



**Istituto Nazionale di
Geofisica e Vulcanologia**

***SECONDO RAPPORTO DI SINTESI SUL TERREMOTO
DI AMATRICE M_L 6.0 DEL 24 AGOSTO 2016 (ITALIA
CENTRALE)***

Gruppo di Lavoro INGV sul Terremoto di Amatrice

19 Settembre 2016

INDICE

Introduzione

1. Sequenza sismica

- 1.1 Reti di monitoraggio (SISMIKO, Emersito)
- 1.2 Distribuzione aftershock nel tempo
- 1.3 Geometria faglie dalle localizzazioni
- 1.4 Meccanismi focali

2. Evento principale nuove analisi

- 2.1 Dati Strong Motion e ShakeMap
 - 2.1.1 Inversione dati strong Motion
- 2.2 Geodesia
 - 2.2.1 GPS
 - 2.2.2 Inversione
 - 2.2.3 High rate GPS
 - 2.2.4 SAR e modellazione congiunta con dati CGPS
- 2.3 Geologia
 - 2.3.1 Rotture superficiali (Emergeo)
 - 2.3.2 Confronto con le conoscenze geologiche
- 2.4 Macrosismica
 - 2.4.1 Rilievo macrosismico (Quest)

3 Quadro interpretativo

Introduzione

A circa quattro settimane dal terremoto di magnitudo locale (M_L) 6.0 (M_w 6.0) che il 24 agosto ha colpito l'area dell'Appennino centrale tra i comuni di Norcia e Amatrice, la quantità dei dati acquisiti finora, le analisi e gli studi in corso consentono di fornire un quadro interpretativo più dettagliato dei processi che hanno generato il sisma e la sequenza sismica che se ne è originata.

Saranno di seguito illustrate analisi e risultati che integrano quelli descritti nel "Primo Rapporto di Sintesi sul Terremoto di Amatrice".

1 Sequenza sismica

1.1 Reti sismiche di monitoraggio (gruppi di emergenza SISMO, Emersito)

La Rete Sismica Nazionale (RSN) nell'area epicentrale ha una buona densità e copertura (vedi triangoli blu in Figura 1.1-1), questo ha permesso di ben vincolare l'epicentro e la magnitudo dell'evento principale del 24 agosto alle ore 03:36 (italiane), che ha avuto una M_L 6.0 (M_w 6.0), e delle scosse che lo hanno seguito nelle prime ore della sequenza sismica. Naturalmente, per meglio vincolare le profondità ipocentrali e quindi per avere localizzazioni accurate, è necessario rendere la rete di monitoraggio sismico più densa. A tal fine sono state installate dal coordinamento delle reti sismiche mobili dell'INGV (SISMO) 17 stazioni temporanee. Le prime hanno iniziato a registrare nella mattina del 24 agosto, altre si sono aggiunte nei giorni successivi (12 di queste contribuiscono al monitoraggio in tempo reale, le altre 5 vengono utilizzate in fase di revisione dal Bollettino Sismico Italiano).

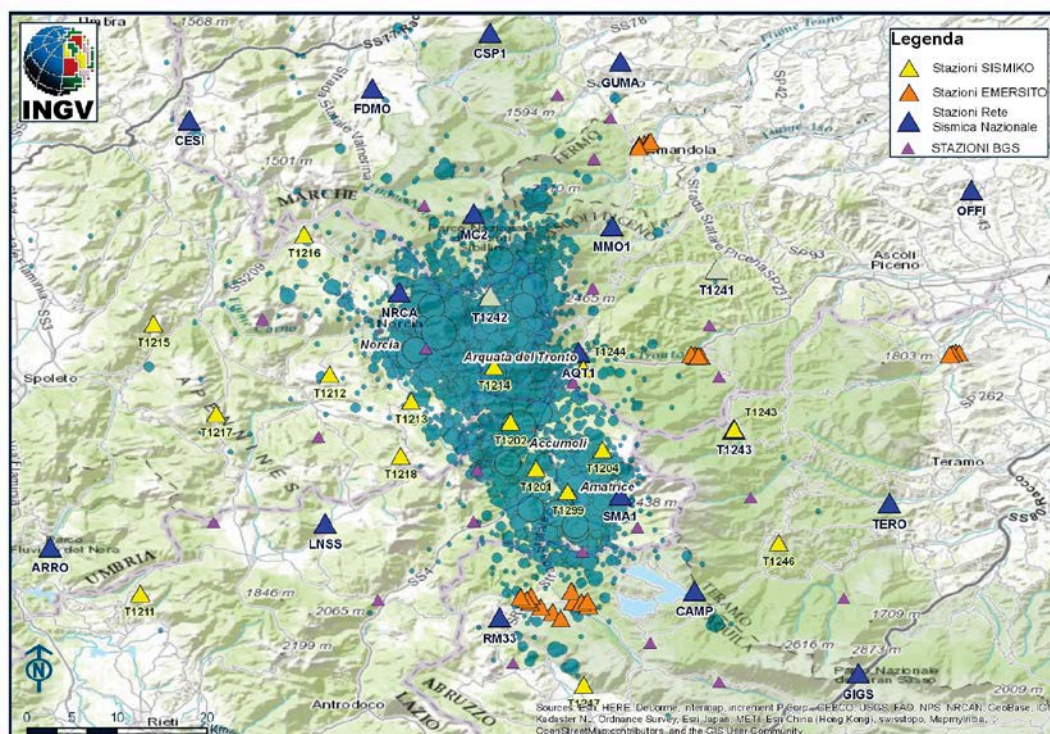


Figura 1.1-1. Mappa della rete sismica INGV in area epicentrale; le stazioni temporanee per il monitoraggio (triangoli gialli e grigi) sono state installate tra il 24 e 28 agosto 2016 ad integrazione della RSN (simboli blu). Sono inoltre presenti le stazioni di EMERSITO (triangoli arancioni). Riportate in mappa anche le stazioni Broad Band installate in collaborazione con il BGS (triangoli piccoli fucsia).

I dati registrati dalle stazioni sono disponibili insieme a quelli della rete nazionale nell'archivio EIDA (European Integrated Data Archive; Figura 1.1-2).

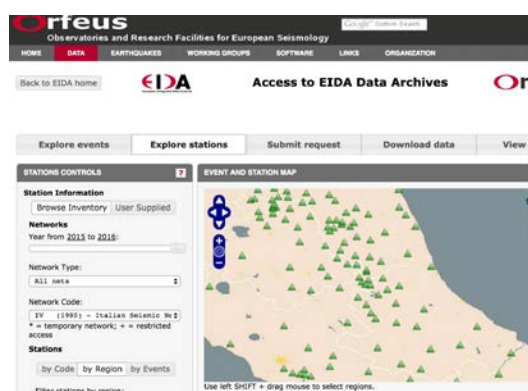


Figura 1.1-2. Sito EIDA (<http://145.23.252.222/eida/webdc3/index.html>) dove sono distribuiti i dati in continuo delle stazioni delle RSN e delle stazioni per migliorare le localizzazioni ipocentrali.

Oltre alle stazioni installate per migliorare le localizzazioni sono state fatte altre installazioni. Il gruppo di emergenza EMERSITO (*task force* operativa trasversale alle sezioni INGV per lo studio di effetti di sito a seguito di eventi sismici) ha selezionato, durante la prima fase dell'emergenza (24-25/08), alcuni siti prossimi all'area epicentrale. In particolare sono state individuate aree urbanizzate logisticamente semplici da raggiungere, dove sono presenti situazioni geologiche e strutturali che possono dar luogo a effetti di sito (topografia, zona di faglia, bacino). Sono state installate 22 stazioni (triangoli arancioni in Figura 1.1-1) di cui 5 sono in acquisizione *real-time* (una di esse contribuisce alle localizzazioni di sala di monitoraggio). Le stazioni sono suddivise in 4 reti sismiche nei comuni di Amandola (FM; vedi Figura 1.1-3), Civitella del Tronto (TE), Montereale (AQ) e Capitignano (AQ).

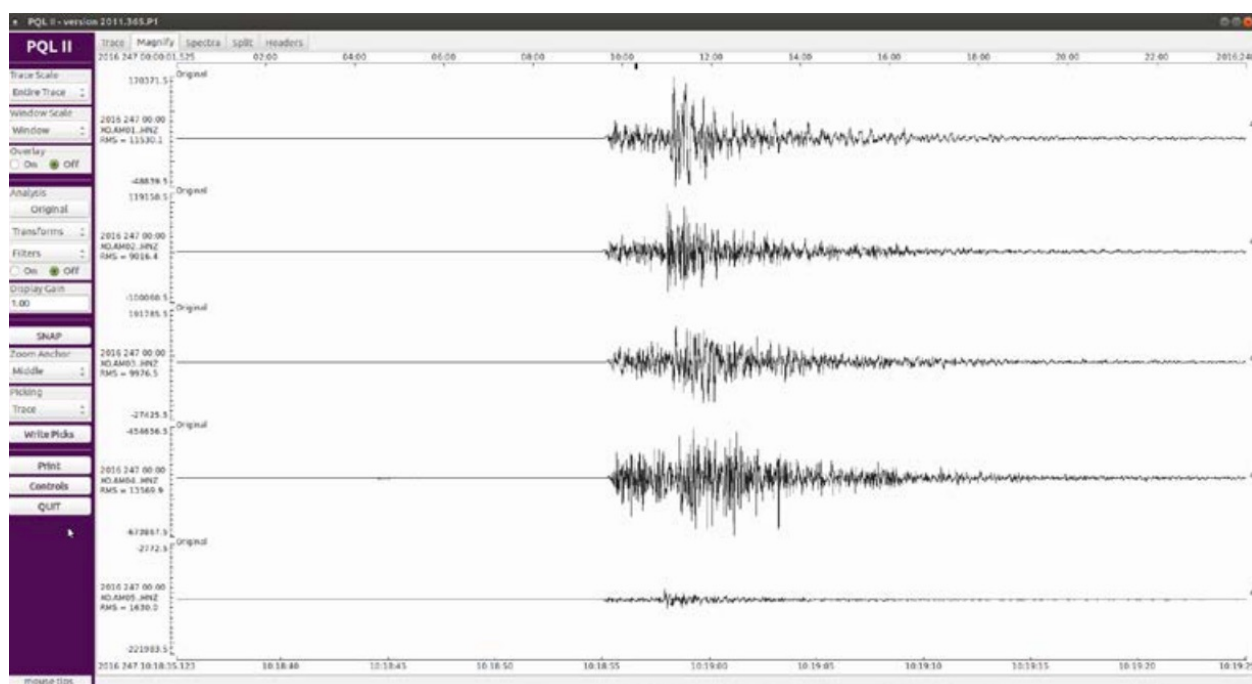


Figura 1.1-3. Tracce della componente verticale dei 5 accelerometri installati ad Amandola che hanno registrato il terremoto Mw 4.3 avvenuto alle 10:18 UTC il 03/09/2016.

Le stazioni sono state installate nei giorni 26-31/08 e saranno rimosse indicativamente nella seconda metà di settembre, in modo da spostare l'intervento di Emersito nelle zone più colpite, previa interazione con il Centro di Microzonazione Sismica.

Oltre all'INGV anche altre istituzioni nazionali ed internazionali hanno installato reti temporanee: il Dipartimento di Protezione Civile (DPC) ha installato delle stazioni accelerometriche a complemento della rete Rete Accelerometrica Nazionale (RAN); ed il *British Geological Survey* (BGS) nell'ultima settimana ha installato delle stazioni sismiche con sensori Broad Band (BB).

1.2 Evoluzione della sequenza sismica

Gli oltre 9000 *aftershocks* localizzati al 16 settembre 2016 (ISIDe working group (2016) *version* 1.0, DOI: 10.13127/ISIDe; cnt.rm.ingv.it) si distribuiscono in un volume crostale più esteso rispetto alla zona interessata nei primi giorni che era grosso modo compresa tra i comuni di Norcia e Amatrice. Al momento della stesura di questo secondo rapporto, la sequenza sismica interessa un volume la cui proiezione in superficie ha un'estensione di circa 50 km in direzione appenninica (dal paese di Ussita a Nord, fino al lago di Campotosto a Sud), e di circa 15 km perpendicolarmente ad essa (Figura 1.2-1). Nella zona a Nord, intorno a Norcia, gli eventi della sequenza sembrano interessare anche porzioni del sistema di faglia situato a NE di quella attivatisi durante la prima parte della sequenza. In quest'area, si è verificato anche l'ultimo (in ordine di tempo) terremoto della sequenza con M_L superiore a 4.0, il giorno 3 settembre; tre eventi prossimi a magnitudo 4.0 si sono verificati il 15 settembre nella zona di Norcia.

La distribuzione in mappa dell'insieme degli eventi della sequenza (Figura 1.2-1) suggerisce l'attivazione di un sistema di faglie orientato in direzione appenninica e caratterizzato da alcune complessità, particolarmente nella sua porzione settentrionale, dove la maggiore dispersione spaziale degli *aftershocks* suggerisce il coinvolgimento di più sezioni di faglia.

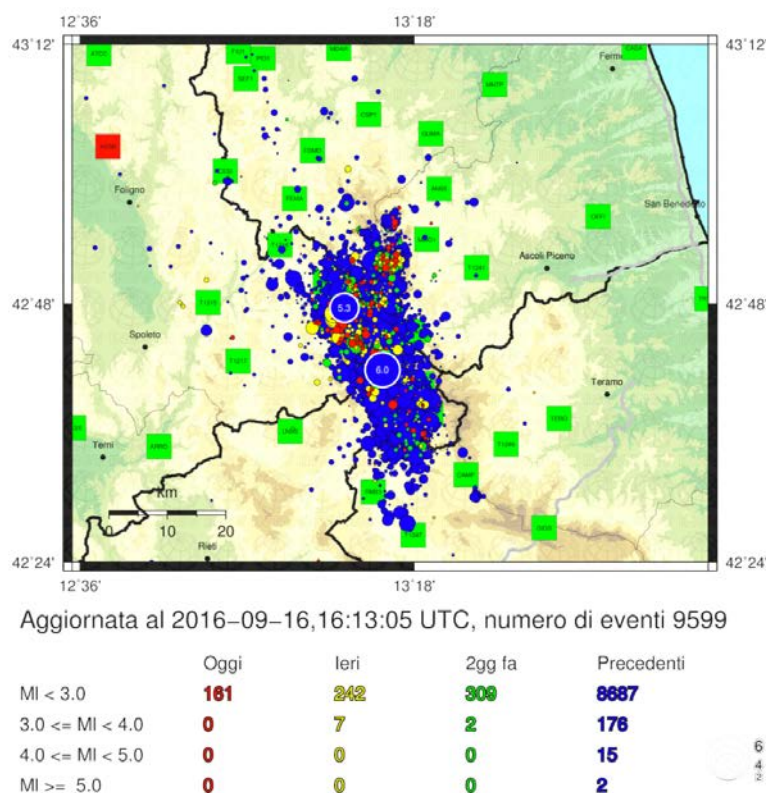


Figura 1.2-1. Distribuzione degli epicentri della sequenza (aggiornato al 16/09/2016).

Per quanto riguarda il rateo di sismicità e il rilascio di momento sismico si osserva una progressiva riduzione con il procedere nel tempo della sequenza sismica. Il numero giornaliero di *aftershocks* di M_L superiore a 2.0, che nei giorni immediatamente successivi al *mainshock* era compreso tra 200 e 300, è gradualmente diminuito, fino a risultare inferiore a 50 negli ultimi giorni presi in considerazione, come mostrato nel grafico in Figura 1.2-2. aggiornato al 16 settembre. Il 15 settembre c'è stata complessivamente una ripresa dell'attività nella zona di Norcia che ha prodotto numerose eventi piccoli ma anche 7 eventi di magnitudo maggiore di 3.0 come ormai non accadeva da alcuni giorni. Parallelamente anche il rilascio di momento sismico giornaliero che mostrava una graduale diminuzione nella giornata del 15 settembre ha avuto un significativo aumento; rispetto ai giorni immediatamente successivi al *mainshock* resta comunque più piccolo di 2 ordini di grandezza.

Queste semplici osservazioni statistiche sul fenomeno sismico in atto, certamente non escludono la possibilità che possano verificarsi ulteriori terremoti di magnitudo rilevante ($M_L > 5$); probabilità che al momento è di circa il 3% stimata nel forecast settimanale degli *aftershock* che l'INGV calcola utilizzando il modello OEF_Italy [descritto in: W. Marzocchi, A.M. Lombardi, E. Casarotti (2014); The establishment of an operational earthquake forecasting system in Italy. Seismol. Res. Lett., 85(5), 961-969].

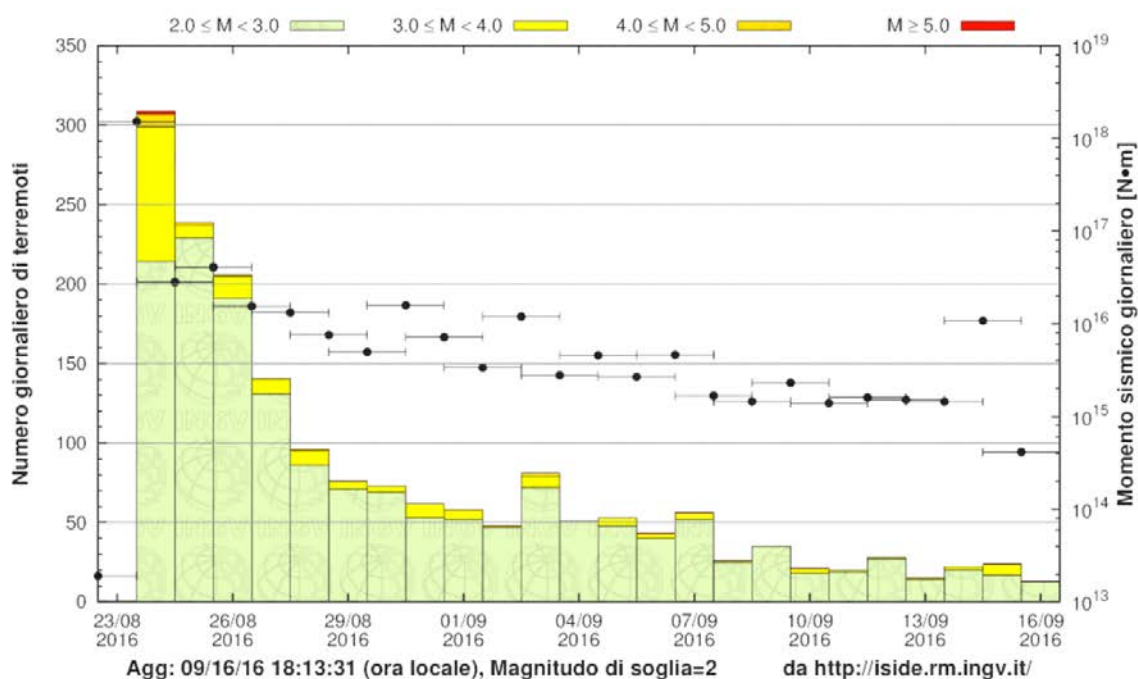


Figura 1.2-2. Istogramma del numero giornaliero di eventi (con $M \geq 2.0$) localizzati dall'INGV i diversi colori indicano diverse classi di magnitudo. La scala sulla destra si riferisce al rilascio di momento giornaliero.

1.3 Geometria faglie dalle localizzazioni ipocentrali (AMA_LOC Working Group – DOI: 10.5281/zenodo.61404)

L'analisi delle localizzazioni ipocentrali consente di avere un primo quadro d'insieme della geometria del sistema di faglie coinvolto nella sequenza sismica in atto. Si tratta di un quadro preliminare, visto che la sequenza è ancora in corso e che analisi più raffinate richiederanno tempi necessariamente più lunghi, ma utile ad indirizzare studi ulteriori e di maggior dettaglio.

Il catalogo considerato nell'analisi presentata è costituito da circa 3200 terremoti, verificatisi dal 24 agosto al 3 settembre. Gli eventi sono stati localizzati tramite l'utilizzo del codice di inversione *NonLinLoc* (<http://alomax.free.fr/nlloc/>), utilizzando i tempi di arrivo alle stazioni sismiche delle fasi P e S stimati dal personale dell'INGV durante i turni di sorveglianza sismica, e estratti dal database istituzionale (<http://webservices.rm.ingv.it/fdsnws/event/1/>). Il modello di velocità utilizzato per le localizzazioni è un modello 1-D esistente in letteratura [Carannante et al., 2013]. Le localizzazioni sono state poi selezionate qualitativamente, in modo da soddisfare i seguenti criteri:

Rms < 0.5 s; Minimum number of phase = 10; Gap < 180°; Vertical Err < 2 km; Horizontal Err < 1 km

Vengono in sequenza mostrate alcune sezioni verticali (corredate dalla mappa su cui identificarne la traccia) attraverso il volume crostale interessato dalla sequenza, tracciate attraverso differenti porzioni di tale volume e con varie orientazioni.

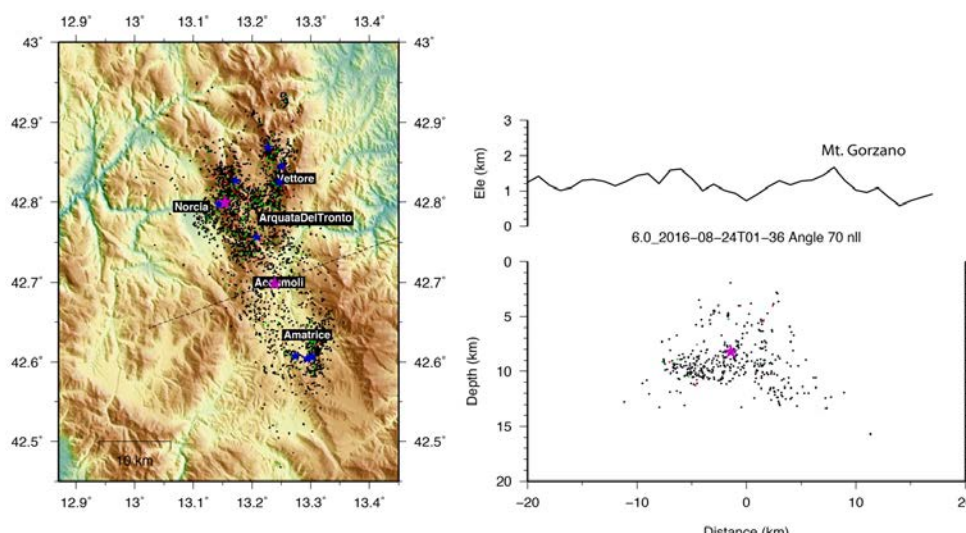


Figura 1.3-1. Mappa degli epicentri della sequenza sismica rilocalizzati e sezione lungo la linea indicata in mappa passante per l'evento principale con $M=6.0$.

La sezione in Fig. 1.3-1 è tracciata lungo il piano che attraversa l'ipocentro del mainshock (ML 6.0) del 24 agosto (stella viola) con una orientazione circa perpendicolare allo strike del piano di faglia, come desunto dal meccanismo focale ($N156^\circ E$, dalla soluzione INGV-TDMT). La distribuzione della sismicità consente di intravedere il piano di faglia su cui si è originato il

mainshock. Si tratta di un piano immergente verso SW, alla cui base, a circa 8 km di profondità, è situato l'ipocentro del terremoto di magnitudo M_L 6.0. La completezza del catalogo ad oggi analizzato non consente tuttavia una definizione accurata della geometria della faglia, per arrivare alla quale saranno necessari ulteriori e più specifici studi.

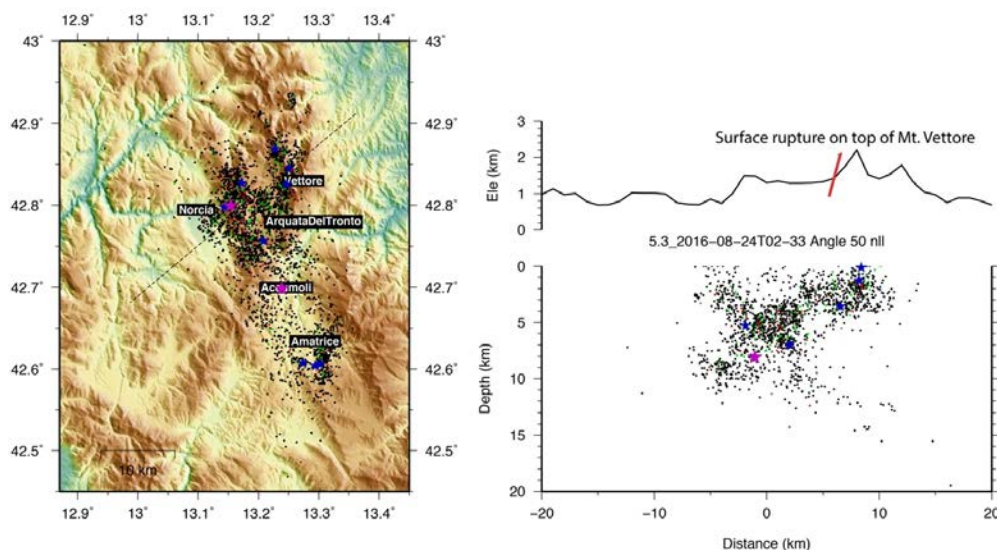


Figura 1.3-2. Mappa degli epicentri della sequenza sismica rilocalizzati e sezione lungo la linea indicata in mappa che attraversa la parte settentrionale del volume crostale interessato dalla sequenza e la replica maggiore con M_L 5.3.

La sezione in Figura 1.3-2 mostra un piano principale immergente a SW con una inclinazione di circa 40-45° la presenza di un sistema coniugato a immersione opposta. La nuvola di sismicità più superficiale ad Est, che in mappa ha un andamento N-S, e contiene 3 eventi con M₄+, probabilmente coinvolge il vecchio sovrascorrimento dei Sibillini che affiora nelle vicinanze del limite Est della sezione. Si osserva inoltre la presenza di sismicità più profonda ad Est del piano di faglia principale. La sezione è tracciata lungo il piano che attraversa l'ipocentro dell'evento di magnitudo M_L 5.3 (indicato dalla stella viola), verificatosi circa un'ora dopo il *mainshock* nella porzione settentrionale del volume crostale interessato dalla sequenza sismica, a oltre 10 km di distanza dall'epicentro del terremoto principale. La sezione è tracciata in modo tale da intersecare anche l'area (rappresentata dalla linea rossa) dove il gruppo di lavoro EMERGEO (vedi Paragrafo 2.3.1) ha mappato una serie di rotture in superficie lungo la faglia del monte Vettore.

Il ruolo del terremoto di magnitudo M_L 5.3, rispetto all'attivazione del piano di faglia principale o del coniugato visibili in questa sezione non è tuttavia chiaro.

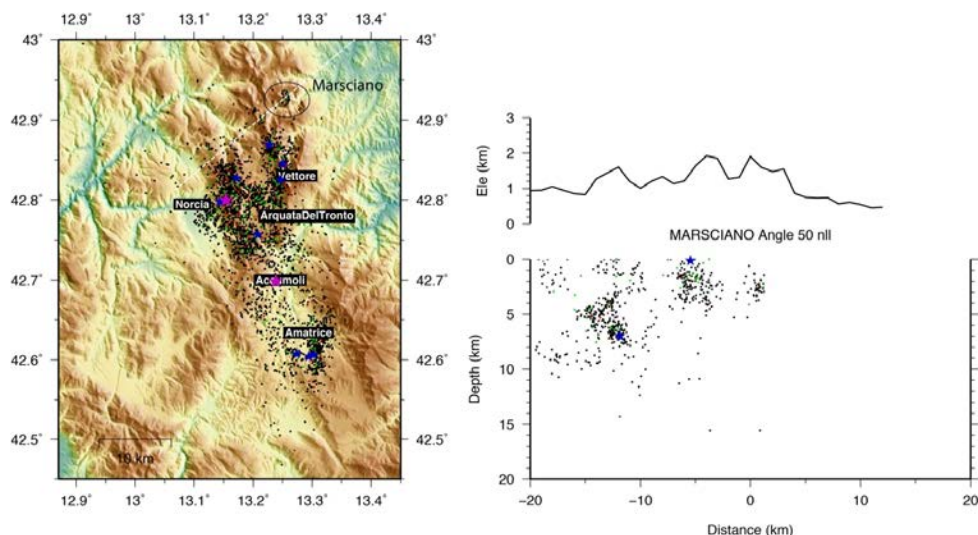


Figura 1.3-3. Mappa degli epicentri della sequenza sismica rilocalizzati e sezione lungo la linea indicata in mappa che attraversa la parte più settentrionale del volume crostale interessato dalla sequenza.

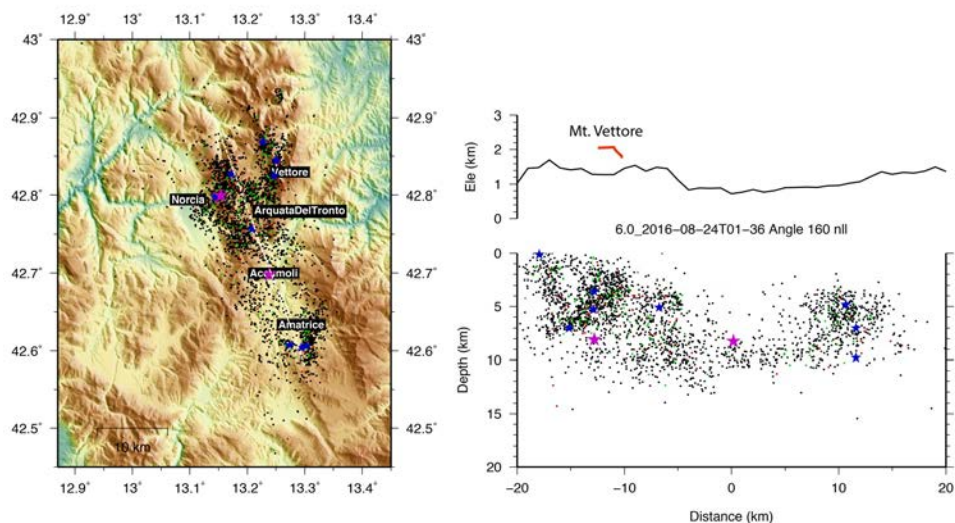


Figura 1.3-4. Mappa degli epicentri della sequenza sismica rilocalizzati e sezione longitudinale lungo la linea indicata in mappa.

La sezione in Figura 1-3-4 è stata tracciata attraverso una direzione circa parallela allo *strike* del piano di faglia dell'evento principale, per meglio rappresentare l'estensione del volume crostale interessato dalla sequenza. La sismicità occupa una porzione di crosta che si estende per circa 50 km in direzione appenninica, ed è compresa in un intervallo di profondità che va dalla superficie a circa 10-12 km. E' interessante notare come, lungo il piano della sezione, la sismicità non sia uniformemente distribuita ma si evidenzia un'area, compresa tra l'ipocentro del *mainshock* e la superficie, caratterizzata da poca sismicità. Quest'area corrisponde alla

porzione della faglia che ha subito la maggiore quantità di scorrimento durante l'occorrenza del terremoto principale, come mostrato dai risultati delle inversioni statica e cinematica.

1.4 Meccanismi focali (DOI 10.5281/zenodo.61460).

I meccanismi focali calcolati per i principali *aftershocks* della sequenza sono in generale coerenti con l'assetto tettonico dell'Appennino e consistenti con la cinematica della faglia attivatasi in occasione dell'evento principale del 24 Agosto (M_L 6.0). In Figura 1.4-1 sono rappresentati, oltre a quello del *mainshock*, i meccanismi focali degli eventi della sequenza con magnitudo M_L uguale o superiore a 4.0 (meccanismi di *aftershocks* con magnitudo M_L anche inferiore a 4.0 sono stati calcolati, e sono consultabili all'indirizzo web <http://cnt.rm.ingv.it/tdmt>). Si tratta di meccanismi focali rappresentativi di una cinematica estensionale, con asse di sforzo minimo, ossia di estensione, orientato perpendicolarmente all'asse della catena appenninica, ossia NE-SW. Ad Est della porzione più settentrionale del volume crostale interessato dalla sequenza sismica, il meccanismo focale di un evento di M_L 4.3 evidenzia una cinematica di tipo *strike-slip*, ossia trascorrente, e sempre nella stessa zona un evento con cinematica estensionale (M_L 4.2) ha i piani focali orientati in direzione NNE-SSW. Queste ultime osservazioni sembrano confermare la presenza di possibili ramificazioni e maggiori complessità geometriche nella porzione più settentrionale del sistema di faglie interessato dalla sequenza sismica in atto, come suggerito dalla distribuzione spaziale della sismicità (vedi Figura 1.3-3).

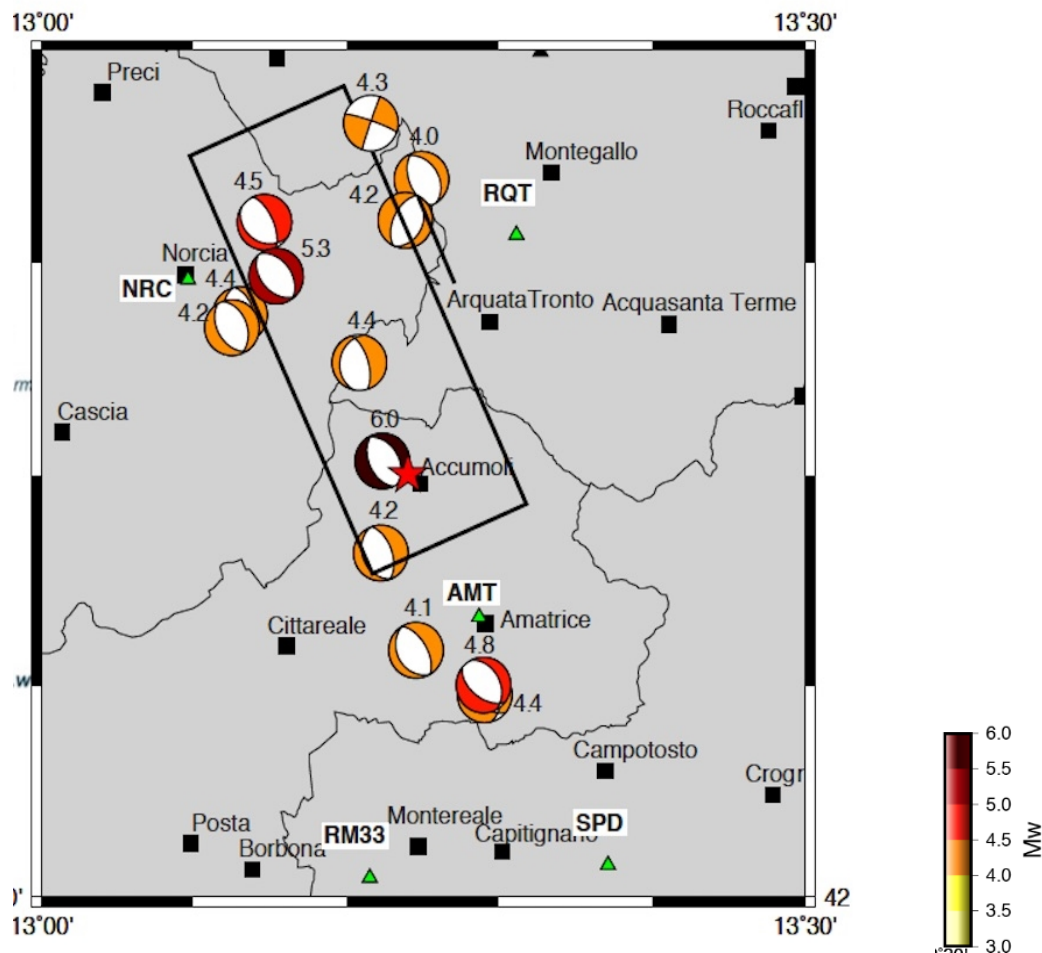


Figura 1.4-1. Meccanismi focali (<http://cnt.rm.ingv.it/tdmt>) degli eventi principali ($M_L \geq 4.0$) della sequenza (DOI 10.5281/zenodo.61460). Al medesimo link sono disponibili soluzioni anche per eventi di magnitudo inferiore. Altre soluzioni, anche per gli stessi eventi sono disponibili nel Quick Regional CMT Catalogue(<http://autorcmt.bo.ingv.it/quicks.html>).

2 Evento principale dati disponibili e analisi

2.1 Dati Strong Motion (INGV: ITACA-ESM Working Group, 1 SHAKEMAP working group.2)

Circa 200 forme d'onda accelerometriche sono state processate manualmente utilizzando la procedura di Paolucci et al. [2011], per stimare i picchi di accelerazione, velocità e spostamento generati dal mainshock, e per misurare la durata dello scuotimento nei diversi siti.

Gli accelerogrammi corretti e le informazioni relative sono disponibili nel database *Strong-Motion* dell'INGV (<http://esm.mi.ingv.it>). I dati originali sono disponibili all'indirizzo web <http://ran.protezionecivile.it/IT/index.php?evid=340867>, per quanto riguarda le stazioni della rete RAN del DPC, e in EIDA (<http://www.orfeus-eu.org/data/eida/>) per quanto riguarda le stazioni della rete INGV, che distribuisce anche i dati dell'Università di Genova, dell'Università di Trieste, di OGS, di AMRA, e di altri.

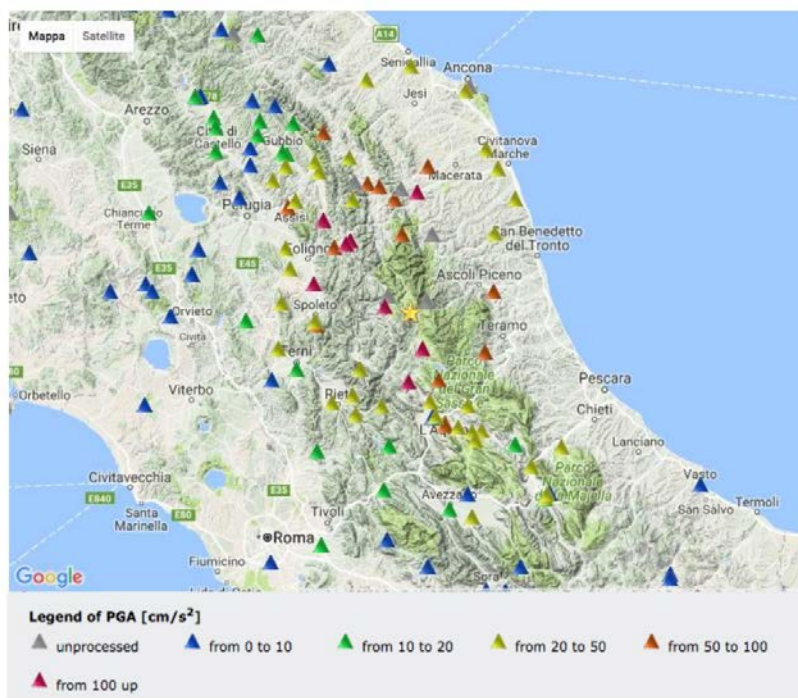


Figura 2.1-1. Sono mostrate in mappa le stazioni accelerometriche entro 200 km dall'epicentro (stella gialla). I triangoli indicano le stazioni e il loro colore corrisponde al valore di PGA (gal).

I dati accelerometrici acquisiti nei minuti immediatamente successivi all'evento principale del 24 agosto, sono stati utilizzati anche per generare le mappe di scuotimento, o *ShakeMaps*. Le *ShakeMaps* forniscono una descrizione su mappa, quindi di immediata visualizzazione, della distribuzione del livello di scuotimento (*shaking*) in una regione colpita o interessata da un terremoto. L'INGV si occupa da diversi anni del calcolo delle *ShakeMaps* per terremoti anche di moderata intensità ($M_L = 3.0$) (<http://shakemap.rm.ingv.it> ; <http://cnt.rm.ingv.it/help#impatto>).

Le *ShakeMaps* riportano i valori di picco registrati da accelerometri, principalmente forniti dalla RAN del DPC e dalla RSN dell'INGV, presenti nella regione interessata da un terremoto (Figura 2.1-1). Si tratta naturalmente di rilevazioni puntuali, relative cioè al sito di registrazione dell'accelerogramma. I valori puntuali osservati, vengono successivamente interpolati mediante un codice di calcolo che utilizza anche le leggi di attenuazione dello scuotimento in funzione della distanza disponibili per l'area, di volta in volta, in esame. In questo modo si riesce ad ottenere una rappresentazione continua del valore dello scuotimento su un'area estesa (Figura 2.1-2)

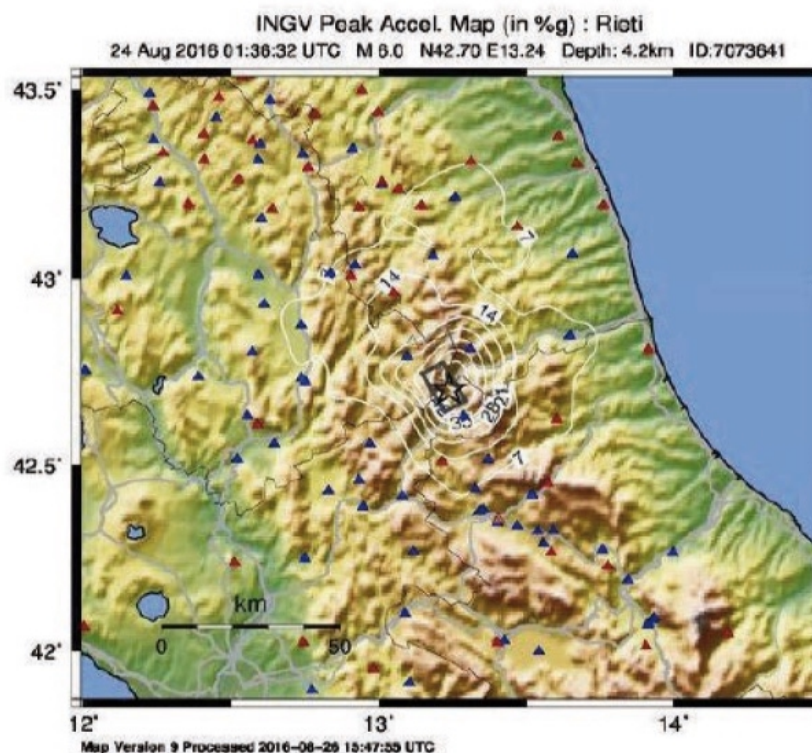


Figura 2.1-2. ShakeMap per il picco di accelerazione orizzontale dell'evento principale (<http://shakemap.rm.ingv.it/shake/7073641/intensity.html>). I valori di picco dello scuotimento sono stati osservati sia alle stazioni di Arquata del Tronto e Norcia sia ad Amatrice, suggerendo una rottura bilaterale della faglia responsabile del terremoto (ossia verso NW e verso SE).

2.1.1 Inversione dati Strong Motion (DOI 10.5281/zenodo.61460)

Informazioni di dettaglio sulla cinematica della sorgente del terremoto del 24 Agosto (M_L 6.0) sono state ottenute dall'inversione dei dati accelerometrici. Sono stati utilizzati dati acquisiti a 24 stazioni situate ad una distanza inferiore a 42 km dall'epicentro del sisma (triangoli verdi nella mappa di Figura 2.1-1). Il metodo utilizzato è il “*non-negative least-squares inversion* [Dreger and Kaverina, 2000]. Gli accelerogrammi sono integrati nel tempo e filtrati nella banda di

frequenza tra 0.02 e 0.5 Hz. Le funzioni di Green's sono calcolate utilizzando il modello di velocità CIA [Hermann et al., 2011]. Gli accelerogrammi utilizzati, e il relativo fit prodotto dal processo di inversione sono mostrati in Figura 2.1-1.

Il risultato dell'inversione ci fornisce varie informazioni sul processo di rottura: sono presenti due aree di rottura principali (aree giallo-rosse nel modello in basso a sinistra in Fig. 2.1-1), poste rispettivamente al di sopra (lungo la direzione di inclinazione della faglia) e a NW del punto di nucleazione; il *rise time* varia tra 0.6 s e 2 s; la velocità di rottura è compresa tra 2 e 3.5 km/s; il *rake* (direzione di movimento sul piano di faglia) è eterogeneo nelle differenti porzioni della faglia e varia tra -65° and -105° (freccette azzurre nel modello in basso a sinistra in Figura 2.1-1). La durata della rottura è stata di circa 8 s.

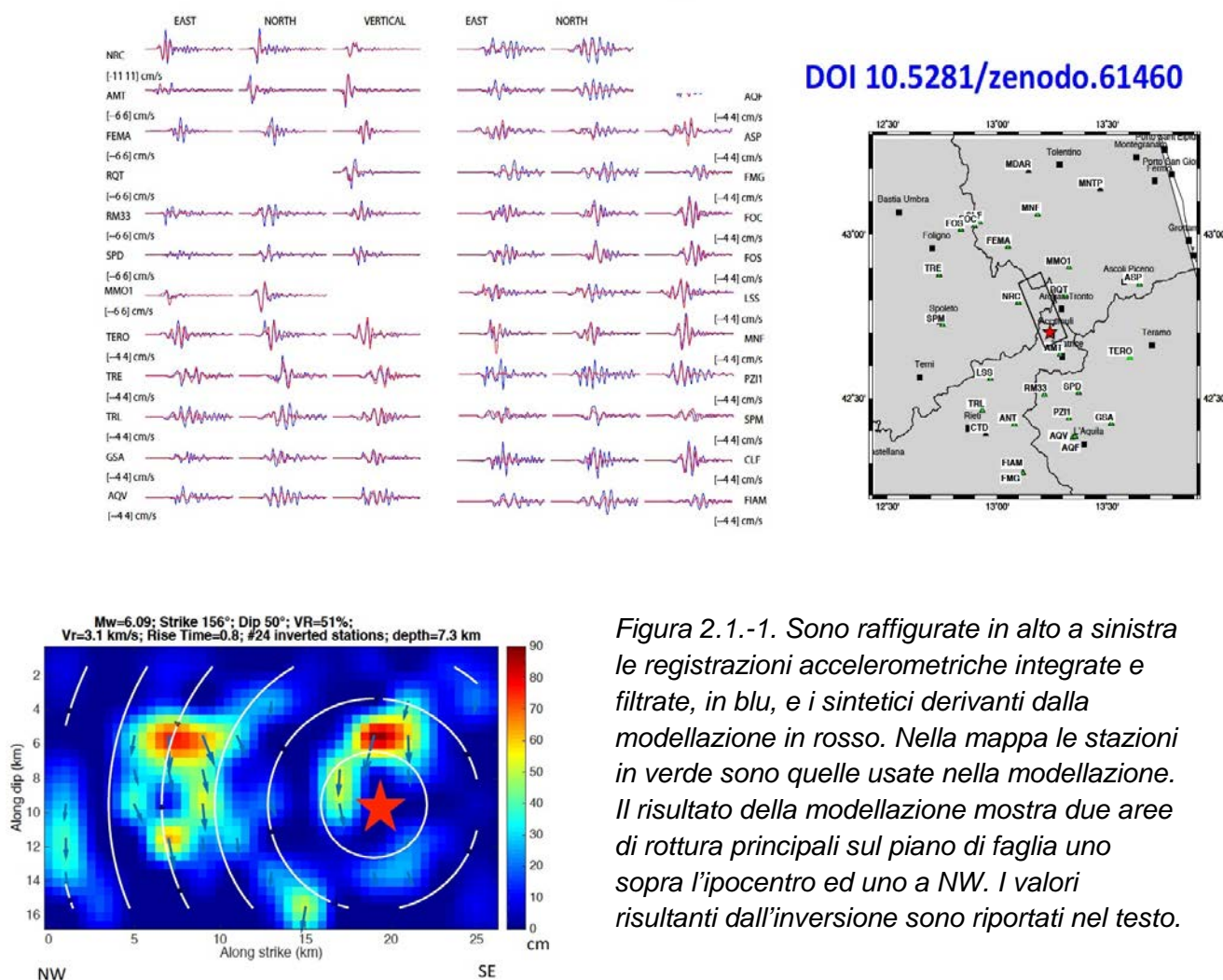


Figura 2.1.-1. Sono raffigurate in alto a sinistra le registrazioni accelerometriche integrate e filtrate, in blu, e i sintetici derivanti dalla modellazione in rosso. Nella mappa le stazioni in verde sono quelle usate nella modellazione. Il risultato della modellazione mostra due aree di rottura principali sul piano di faglia uno sopra l'ipocentro ed uno a NW. I valori risultanti dall'inversione sono riportati nel testo.

2.2 Geodesia

2.2.1 Dati GPS (INGV Working group "GPS Geodesy (GPS data and data analysis center)" DOI 10.5281/zenodo.61355)

La deformazione permanente della crosta terrestre causata dal terremoto del 24 agosto è stata misurata dalle stazioni GPS collocate in Italia centrale. Tali stazioni appartengono alla Rete Integrata Nazionale GPS (RING) dell'INGV, all'ISPRA e al DPC (Figura 2.2-1). Sono inoltre presenti capisaldi di reti GPS non permanenti, come la CA-GeoNet dell'INGV e l'IGM95 (Figura 2.2-1). Altri dati GPS sono stati forniti dalle reti GNSS della Regione Abruzzo, Regione Lazio, ItalPos, NetGeo, Regione Umbria, ASI ed Euref. Gli spostamenti del suolo registrati a ciascuna delle stazioni sono stati analizzati dai ricercatori dell'INGV mediante processamento dei dati con differenti *software* scientifici (in particolare Bernese, Gamit e Gipsy) e successivamente combinati per fornire un unico risultato finale. Tali spostamenti sono calcolati come differenza tra le posizioni giornaliere delle stazioni nei giorni precedenti e successivi al terremoto. In questo modo sono stati ottenuti gli spostamenti massimi registrati nelle singole stazioni, compresa quella posta ad Amatrice che è la più vicina all'epicentro della scossa del 24 agosto, con un errore massimo di pochi millimetri. Lo spostamento più significativo è stato osservato ad Amatrice (stazione AMAT), che si è mossa verso NW di 2.5 cm ed abbassata di 1.5 cm. Le stazioni di rilevamento situate a Norcia (NRCI) e Leonessa (LNSS) hanno registrato uno spostamento rispettivamente di 2.4 cm e 2.3 cm verso SW mentre Ascoli (ASCC) si è mossa verso NE di 1.4 cm.

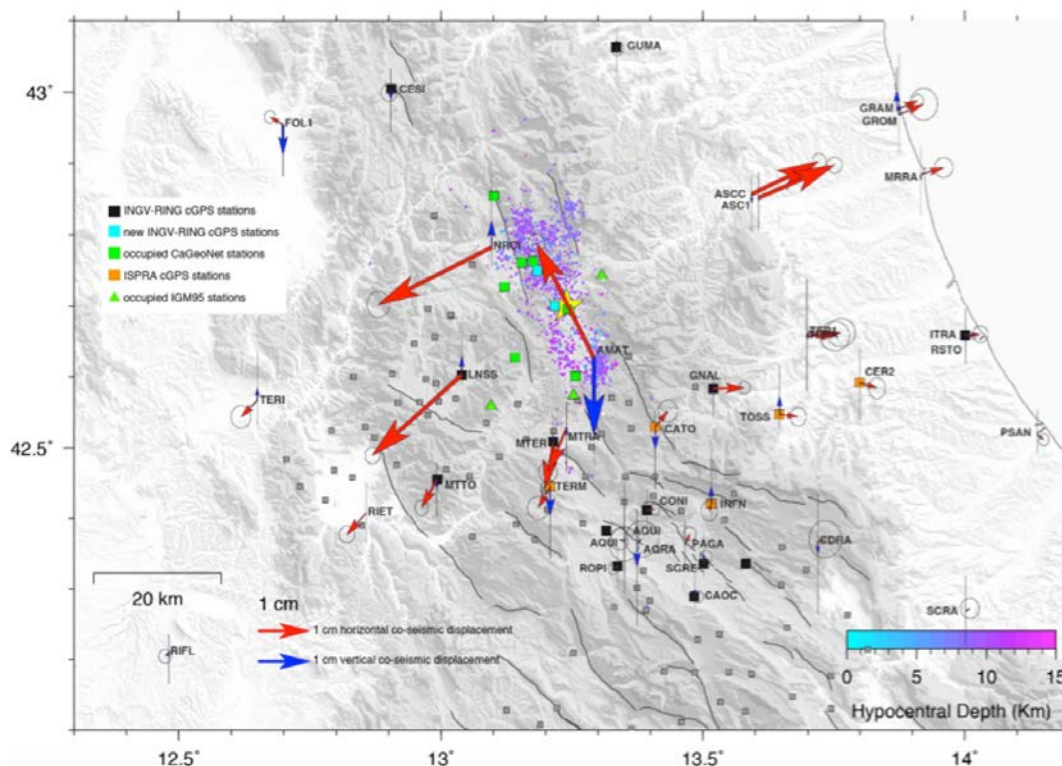
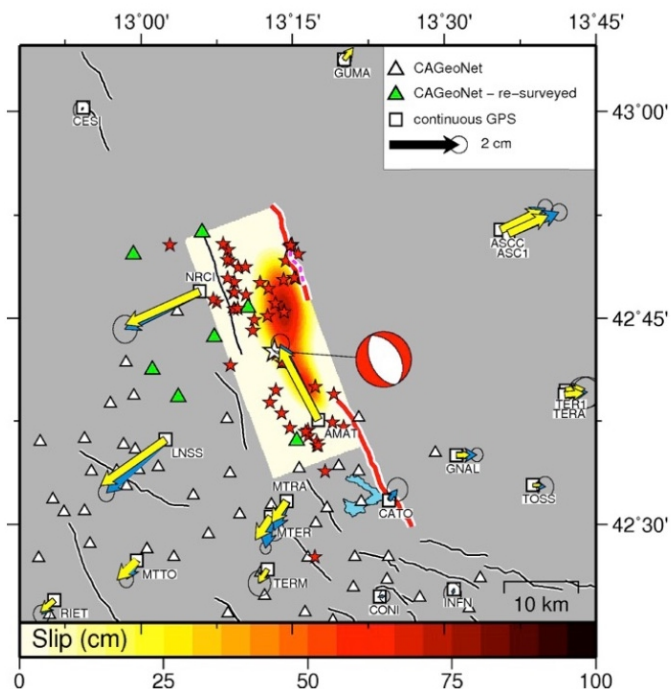


Figura 2.2-1. Spostamenti cosismici orizzontali (frecce rosse) e verticali (frecce blu) rilevati dalla rete di stazioni GPS permanenti (quadrati neri e azzurri: stazioni RING-INGV; quadrati arancioni: stazioni ISPRA e Dipartimento della Protezione Civile) e da caposaldi di reti non permanenti (quadrati grigi: caposaldi CA-GeoNet presenti in zona; quadrati verdi: caposaldi CA-GeoNet in via misurazione; triangoli verdi: caposaldi rete IGM95). Altri dati GPS sono stati forniti dalle seguenti reti GNSS: Regione Abruzzo, Regione Lazio, ItalPos, NetGeo, Regione Umbria, ASI ed Euref. La stella gialla indica l'epicentro del terremoto di magnitudo M6.0, del 24 agosto 2016 alle 03:36.

2.2.2 Inversione dati GPS (GPS working group doi:10.5281/zenodo.61690)

Le analisi preliminari basate sulle sole stazioni GPS attive al momento del terremoto mostrano che questo è stato generato da una faglia lunga oltre 18 km e inclinata di circa 50 gradi, che corre con direzione NNW-SSE e che si immerge verso Ovest al di sotto dell'Appennino (figura 2.2-2). La porzione della faglia interessata dai maggiori valori di slip (70 cm) si trova a Nord dell'ipocentro (Figura 2.2-2). Il movimento di questa faglia ha causato un'estensione della catena appenninica di circa 3-4 centimetri tra il Tirreno e l'Adriatico.



- Fault parameters:
- Length = 20.4 km
- Width = 5.0 km
- Depth = 2.8 km
- Strike = 161.5 gradi
- Dip = 45.6 gradi
- Slip = 0.70 metri
- Rake = -78° gradi
- Mw = 6.18

Figura 2.2-2. Modello di sorgente ricavato dalla inversione dei dati GPS.

2.2.3 High rate GPS

Le registrazioni GPS ad alta frequenza (da 1 a 10 Hz) disponibili per alcune stazioni, mostrano chiaramente il passaggio delle onde sismiche e il conseguente movimento dinamico del suolo (Figura 2.2-3).

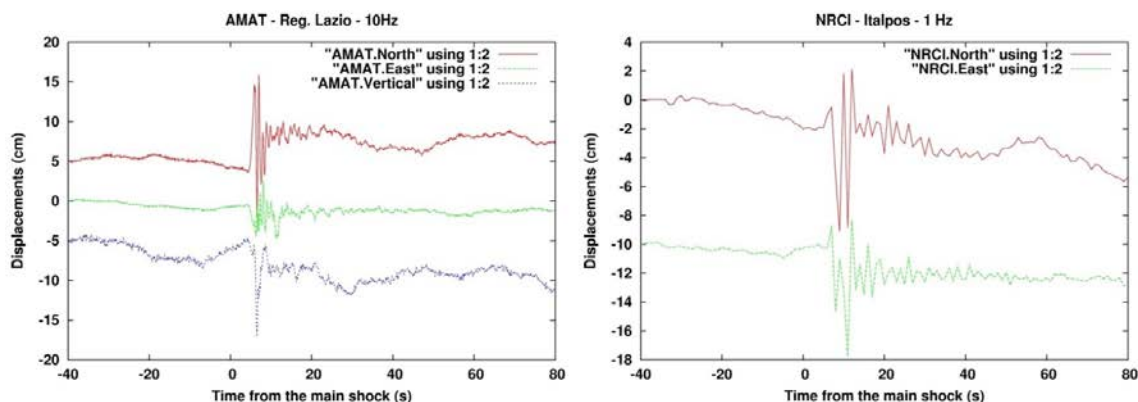


Figura 2.2-3. Registrazione dello spostamento del suolo alla stazione AMAT di Amatrice. I valori picco-picco raggiungono i 15 cm di spostamento sulla componente Nord e 10 cm sulla verticale; anche alla stazione NRCI di Norcia lo spostamento picco-picco è di 15 cm in direzione SW.

2.2.4 SAR e modellazione congiunta con dati CGPS (Gruppo di lavoro IREA-CNR & INGV, 2016, DOI: 10.5281/zenodo.61682)

Deformazioni co-sismiche

I risultati ottenuti confermano l'abbassamento del suolo dalla caratteristica forma a “cucchiaio” che si estende per circa 20 Km in direzione NNW, già osservato nelle preliminari analisi interferometriche (Figura 2.2-4). Il valore massimo dello spostamento del suolo verticale è di circa 20 cm in corrispondenza dell'area di Accumoli. La componente Est dello spostamento co-sismico è caratterizzata dalla presenza di quattro aree alternate di spostamento, con valori massimi di deformazione di circa 16 cm verso Ovest (Figura 2.2-4). Dall'analisi delle mappe di spostamento è stato anche possibile ricavare informazioni più di dettaglio su alcuni effetti molto localizzati, probabilmente legati a fenomeni di instabilità di versante.

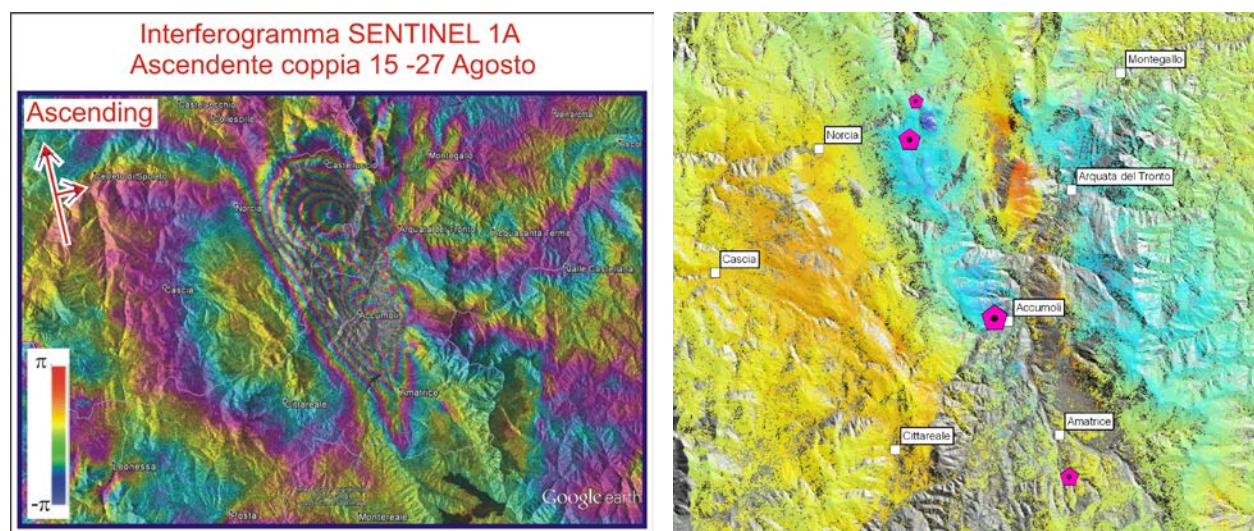


Figura 2.2-4. Sinistra: uno degli interferogrammi Sentinel1-A utilizzati nella modellazione della sorgente con dati SAR e CGPS. Destra: andamento della componente Est ricostruita con vari dati InSAR.

Modellazione dati SAR-CGPS

Rispetto al primo rapporto (Gruppo di lavoro IREA-CNR & INGV, 2016 DOI: 10.5281/zenodo.60938) il numero di datasets geodetici utilizzato nella modellazione è aumentato da 1 a 7: 6 dataset SAR da 4 satelliti diversi, e un dataset GPS. I risultati della inversione sono pertanto ben vincolati. I modelli presentati non hanno utilizzato vincoli forniti da dati sismologici o geologici ma sono comunque in ottimo accordo con essi.

Sono stati invertiti un totale di circa 19500 valori di spostamento del suolo in varie linee di vista SAR e 107 valori di spostamento provenienti da stazioni CGPS, (INGV Working group "GPS Geodesy", 2016. DOI 10.5281/zenodo.61355). Per la modellazione è stata utilizzata la seguente procedura: i dati di spostamento del suolo ricavati dallo srotolamento degli interferogrammi sono

stati georiferiti e ricampionati su griglia a passo variabile. I dataset sono stati quindi modellati tramite un modello di dislocazione di tipo analitico (basato su Okada, 1985), in cui i parametri della faglia sono stati stimati tramite un algoritmo di inversione non lineare (nessun parametro è stato vincolato a priori). La geometria della sorgente ed il *rake* così ricavati, sono stati tenuti fissi nella successiva inversione lineare, con cui è stata stimata la distribuzione di slip sul piano di faglia. E' stato utilizzato un vincolo di positività (*Non-Negative Least Square*). Analogamente a quanto indicato nel primo report, sono state eseguite inversioni distinte per una singola sorgente e per due sorgenti (Tabella 2 e Figure 2.2-5 e 2.2-6). Nel seguito in tabella vengono mostrati i risultati dell'inversione lineare.

La Tabella 2 mostra i parametri delle sorgenti modellate.

Modello	Mw osservata	Magnitudo geodetica	Lunghezza	Larghezza massima	Profondità del tetto	Strike	Dip	Rake	Slip max	RMS medio
Singola faglia	6.0 (+ 5.3)	6.2	~21 km	~9 km	~1500 m	164°	46°	-73°	120 cm	1.4 cm
Doppia faglia - Nord	6.0 (+ 5.3)	6.2	~8 km	~8 km	~3000 m	175°	39°	-65°	140 cm	1.4 cm
Doppia faglia - Sud			~12 km	~5 km	~2500 m	165°	51°	-70°	130 cm	

Nota: i valori indicati di lunghezza, larghezza e profondità sono relativi alle aree di maggiore slip

I due modelli sono molto simili e il loro fit con i dati è praticamente identico (Tabella 2). E' possibile tentare di attribuire la rottura a piani di faglia visibili in superficie, prolungando i piani dei modelli fino ad intersecare la topografia (Figure 2.2-5 e 2.2-6). La traccia superficiale del modello a singola faglia corre parallela e quasi coincidente (entro ± 800 m) con la traccia del sistema di faglie Gorzano-Laga-Vettore (Figura 2.2-5). Nel modello a due faglie andamento identico si nota per la faglia Sud, mentre la traccia della faglia Nord ruota verso NE e dovrebbe emergere circa 3 km ad Est del M. Vettore (Figura 2.2-6).

Entrambi i modelli sono compatibili con gli andamenti degli *aftershocks*, nei limiti delle incertezze, con un leggero miglior accordo nella parte Nord del modello a due faglie rispetto alla faglia singola. In Tabella 2 è riportata la dimensione della rottura ricavabile dai valori di slip per i due modelli. In entrambi i modelli, andando verso Sud dall'ipocentro, la rottura si ferma poco prima di Amatrice, mentre verso Nord i valori di slip del modello a doppia faglia vanno a zero circa a metà della Piana di Castelluccio (o poco più a Nord per la faglia singola). Le due maggiori concentrazioni di slip sono localizzate a profondità intorno a 6 km nella parte Nord, e 4 km a Sud. A seconda dei modelli, i valori di slip sono circa uguali a zero a profondità minori di 1.5-3 km (a Nord) o 700 m (a Sud). Nelle parti più superficiali delle faglie vengono modellati in maniera discontinua valori di slip intorno a pochi cm.

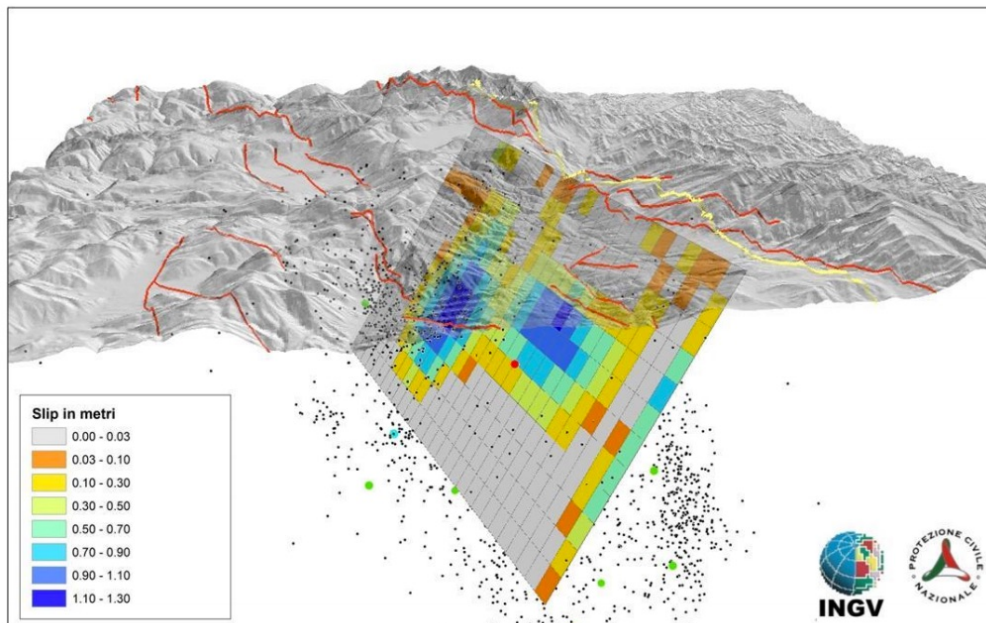


Figura 2.2-5. - Rappresentazione 3D del modello di slip a una faglia. La linea gialla rappresenta l'intersezione del piano del modello con la superficie. Le linee rosse sono tracce di faglie dalla bibliografia geologica. Il simbolo rosso è il mainshock, i simboli verdi sono gli altri eventi maggiori fino al 29/8.

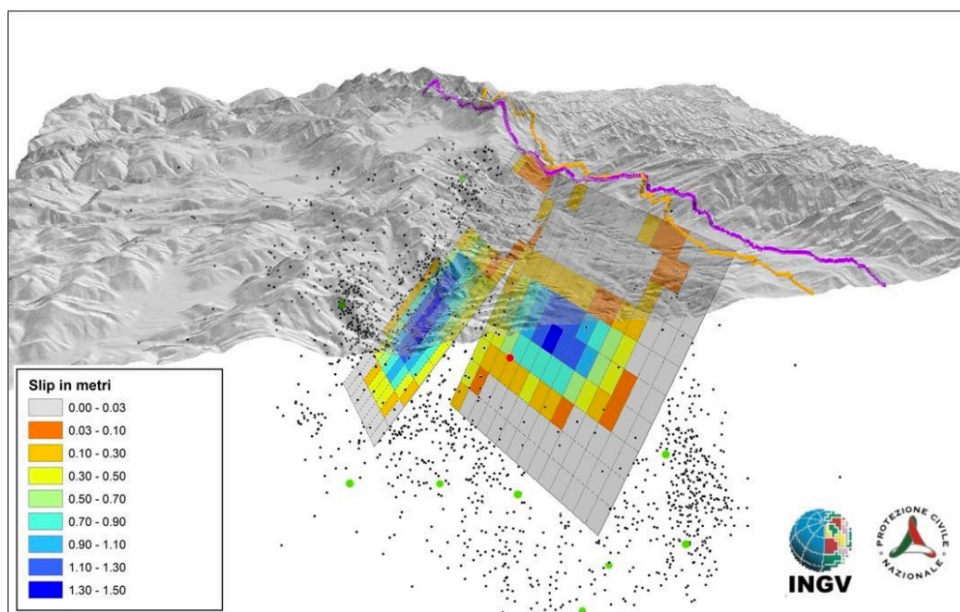


Figura 2.2-6. - Rappresentazione 3D del modello di slip a due faglie. La linea arancione rappresenta l'intersezione della faglia Nord con la superficie; la linea viola è l'intersezione della faglia Sud. Il simbolo rosso è il mainshock, i simboli verdi sono gli altri eventi maggiori fino al 29/8.

I piani di dislocazione ricavati nei due modelli sono ovviamente approssimazioni di faglie con geometria verosimilmente più complessa, ed è lecito attendersi superfici reali con variazioni, continue o meno, di *strike*, *dip* e *rake*. Non appena saranno disponibili gli andamenti finali della sismicità rilocalizzata sarà possibile tentare di vincolare meglio le geometrie profonde delle sorgenti. I primi confronti indicano che *dip* e *strike* delle sorgenti geodetiche sono molto simili a quelli dei meccanismi focali e degli allineamenti di ipocentri, anche se per questi ultimi l'attuale imprecisione della localizzazione (si tratta di localizzazioni relative, con un modello di velocità ancora migliorabile) non consente un confronto definitivo. Pertanto le eventuali piccole differenze tra la proiezione dei piani risultanti dalle inversioni geodetiche e gli allineamenti degli *aftershocks* sono assolutamente all'interno delle incertezze di entrambi i risultati.

Un'altra considerazione importante è che i vari allineamenti più o meno planari di *aftershocks* possono essere riconducibili a faglie minori o comunque riattivate dalle variazioni di stress locali, e non sono necessariamente rappresentative della faglia su cui è avvenuta la rottura principale.

2.3 Geologia

2.3.1 Rotture superficiali (EMERGEIO Working Group)

A partire dalla mattina del 24 agosto, le squadre di geologi di EMERGEIO, uno dei gruppi operativi di emergenza sismica dell'INGV, si sono attivate per effettuare le prime indagini sugli effetti del terremoto sul territorio. Le squadre dei rilevatori stanno investigando l'area epicentrale per una estensione totale di circa 40 km tra Castelluccio di Norcia, a Nord, e la Località Ortolano posta a sud del Lago artificiale di Campotosto. Al momento, sono state catalogate informazioni geologiche su oltre 3000 punti di osservazione (figura 2.3-1). In generale, nell'intera area investigata sono state segnalate numerose fratture lungo i versanti montuosi e i campi coltivati (questi elementi deformativi risultano spesso ben visibili sul manto stradale), insieme a frane, scoscendimenti e crolli di massi, di piccole-medie dimensioni.

Nel settore settentrionale della zona epicentrale è stata rilevata una zona di fratturazione superficiale continua che si estende per circa 5.2 km lungo il fianco sudoccidentale del Monte Vettore. Le caratteristiche geometriche degli elementi deformativi osservati sono descritte sinteticamente nella figura 2.3-2.

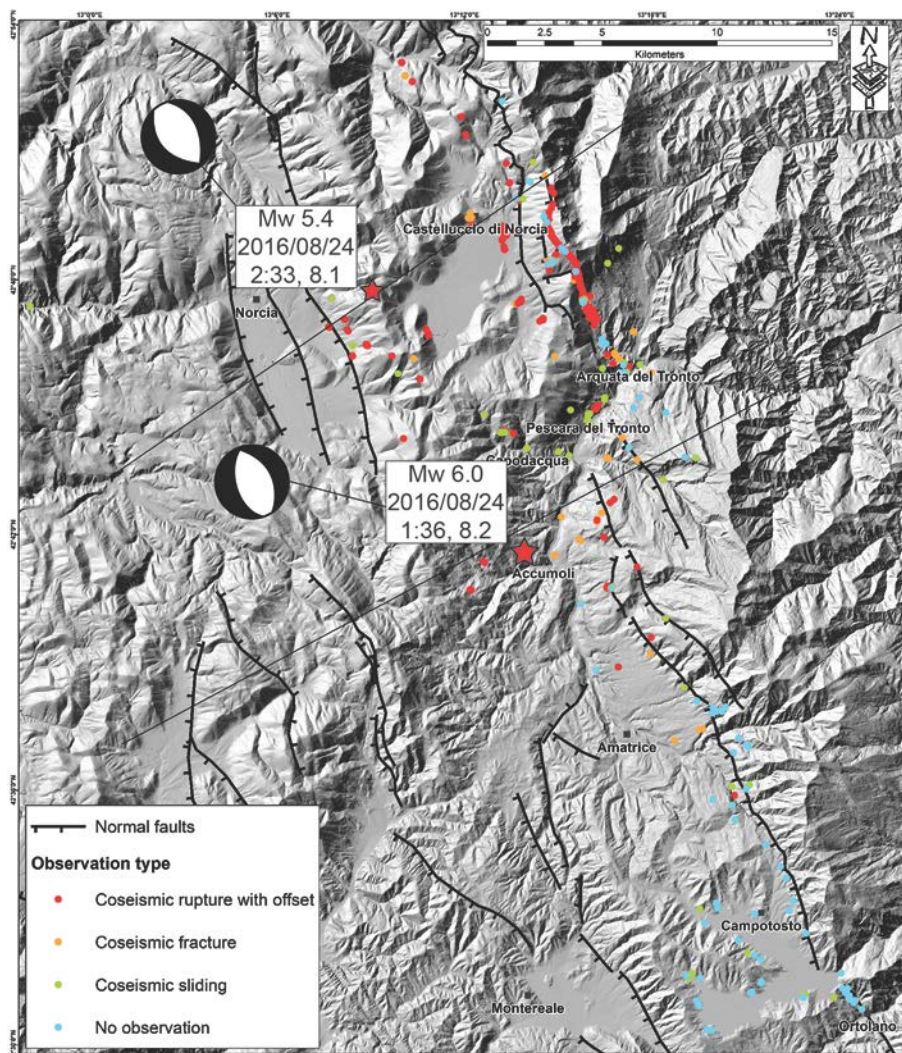


Figura 2.3-1. Mappa della distribuzione dei circa 3000 punti di osservazione; le faglie sono modificate dalla Mappa Geologica d'Italia scala 1:100.000 (Fogli F132 Norcia e F139 L'Aquila - ISPRA) e da Centamore et al. (1992); la localizzazione dell'evento principale è fornita da AMA_LOC Working Group – DOI: 10.5281/zenodo.61404. Sono state differenziate le rotture cosismiche con rigetto (in rosso), le fratture cosismiche (in arancione), le frane/scoscendimenti cosismici (in verde), l'assenza di deformazioni cosismiche (in celeste). In nero anche le tracce delle sezioni geologiche di figura 2.3-3.

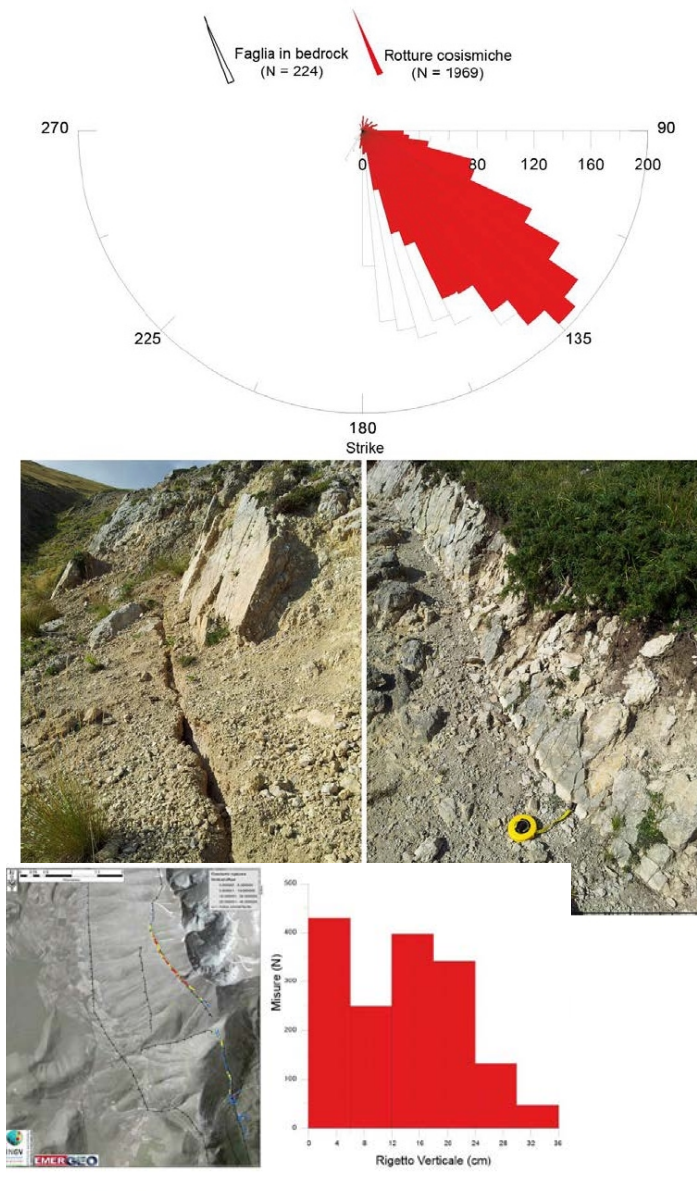


Figura 2.3-2. Sopra, diagramma a rosa delle direzioni delle rotture cosismiche sui depositi non consolidati (in rosso) e lungo il piano di faglia in roccia del Monte Vettore e del Monte Vettoreto; vedi foto delle fratture.

Sotto, due diagrammi con i rigetti verticali e orizzontali e le rispettive mappe dei rigetti verticali (a sinistra) e orizzontali (a destra) osservati lungo la faglia del Monte Vettore e del Monte Vettoreto.

2.3.2 Confronto con le conoscenze geologiche

La sequenza sismica in atto, che ha preso origine dal terremoto del 24 agosto, interessa un'area dell'appennino centrale i cui elementi strutturali superficiali sono ben noti. Nella Figura 2.3-3, le sezioni geologiche esistenti per l'area in questione sono messe a confronto con la distribuzione della sismicità in profondità, lungo le medesime tracce di sezione. E' interessante notare come la sismicità illumini in profondità dei lineamenti che appaiono essere in continuità con i lineamenti tettonici rilevati in superficie, consentendo quasi di tracciarne la prosecuzione in profondità. Tra questi appare interessante la parte di sismicità più superficiale nel settore orientale che sembra illuminare il sovrascorrimento dei Sibillini Tali considerazioni sono tuttavia del tutto preliminari e necessitano il conforto di più approfondite analisi.

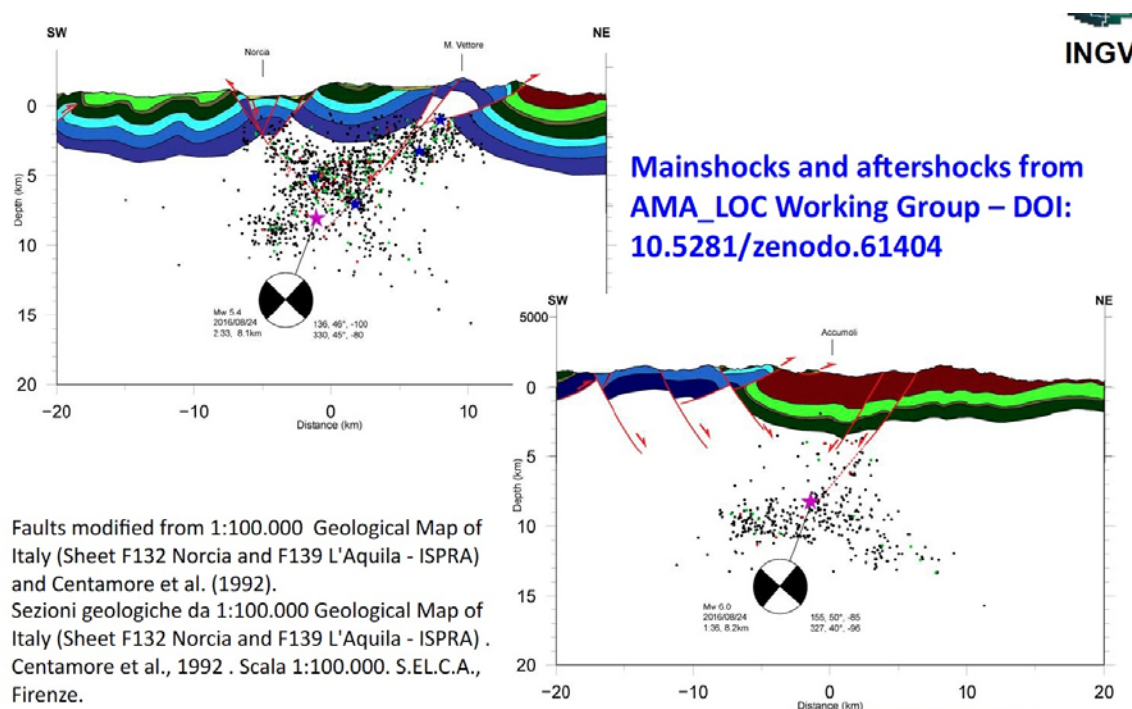


Figura 2.3-3. Sezioni geologiche modificate dalla carta geologica Italiana, le localizzazioni ipocentrali vengono da AMA_LOC Working Group – DOI: 10.5281/zenodo.61404.

2.4 Macrosismica

2.4.1 Rilievo macrosismico (da Rapporto sugli effetti macrosismici del terremoto del 24 Agosto 2016 di Amatrice in scala MCS. di P. Galli¹, E. Peronace² e A. Tertulliani³; Coordinamento del rilievo macrosismico MCS a cura di P. Galli¹ e A. Tertulliani³)
(1 Dipartimento Protezione Civile; 2 CNR-IGAG; 3 INGV-QUEST)

A seguito del forte terremoto occorso alle 3:36 della notte del 24 Agosto al confine tra le Regioni Lazio, Abruzzo, Marche ed Umbria (MI 6.0; area di Amatrice, RI), seguito poco dopo dalla forte replica in area nursina (MI 5.3), le squadre di rilievo macrosismico del DPC, CNR-IGAG e INGV sono partite alla volta dell'area epicentrale. Le diverse squadre hanno raggiunto l'area mesosismica da più direzioni, ovvero da NE nell'area di Norcia, da Nord nell'area di Arquata e da Sud da Antrodoco.

Le stesse hanno intrapreso il rilievo frazione per frazione, talvolta anche nelle stesse località ed in tempi diversi, al fine di confrontare e tarare le osservazioni macrosismiche. Le squadre si sono quindi incontrate più volte sul campo per scambiarsi dati, impressioni e pareri. In remoto hanno operato altri colleghi che raccoglievano notizie e segnalazioni, comunicandole alle squadre.

E' opportuno ricordare che il rilievo macrosismico in scala MCS in fase di emergenza è di carattere speditivo, ed ha l'obiettivo precipuo di definire al meglio la distribuzione del danneggiamento medio-grave nell'immediato (2 giorni) e - più in generale - di fornire i limiti dell'area di danno in un tempo ragionevolmente breve (15 giorni) e con un criterio omogeneo e di immediata applicazione, quale quello fornito dalla scala MCS. In particolare, il rilievo viene eseguito utilizzando le percentuali di danneggiamento della scala MCS (1930) quantificate da Molin (2009) in progressione crescente per i gradi di intensità $\geq V$ MCS e secondo i cinque livelli di danno previsti dalla scala originaria.

D'altro canto, l'applicazione della scala macrosismica europea EMS (Grünthal, 1998), presentando difficoltà collegate alla suddivisione degli edifici di un centro abitato secondo le classi di vulnerabilità proposte dalla scala stessa, è inapplicabile in fase di emergenza. Anche in occasione del terremoto de L'Aquila 2009, non è risultato possibile assegnare con sicurezza e con la rapidità generalmente richiesta dai rilievi macrosismici in emergenza la classe di vulnerabilità agli edifici, se non a seguito di sopralluoghi prolungati nei mesi successivi (p.e., Molin et al., 2010).

Dal presente rapporto sono al momento escluse le informazioni di effetti di risentimento che non siano stati direttamente verificati dalle squadre.

Alle ore 20 del 15 Settembre sono state rilevate direttamente un totale di 283 località distribuite in 76 comuni. Nella figura 2.4-1. sono mostrate in mappa le intensità attribuite.

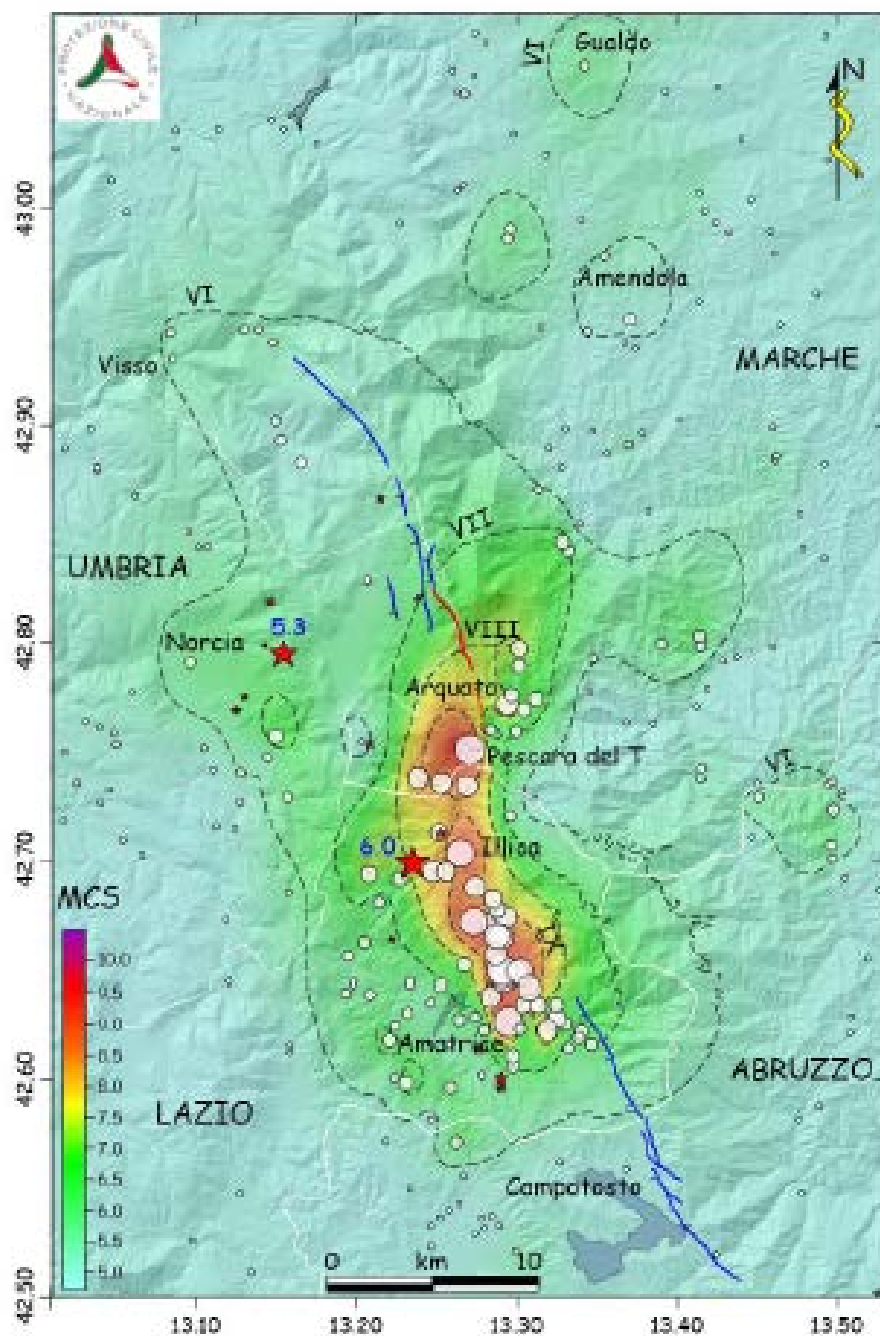


Figura 2.4-1. Distribuzione delle intensità rilevate per località in termini di scala macrosismica MCS (cerchi bianchi proporzionali alla intensità di sito). Isosisme dal VI al IX MCS a tratteggio nero. Stelle rosse, eventi con $M > 4$ (INGV). Le campiture colorate indicano approssimativamente la distribuzione areale dell'intensità. Sullo sfondo DTM a 20 metri. Le linee blu sono le faglie del Vettore a nord e della Laga a sud. In rosso la rottura superficiale del 2016.

Si riporta anche la mappa relativa ad “Hai sentito il terremoto”

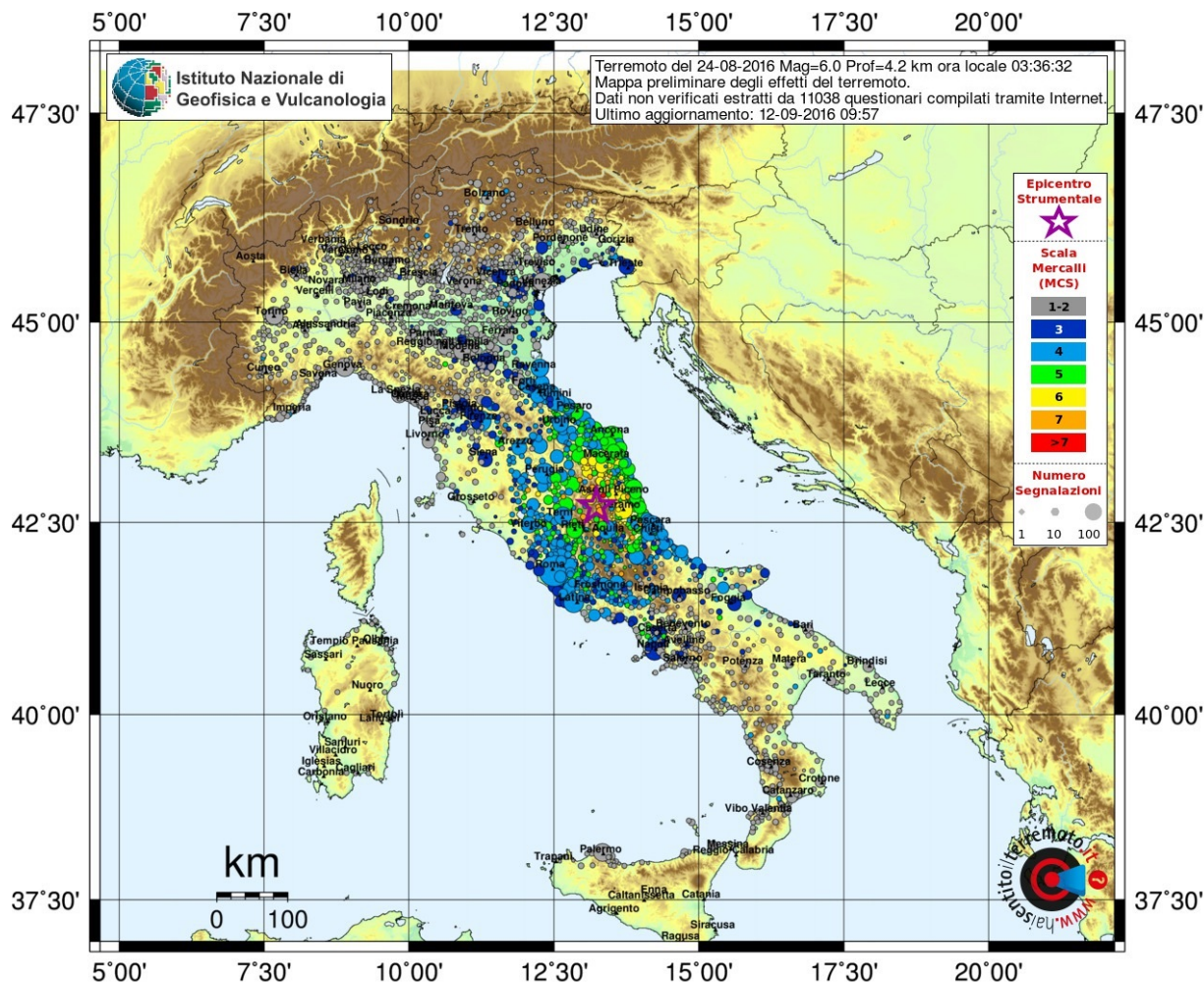


Figura 2.4-2. La mappa del risentimento sismico in scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) mostra la distribuzione degli effetti del terremoto sul territorio ricostruita in base alle migliaia di segnalazioni della popolazione attraverso un questionario via WEB. La mappa contiene una legenda (sulla destra). Con la stella in colore viola viene indicato l'epicentro strumentale del terremoto, i cerchi colorati si riferiscono alle intensità associate ad ogni comune. Nella didascalia in alto sono indicate le caratteristiche del terremoto: data, magnitudo (M_L) profondità (Prof) e ora locale. Viene inoltre indicato il numero dei questionari elaborati per ottenere la mappa stessa.

3 Quadro interpretativo

Nelle tre settimane trascorse dal terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016, sono state effettuate numerose campagne per l'acquisizione di differenti tipi di dati e sono state installate dense reti di monitoraggio: sismiche, geodetiche e, più in generale, per la rilevazione di diversi parametri geofisici. La sala di monitoraggio sismico ha beneficiato di dati supplementari trasmessi in tempo reale dalle nuove stazioni sismiche installate nella regione interessata dalla sequenza sismica. L'utilizzo di tali dati consente un miglioramento nella definizione dei parametri ipocentrali dei terremoti. Le numerose osservazioni raccolte (osservazioni sismologiche, geodetiche e geologiche) nell'area interessata dalla sequenza sismica di Amatrice e il progressivo avanzamento dello stato delle conoscenze scientifiche sui processi sismogenetici hanno permesso di elaborare un secondo quadro interpretativo preliminare.

L'evento principale di M_L 6.0 del 24 agosto è stato causato dallo scorrimento di una faglia distensiva avente strike $\approx 156^\circ$ e dip $\approx 50^\circ$ verso SW. La lunghezza della faglia è di circa 20-25 km. A partire dal punto di nucleazione del terremoto, la rottura della faglia è stata bilaterale (verso NW e verso SE) con concentrazione dello slip in due aree distinte del piano di faglia e la durata della rottura è stata di circa 6 s.

Elementi deformativi assimilabili a "rotture superficiali" sono stati rilevati e mappati lungo la faglia nota del monte Vettore. Una discussione scientifica è in atto per discriminare la natura di tali rotture, se siano cioè diretta espressione in superficie della faglia responsabile del terremoto del 24 agosto, o, alternativamente, siano degli elementi deformativi secondari.

Quanto le strutture geologiche preesistenti, ereditate da precedenti regimi tettonici compressivi, possano aver influenzato le geometrie del sistema di faglia attivatosi sarà oggetto di studio nei prossimi mesi, anche se, come evidenziato nella sezione **2.3.2 Confronto con le conoscenze geologiche**, i primi raffronti offrono interessanti spunti interpretativi.

Il confronto tra osservazioni e risultati relativi a diversi tipi di dati e di analisi consente una più accurata descrizione dei diversi aspetti del fenomeno sismico.

Ad esempio, sovrapponendo le localizzazioni ipocentrali osservate nel paragrafo **1.3 Geometria faglie dalle localizzazioni ipocentrali (AMA_LOC Working Group – DOI: 10.5281/zenodo.61404)** al modello di sorgente derivato dai dati accelerometrici mostrato in **2.1.1 Inversione dati Strong Motion (DOI 10.5281/zenodo.61460)**, si nota come le aree della faglia caratterizzate dai maggiori valori di slip siano quelle meno popolate dagli *aftershocks* della sequenza sismica (in particolare questo è vero per la patch di maggior slip più meridionale, vedi Figura 3-1, pannello a sinistra). Si nota anche come gli *aftershocks* di magnitudo più elevata ($M_L > 3.0$) tendano a concentrarsi lungo i bordi delle aree di maggior slip (Figura 3-1, pannello a destra).

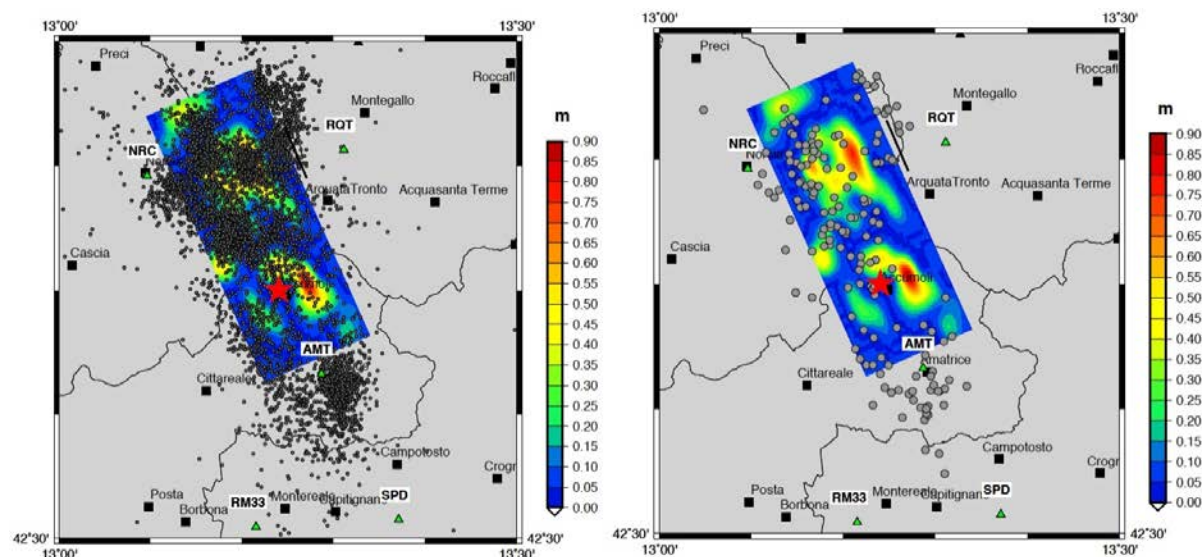


Figura 3-1. Confronto tra la distribuzione degli aftershock e la distribuzione di slip sul piano di faglia principale. Il modello di sorgente riportato in figura è quello derivante dall'inversione dei dati accelerometrici (doi 105281/zenodo.61460) le localizzazioni degli aftershocks sono mostrate a sinistra tutte, a destra solo quelle con magnitudo superiore a 3.

La presenza di reti di monitoraggio dense è fondamentale al fine di monitorare l'evoluzione della sequenza.

L'evoluzione spazio temporale della sequenza ha attivato a Nord e a Sud segmenti di faglie adiacenti a quello modellato; in particolare, l'andamento delle repliche mostra l'attivazione del segmento di faglia del Monte Vettore e di diverse strutture antitetiche immergenti verso NE; è stata attivata anche la porzione settentrionale della faglia del monte Gorzano che era stata interessata nella sua porzione meridionale dagli aftershock del terremoto del 2009 a L'Aquila.

E' necessario considerare l'eventualità che su queste faglie adiacenti si generino terremoti che potrebbero procurare ulteriori danneggiamenti.

Per capire meglio come l'accadimento del terremoto del 24 agosto abbia modificato il campo di stress locale il modello derivato dai dati geodetici è stato utilizzato per calcolare in modo preliminare la variazione di stress di Coulomb (CFF) sulle faglie circostanti. Le faglie circostanti sono state ipotizzate con una geometria del tutto simile a quella della faglia del 24 agosto. La Figura 3-2 mostra il risultato di tale calcolo (considerando il modello SAR-GPS a due faglie) sui piani presunti delle sei faglie più vicine (geometrie dei piani fornite da Emergeo). Valori positivi considerevoli di CFF, fino a 0.5-0.6 MPa si riscontrano al limite NW della faglia del M. Gorzano, interessata dopo il mainshock da una intensa attività di bassa magnitudo. A Nord i valori sulla faglia Vettore-Bove sembrano molto più bassi, tuttavia si evidenzia come sia possibile che il piano utilizzato per il calcolo non sia del tutto rappresentativo, in quanto non è in continuità con la faglia del Vettore. Se il piano proseguisse a SE si avrebbero concentrazioni di CFF probabilmente analoghe a quelle calcolate per la faglia del Gorzano.

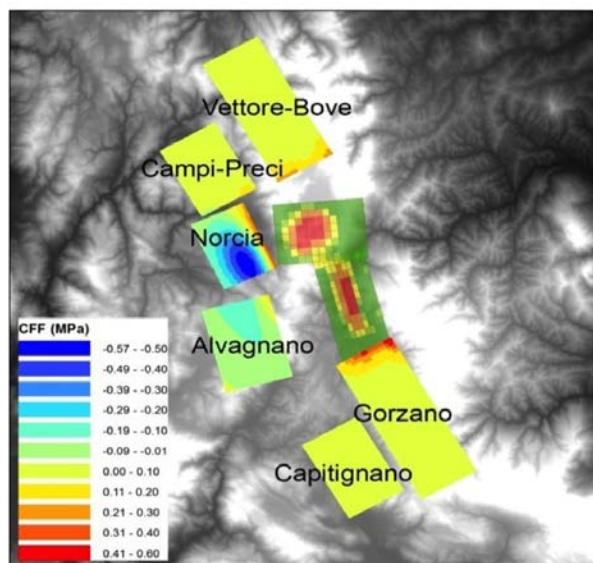


Figura 3-2. Distribuzione della Coulomb Failure Function (CFF) causata dalla dislocazione del modello a due faglie, sulle strutture circostanti. Piani di faglia delle strutture vicine forniti dal Gruppo Emergeo. (DOI: 10.5281/zenodo.61682)

La sequenza sismica ha coinvolto un volume corrispondente a una massa di circa 2500 miliardi di tonnellate. Il collasso gravitativo di tale diedro di crosta superiore (*graviquake*) equivale a un rilascio di energia di circa 10^{16} joule, almeno 100 volte più grande dell'energia sismica rilasciata. Ciò significa che molta parte dell'energia gravitazionale si è dissipata in fratturazione e calore di frizione. Il collasso cosismico registrato dai dati SAR ha evidenziato un abbassamento del suolo fino a circa 20 cm che racchiude la zona di massimo danneggiamento (Figura 3-3).

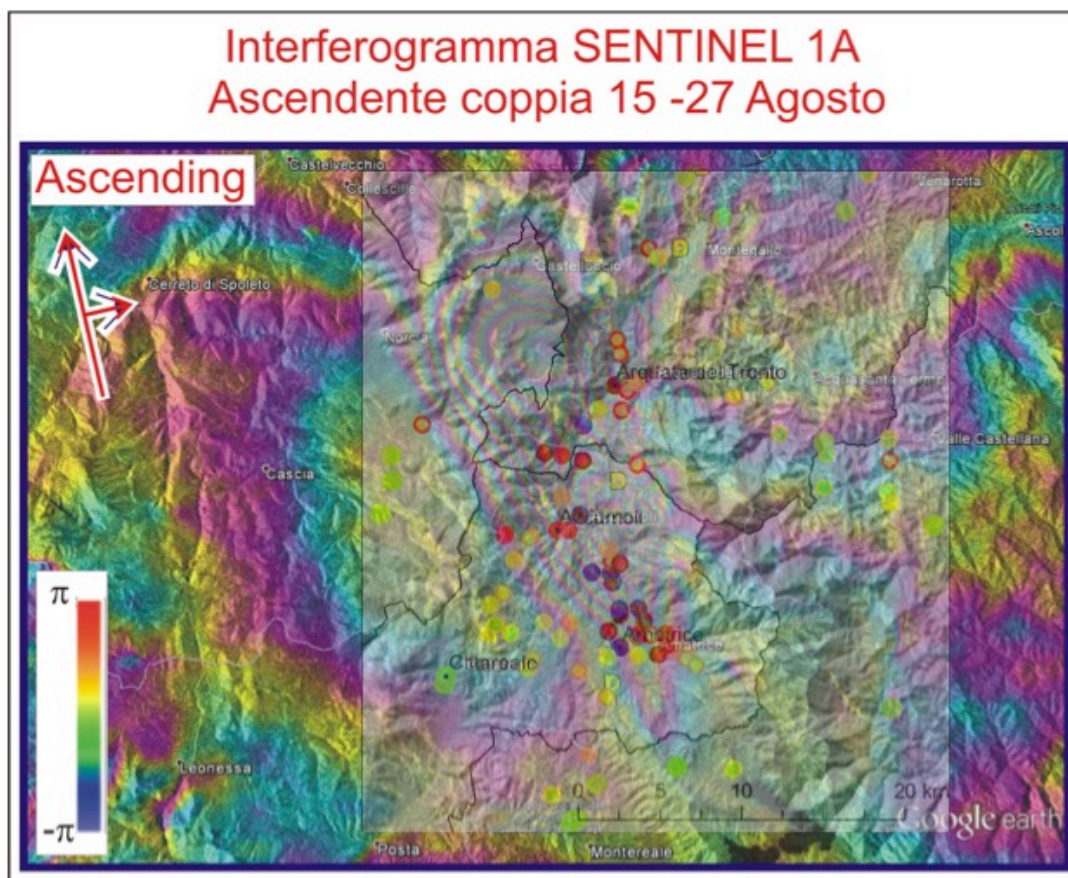


Figura 3-3. Dati SAR su cui sono sovrapposti i dati di danneggiamento. Si noti la concentrazione del danno nell'area in subsidenza.

Esclusione di responsabilità e limiti di uso delle informazioni

L'INGV, in ottemperanza a quanto disposto dall'Art.2 del D.L. 381/1999, svolge funzioni di sorveglianza sismica e vulcanica del territorio nazionale, provvedendo all'organizzazione della rete sismica nazionale integrata e al coordinamento delle reti sismiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

L'INGV concorre, nei limiti delle proprie competenze inerenti la valutazione della Pericolosità sismica e vulcanica nel territorio nazionale e secondo le modalità concordate dall'Accordo di programma decennale stipulato tra lo stesso INGV e il DPC in data 2 febbraio 2012 (Prot. INGV 2052 del 27/2/2012), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile.

In particolare, questo documento¹ ha finalità informative circa le osservazioni e i dati acquisiti dalle Reti di monitoraggio e osservative gestite dall'INGV.

L'INGV fornisce informazioni scientifiche utilizzando le migliori conoscenze scientifiche disponibili al momento della stesura dei documenti prodotti; tuttavia, in conseguenza della complessità dei fenomeni naturali in oggetto, nulla può essere imputato all'INGV circa l'eventuale incompletezza ed incertezza dei dati riportati.

L'INGV non è responsabile dell'utilizzo, anche parziale, dei contenuti di questo documento da parte di terzi e di eventuali danni arrecati a terzi derivanti dal suo utilizzo.

La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV.



Quest'opera è distribuita con Licenza

[Creative Commons Attribuzione - Non opere derivate 4.0 Internazionale](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

*Il Presidente Prof. Carlo Doglioni
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata 605 - 00143 Rome, Italy*

¹ Questo documento rientra nella categoria di livello 3 come definita nei "Principi della politica dei dati dell'INGV (D.P. n. 200 del 26.04.2016)".