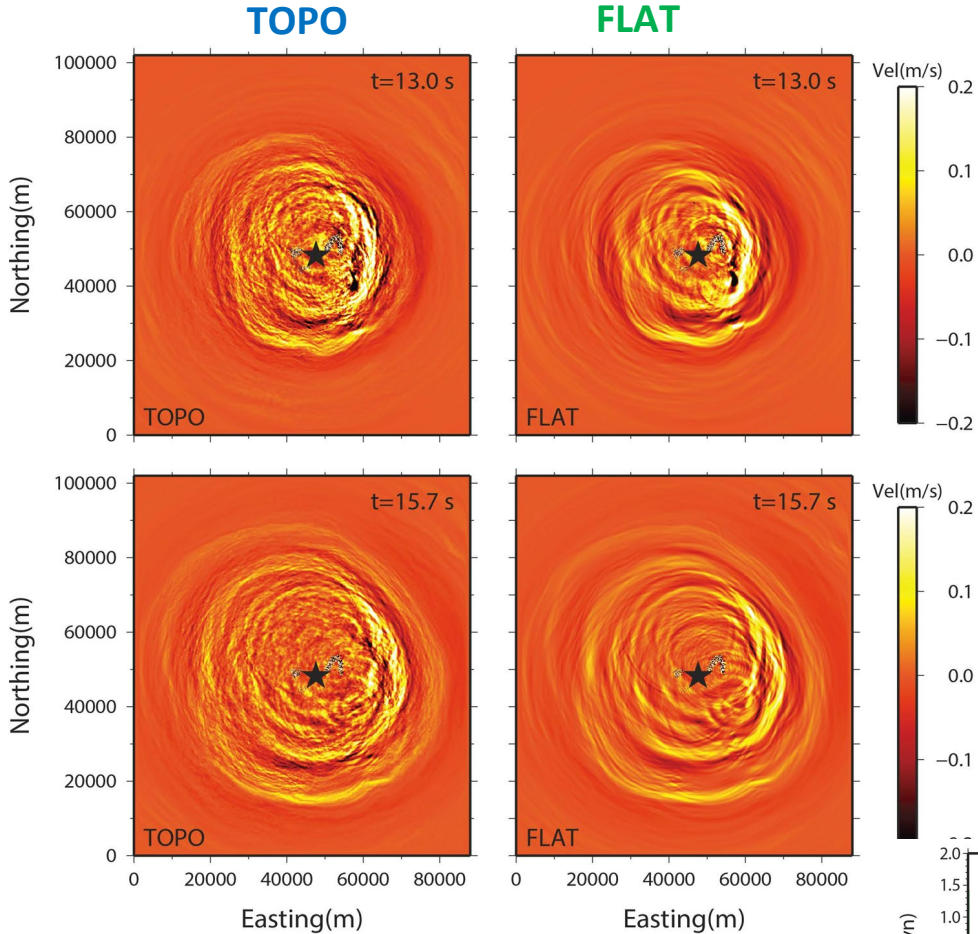


- Valutazione quantitativamente le performance delle nostre simulazioni e la capacità predittiva del nostro metodo.
- Le differenze tra i valori di accelerazione spettrale registrati e simulati utilizzando il GOF per determinare la bontà delle simulazioni delle osservazioni registrate da 41 stazioni.

Pitarka, A., Akinci, A., De Gori, P., Buttinelli, M., (2021). Deterministic 3D Ground-Motion Simulations (0–5 Hz) and Surface Topography Effects of the 30 October 2016 Mw 6.5 Norcia, Italy, Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am. 112 (1), 262–286, doi: [10.1785/0120210133](https://doi.org/10.1785/0120210133).

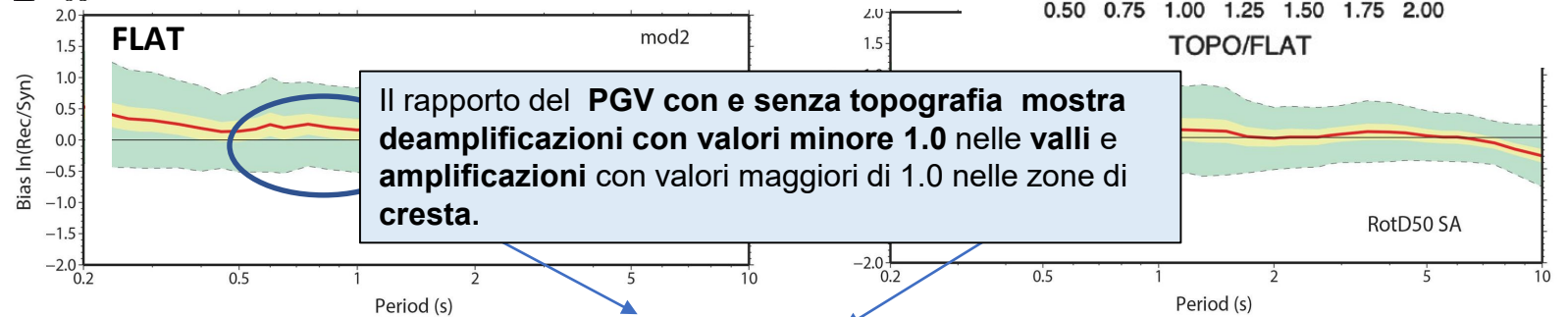
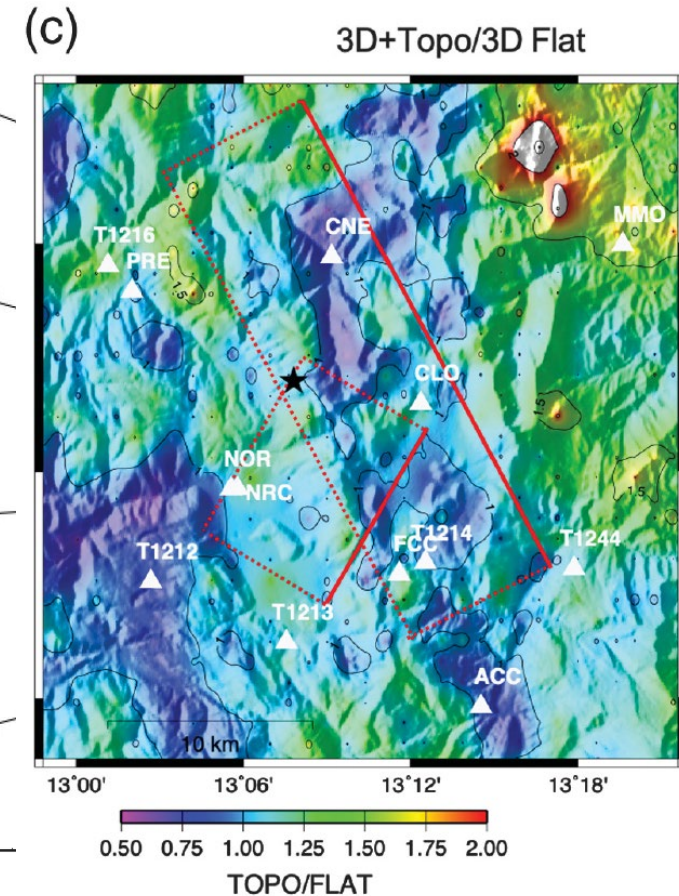
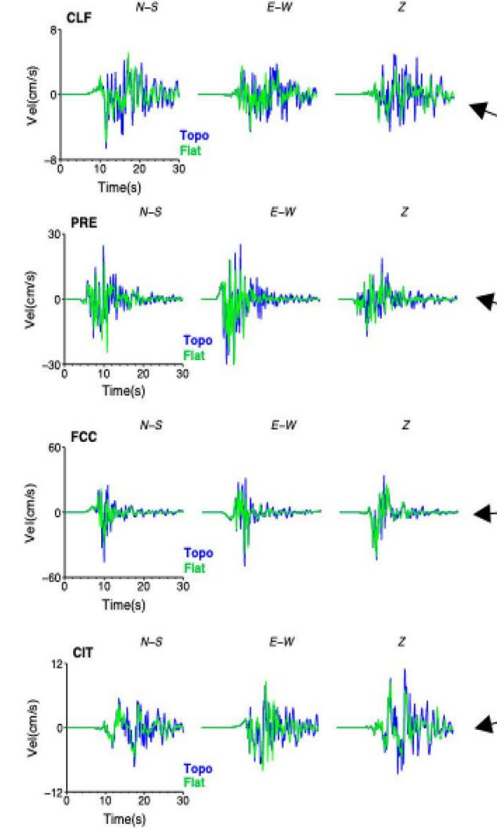
Le simulazioni hanno riprodotto con successo i dati registrati sull'intero intervallo di periodi, da 0,25 a 7 secondi.

Risultati (2): Topographic Effects: Waveforms and spatial variability - Norcia M6.5



Il pattern dei fronti d'onda simulati con topografia risulta più irregolare rispetto a quella senza topografia.

I sismogrammi sintetici calcolati con il modello TOPO mostrano **amplificazioni più grandi** e una **coda più marcata**, con una **durata** relativamente più **lunga** rispetto a quelli del modello topo FLAT.

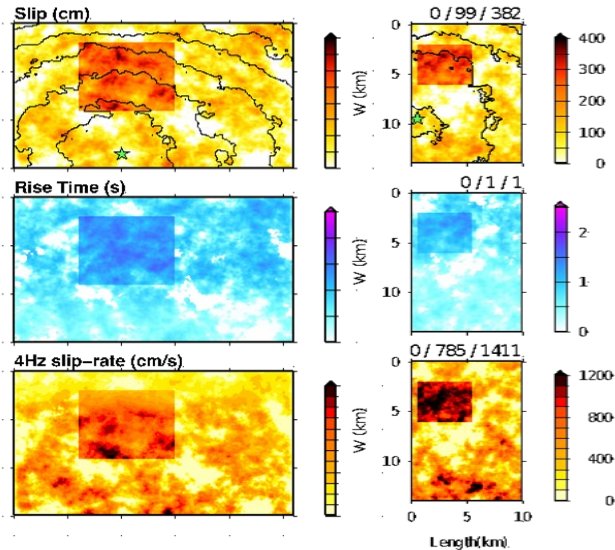


Il rapporto del **PGV con e senza topografia** mostra **deamplificazioni** con valori minore 1.0 nelle valli e **amplificazioni** con valori maggiori di 1.0 nelle zone di **cresta**.

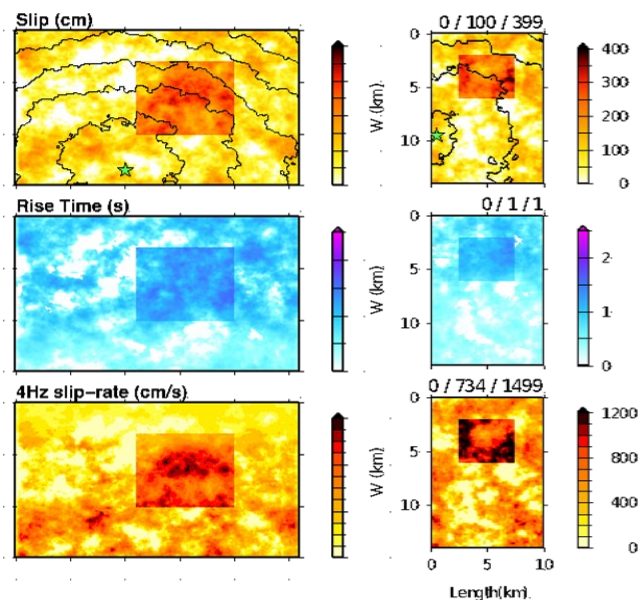
Una riduzione del ~30% nell'ampiezza del moto del suolo per periodi < 1.5 secondi.

Risultati (3): Sensibilità del moto del suolo (PGV) alla distribuzione dello slip - Norcia M6.5

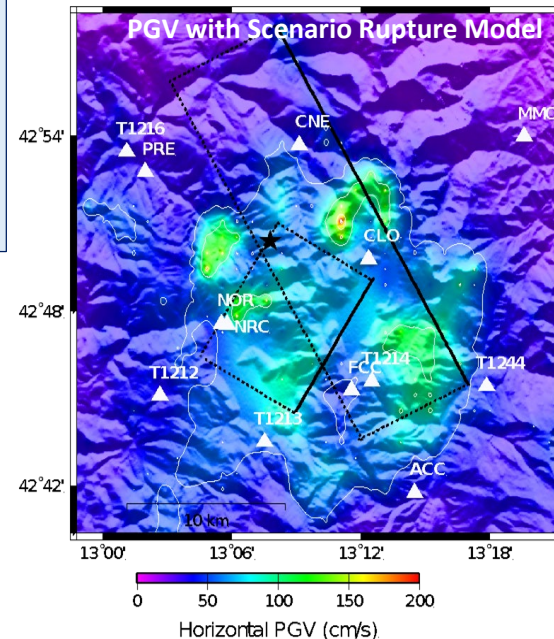
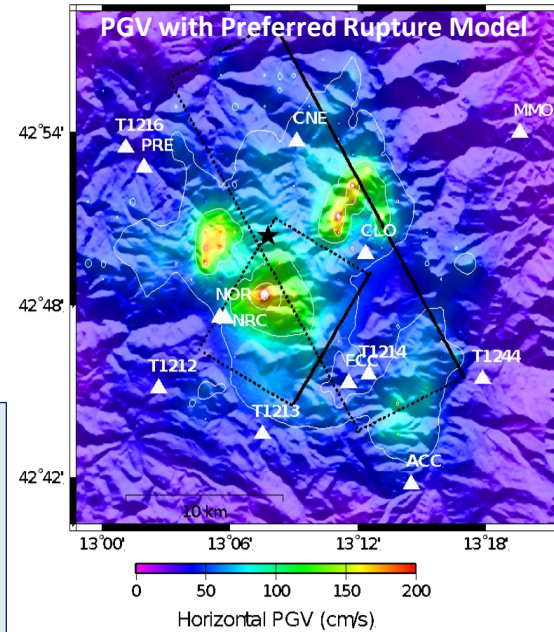
Preferred Rupture Model, M6.5



Scenario Rupture Model, M6.5



Nel nuovo modello di rottura è stata **modificata** solo la **posizione delle asperità**, mantenendo il momento sismico, le **dimensioni della faglia invariata**



Maggiori valori del PGV si osservano nelle aree a grandi patch di slip.

La variabilità del moto del suolo è **elevata** nelle regioni sopra la zona di **hanging-wall**.

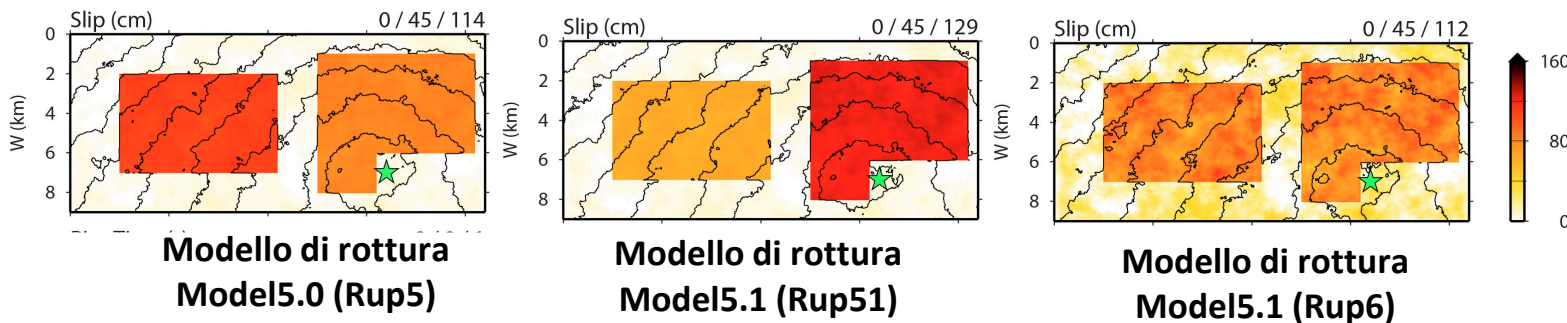
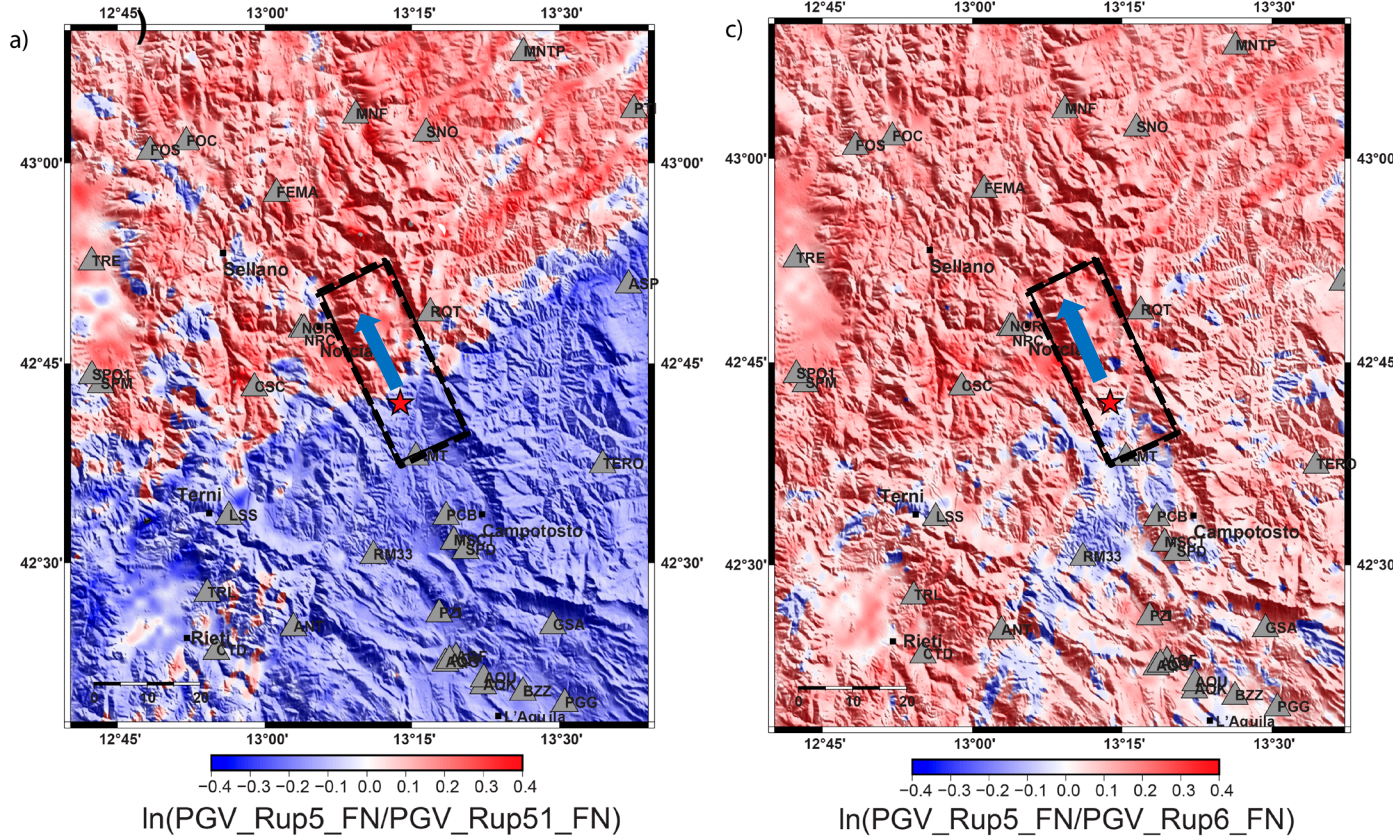
Queste mappe dimostrano che la variabilità e l'ampiezza del moto del suolo a near-source è realmente legata a una combinazione del processo di rottura e della topografia.

Risultati (4): Effetto della Complessità della Rottura e la Direttività - Amatrice M6.2

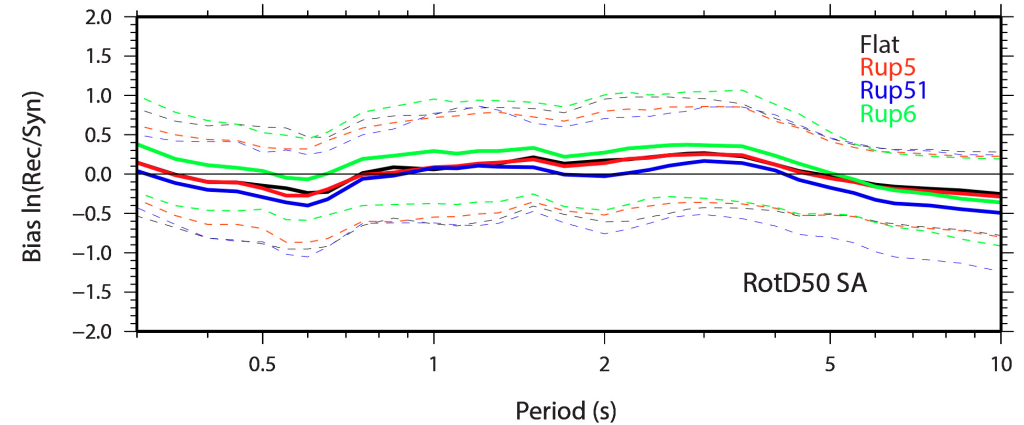
PGV(Rup5)/PGV(Rup5.1

at 8633 virtual stations on a regular grid with 1 km spacing

PGV (Rup5)/PGV(Rup6)



Goodness-of-fit (GOF)



PGV (Rup5/Rup5.1)

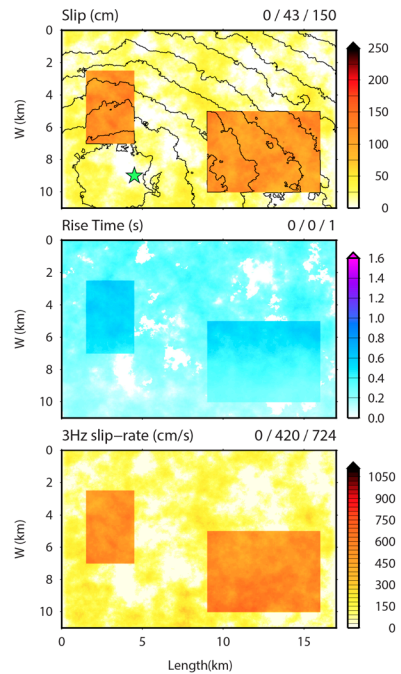
Mod5 produce un movimento del suolo più forte e un effetto di direttività più marcato verso nord, in accordo con i dati osservati.

PGV (Rup5/Rup6)

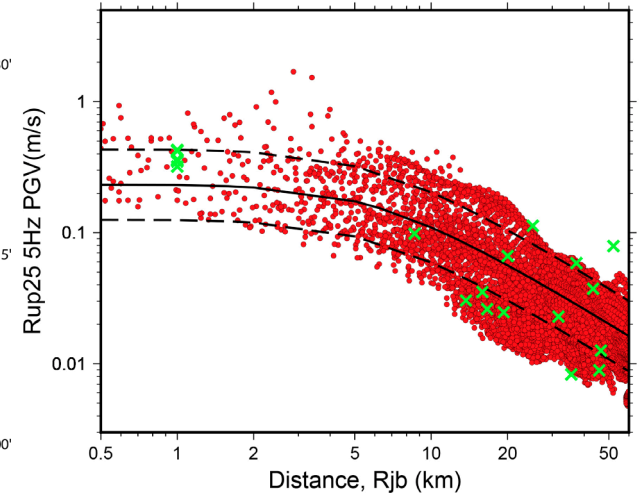
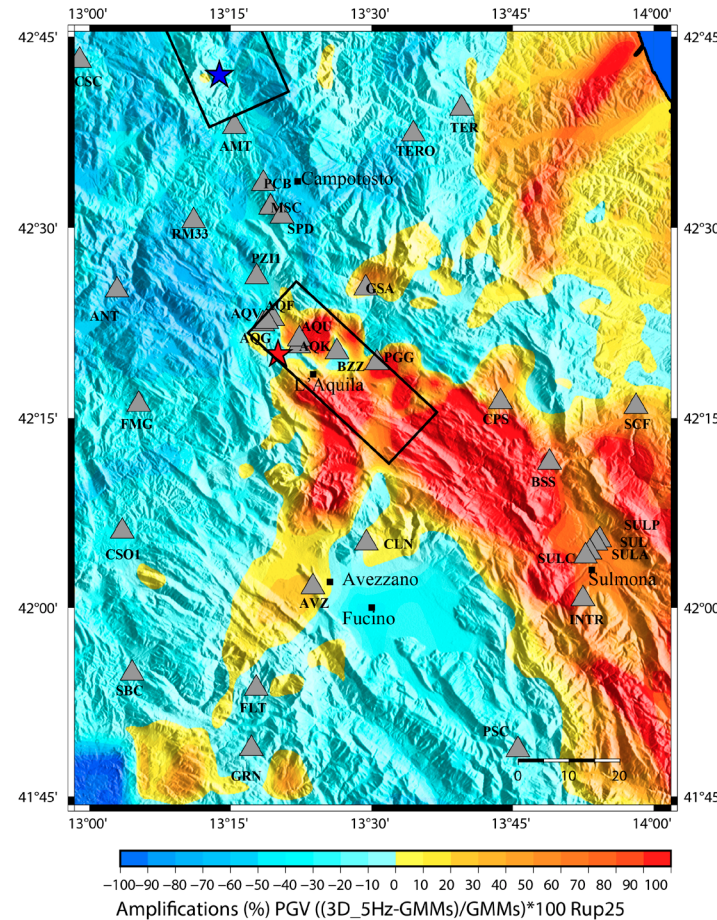
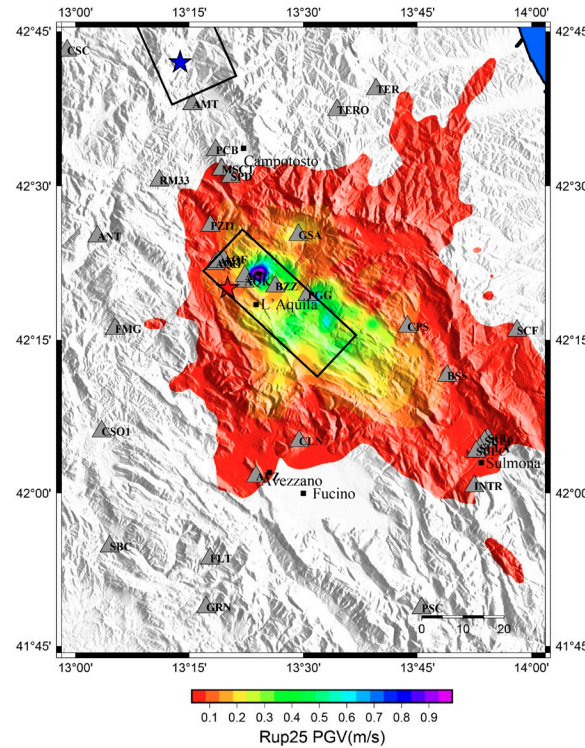
Complessivamente, il **Mod5** produce un movimento del suolo più forte, specialmente verso nord, poiché genera effetti di direttività più marcati rispetto a **Mod6**, che è una versione più uniforme del **Mod5**, con una maggiore variabilità stocastica e meno caratteristiche deterministiche rispetto a **Mod5**.

Risultati (5): Effetto della complessità della rottura e della direttività – L'Aquila Mw 6.3

Modello di scenario di rottura 25.0

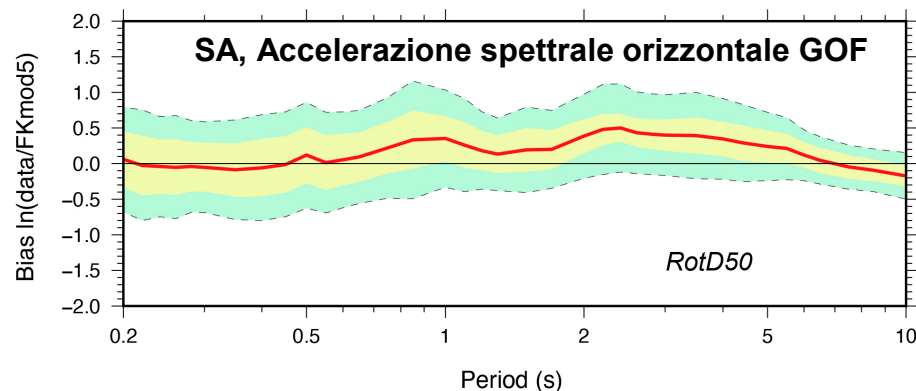


Mappa del PGV simulato su 10.206 stazioni virtuali



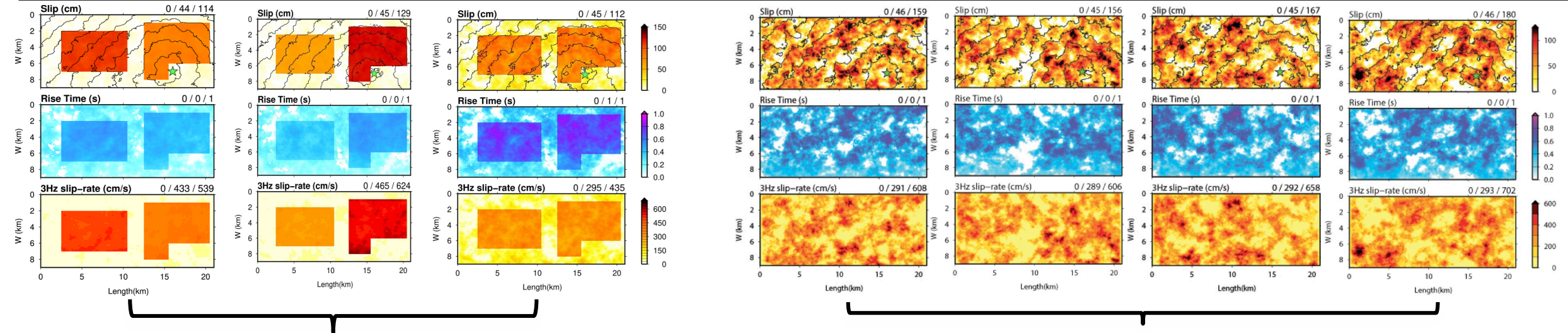
Confronto tra i valori di PGV simulati (punti rossi) e registrati (croci verdi) con il modello GMM ITA18 (Lanzano et al., 2019) per siti di categoria B (linee nere).

Si osserva una buona coerenza tra i dati sintetici, le osservazioni e le previsioni del modello GMM.



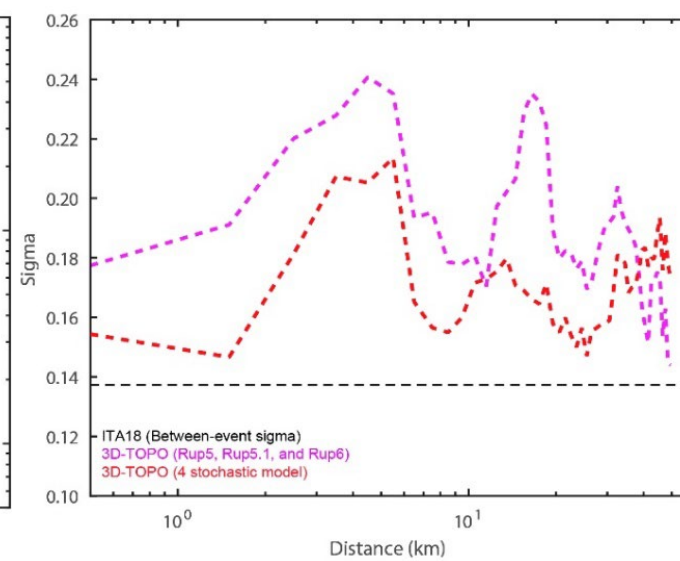
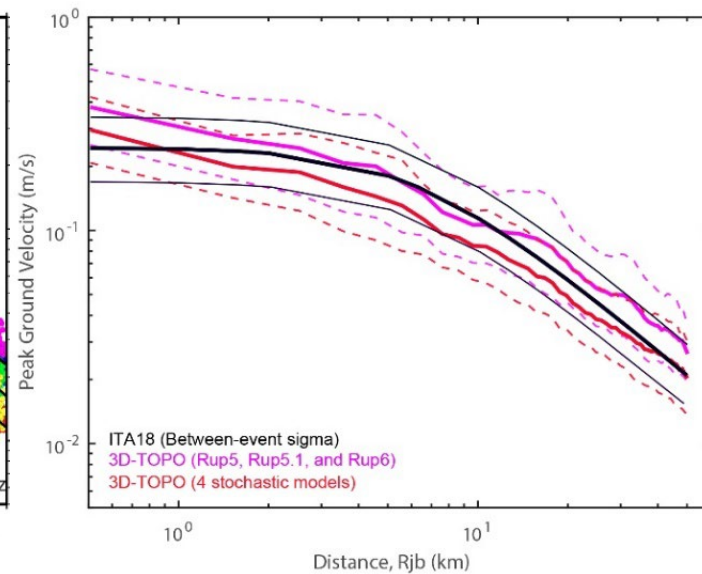
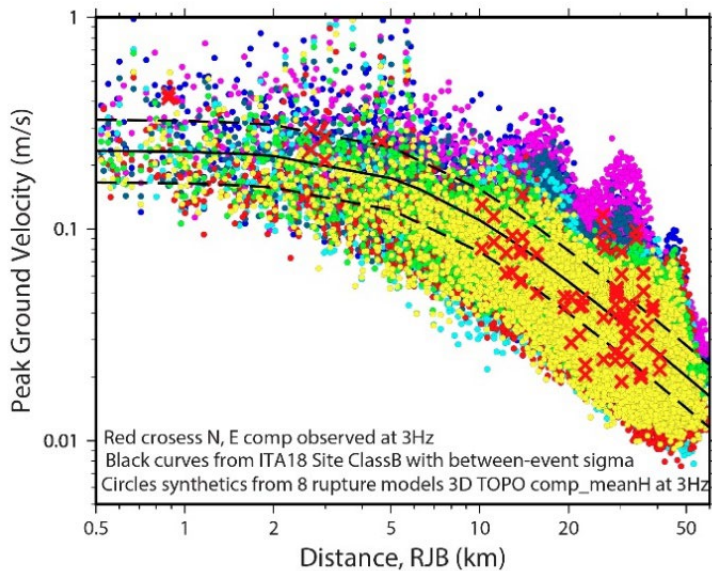
Mappe del rapporto PGV (in variazione percentuale) tra le simulazioni del moto del suolo 3D-SW4 (0–5 Hz, topografia piatta) e i modelli GMM ITA18 (Lanzano et al., 2019). Si osserva un marcato effetto di direttività verso sud, coerente con i dati osservati.

Risultati (6): Variabilità del moto del suolo (PGV) e distribuzione dello slip - Amatrice M6.2



Modelli di rottura ibrida

Modelli di rottura Stocastica



Le simulazioni con modelli di slip ibridi, con grande asperità, hanno un maggiore impatto sul moto del suolo e producono una maggiore variabilità del moto del suolo (sigma) a tutte le distanze rispetto sia al modello empirico che a quelli derivanti da modelli stocastici.

Conclusioni

1. La nostra tecnica di simulazione del moto del suolo ha dimostrato di essere efficace nelle simulazioni deterministiche nell' Appennino Centrale.
2. Abbiamo osservato che il moto del suolo è influenzato non solo dal processo di rottura ma anche dalla topografia della superficie.
 1. Le intensità del moto del suolo sono risultate maggiori sopra la traccia della faglia nella sezione «*hanging-wall*» e sulle cime delle montagne/colline.
 2. L' amplificazione del moto del suolo dipende dalla posizione relativa delle grandi aree di slip.
3. *Between-event residui* varia con la distanza ed è maggiore rispetto a quello presentato nel modello empirico del GMMs.

Thank you for your attention!

The simulations were performed on LLNL's HPC Systems and were funded by the LLNL Computing Grand Challenge 14, titled 'Broad-band Earthquake Ground Motion Simulations on LLNL's Next Generation HPC Systems.'

The study was partially conducted within the framework of the SECURE project, Pianeta Dinamico (2023–2025), supported by the Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR).

The study was also partially conducted within the Seismic Hazard Center (CPS) at INGV, which is kindly acknowledged.



Earthquake Kinematic Rupture Models

Earthquake M_0 , Faulting Type, Fault Length and Width

Slip Distribution

Spatially random slip distribution Von Karman Power Spectrum
-deterministic for low-wavenumbers
-stochastic for high-wavenumber squared fall-off
-magnitude dependent correlation lengths

Rupture Speed V_r

-depth dependent specified to average 75%–80% V_s

Rupture time

-scaled with cubic root of magnitude (Graves and Pitarka, 2016)
-local random perturbations that follow normal distribution and partially correlated with the underlying slip distribution

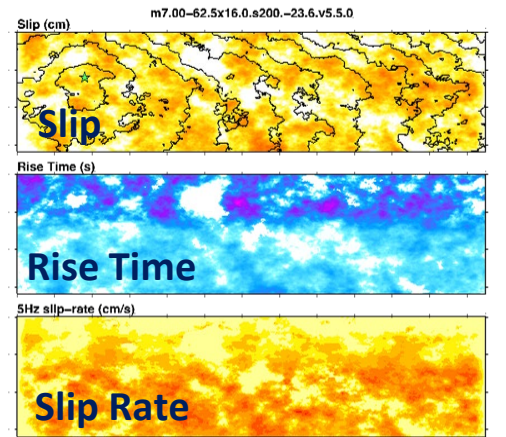
Slip Rate Function

-depth dependent slip rate function shape
-bell-shaped at shallow depth, above weak zone
-transition to Liu-type below weak zone

Rise Time Distribution

-average rise time scales with $M_0^{1/3}$ (Somerville et al., 1999)
-partially correlated with with square root of slip
-local perturbations partially correlated with the underlying slip and faulting mechanism
-depth dependent, longer at $z < 5\text{km}$

Single Rupture Scenario

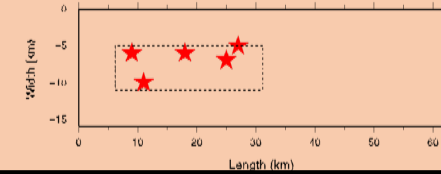


Graves and Pitarka, (2016)

RG uses spatial and temporal kinematic rupture parameters

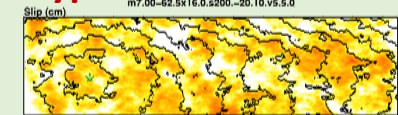
5 Randomized Hypocenter Locations

Location along strike direction : 10% - 50% Fault Length
Location along dip direction: 5-11 km

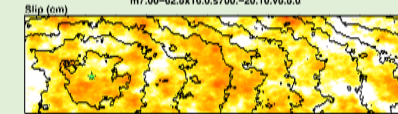


Various Slip Distributions for a Each Hypocenter Location

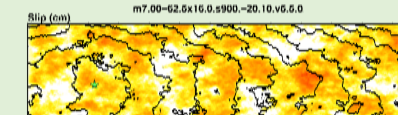
S1



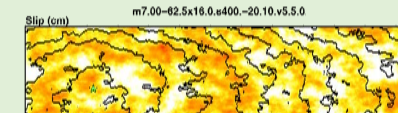
S2



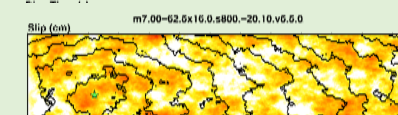
S3



S4



S5



Random Seed

Rupture process is randomly heterogeneous at different scale lengths