

“Geometria, cinematica, interazione e potenziale sismogenico delle faglie di Campo Felice (Appennino Centrale)”

Giulia Schirripa Spagnolo

1. Introduzione

Studi sismologici recenti hanno dimostrato l'esistenza di possibili diversi scenari per le rotture sismiche. Alcuni casi di studio sono caratterizzati da un terremoto principale (chiamato *mainshock*) seguito da altri eventi con magnitudo comparabile (chiamati *aftershocks*). In questo scenario, lo scivolamento cosismico del *mainshock* enucleatosi su un segmento di faglia genera un trasferimento di sforzo (*Coulomb stress change*; Stein, 2003) sulle faglie adiacenti, le quali a loro volta si possono muovere sismicamente generando *aftershocks*. Un esempio di questo scenario è la sequenza sismica di Amatrice-Norcia 2016, che è stata caratterizzata dalla rottura cosismica di più segmenti di faglia. Il 24 Agosto 2016, si enucleò sulla faglia di Monte Gorzano un evento di Mw 6.0. Pochi mesi dopo, sulla faglia del Monte Vettore, si enuclearono un evento di Mw 5.9 (26 Ottobre) ed un altro evento di Mw 6.5 (30 Ottobre) (Galadini et al., 2018).

In altri casi, lo scivolamento di più faglie non avviene a cascata ma in modo sincrono, generando una rottura multipla di più segmenti durante un unico evento sismico che raggiunge così una magnitudo più elevata (Xu et al., 2018). Questo, per esempio, è quanto avvenuto nel 2016 in Nuova Zelanda durante il terremoto di Kaikoura di Mw 7.8. L'evento è stato generato dallo scivolamento sincrono di 21 segmenti di faglia con cinematica trascorrente, per una lunghezza totale di rottura superficiale di circa 180 km. L'interazione meccanica esistente tra i vari segmenti di faglia ha generato un aumento dell'area di scivolamento e un conseguente aumento dell'energia rilasciata a seguito del terremoto (Xu et al., 2018). Questi esempi mostrano l'importanza, per uno studio approfondito del potenziale sismogenico di un'area, di considerare non solo l'attivazione sismica dei singoli segmenti di faglia ma anche la possibilità di un'attivazione sincrona. Per comprendere tali processi sismologici, data l'inaccessibilità in profondità delle sorgenti sismiche attive, è importante studiare i loro analoghi esumati, ossia le faglie affioranti in superficie.

In questa tesi, attraverso un lavoro di rilevamento geologico-strutturale a scala 1: 10 000, ho studiato la segmentazione e l'interazione meccanica tra le faglie attive dirette del sistema di Campo Felice (AQ). L'Italia Centrale è un eccellente sito dove studiare le sorgenti sismiche esumate che hanno generato terremoti in passato e che potrebbero generarne altri in futuro. L'Italia, inoltre, ha un ottimo record paleosismologico nonché un catalogo sismologico dal 1980 ad oggi e un eccezionale record storico di sismicità. Inoltre, a causa di tale ricchezza di dati sismologici (sia paleosismologici sia storico-strumentali), l'Italia è un ottimo caso di studio per validare le conosciute relazioni empiriche tra le dimensioni delle rotture e la magnitudo dei terremoti (Wells e Coppersmith, 1994; Leonard, 2010). Queste relazioni, infatti, hanno bisogno di essere verificate e validate localmente in quanto i dati da cui sono state ottenute potrebbero non includere eventi avvenuti nell'area di studio. La validazione locale di queste relazioni è fondamentale per meglio valutare la pericolosità sismica in aree dove non si ha sismicità strumentale o storica, ma si conoscono solo le geometrie di faglie ben esposte. In questo caso, se si assume la lunghezza della faglia esumata come la lunghezza massima superficiale che la rottura potrà avere, si otterrà una stima della magnitudo massima attesa.

Ho applicato questo metodo al sistema di faglie attive di Campo Felice (Long. 13°26'53" E, Lat. 42°12'57" N, altitudine 1530 m), dove vi sono due scarpate di faglia ben esposte. Correlati a queste faglie, Monte Cefalone (MCF) e Monte Orsello (MOF), non ci sono dati di sismicità storica o strumentale ma solo dati di paleosismicità (Benedetti et al., 2013). Attraverso un lavoro di rilevamento, ho

ricosciuto la lunghezza in mappa e la continuità laterale, la cinematica e l'interazione meccanica di queste faglie e così ho valutato il potenziale sismogenico dell'area di Campo Felice. Inoltre, attraverso la modellazione della variazione di sforzo di Coulomb, presento possibili scenari di innesco di sequenze sismiche generate dall'enucleazione di terremoti su uno dei segmenti del sistema di faglie di Campo Felice.

2. Inquadramento

L'Appennino Centrale è un sistema a pieghe e sovrascorrimenti orientati NW-SE, che si è formato a partire dal tardo Oligocene a seguito della subduzione verso ovest della placca Adriatica sotto quella Europea. Sin dal Pliocene, in Appennino centrale è iniziata una tettonica estensionale orientata NE-SW in associazione con l'apertura del bacino di retroarco Tirrenico. Attualmente, questo regime tettonico è accomodato da faglie attive con direzione prevalente NW-SE che hanno generato molti bacini intramontani, tra cui quello di Campo Felice.

Questo bacino è bordato da un sistema di faglie dirette i cui segmenti principali sono Monte Orsello (MOF) e Monte Cefalone (MCF). Queste faglie hanno una geometria en-echelon sinistro e sono definite attive dal tardo Pleistocene ad oggi grazie a studi paleosismologici (*Galli et al., 2008; Benedetti et al., 2013*).

3. Cinematica e interazione tra le faglie

Al fine di ottenere una valutazione precisa del potenziale sismogenico delle faglie di Campo Felice, è stato necessario misurare la lunghezza in mappa delle faglie di Monte Orsello e Monte Cefalone e valutarne l'interazione meccanica. Per ottenere questi dati, attraverso un attento lavoro di rilevamento geologico-strutturale, ho realizzato le seguenti cartografie:

- Una carta geologica dell'area rilevata a scala 1: 50 000 (Allegato A1) con correlate sezioni geologiche (Allegato A2);
- una carta tettonico-strutturale a scala 1: 50 000, dove attraverso una scala cromatica semi-quantitativa e proiezioni stereografiche viene rappresentata rispettivamente la densità di fratturazione e la cinematica delle faglie (Allegato B).

Attraverso la realizzazione di 13 sezioni geologiche, con traccia perpendicolare alle faglie investigate, ho potuto calcolare, mediante l'utilizzo di marker stratigrafici, il rigetto geologico verticale lungo i piani di faglia di MOF e MCF. Calcolati i rigetti, ho analizzato, attraverso visualizzazione grafica, la loro variazione in funzione della lunghezza lungo la direzione delle faglie (Figura 1).

Per definire l'interazione meccanica tra MOF e MCF ho focalizzato l'attenzione sulla loro area di sovrapposizione. Il rilevamento geologico-strutturale ha mostrato una ri-orientazione degli strati rispetto all'andamento regionale, che definisce una *relay-ramp* (*Peacock e Sanderson, 1994*) e una densità di fratturazione medio-bassa. Dall'analisi del diagramma distanza vs. rigetto (Figura 1) si nota che le curve non hanno l'andamento caratteristico delle faglie che non interagiscono meccanicamente, con massimo nella porzione centrale e una diminuzione lineare verso i tipi delle faglie (*Peacock e Sanderson, 1994*), ma vi è un aumento del gradiente di diminuzione in corrispondenza dell'area di sovrapposizione (Figura 1). I risultati sopra menzionati permettono così di definire un un *soft-linkage* tra MOF e MCF. Da questa conclusione, si può quindi valutare come scenario sismico possibile l'attivazione singola o sincrona delle faglie di Campo Felice.

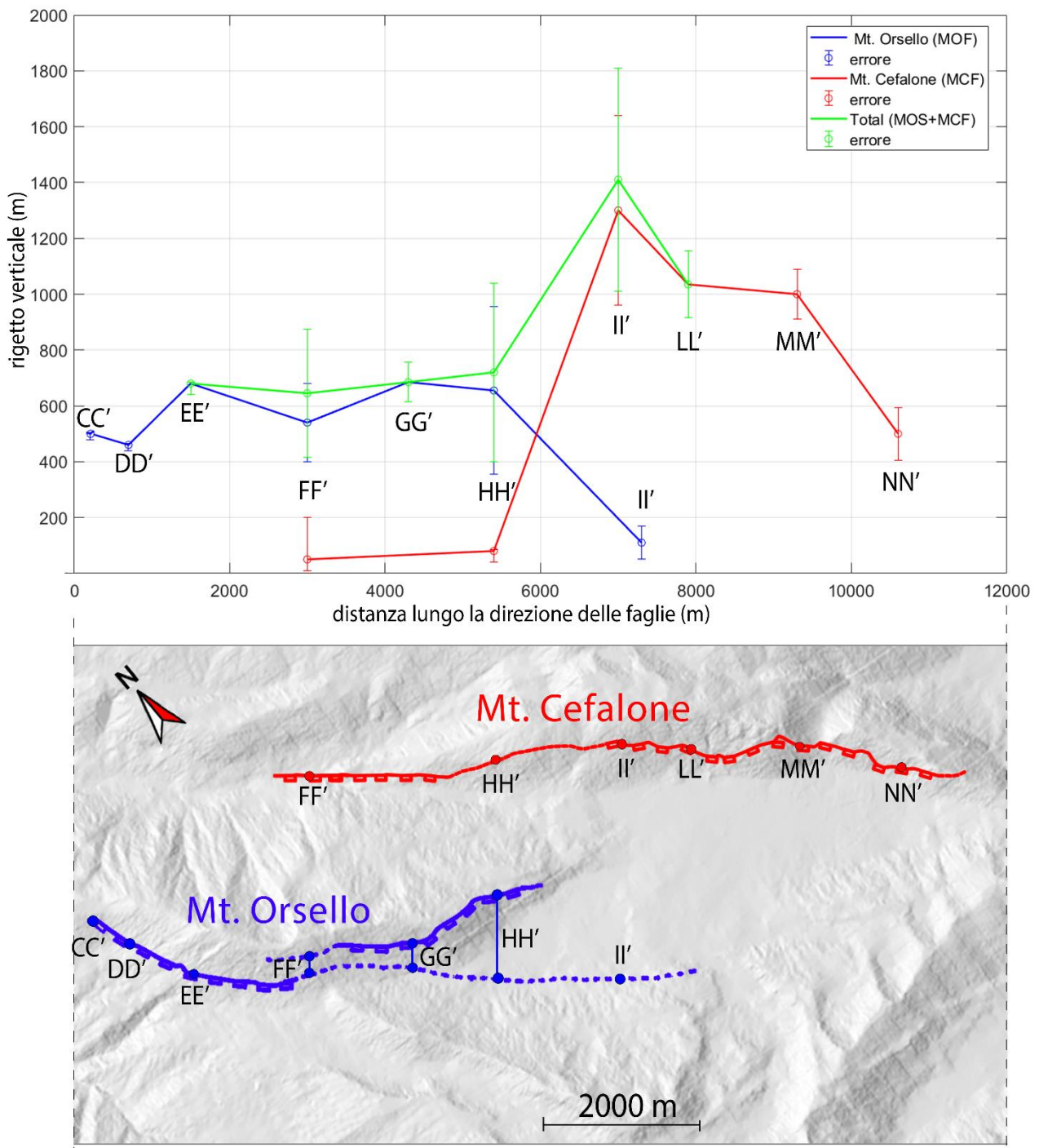


Figura 1. In alto, i profili di variazione del rigetto verticale in funzione della lunghezza lungo la direzione delle faglie di Monte Orsello (MOF) e Monte Cefalone (MCF) e, in basso, mappa schematica delle faglie. In mappa l'intersezione tra le sezioni geologiche e le faglie è indicata con il nome della sezione geologica corrispondente (CC', etc.).

4. Valutazione del potenziale sismogenico

Poiché il sistema di faglie di Campo Felice è attivo (Galli et al., 2008; Benedetti et al., 2013) ma privo di dati storici di sismicità, è necessario l'utilizzo delle note relazioni empiriche per una valutazione della pericolosità sismica dell'area. Per fare questo, ho utilizzato le tre diverse relazioni di Wells e Coppersmith (1994), Galli et al. (2008) e Leonard (2010), valide per faglie estensionali.

L'equazione di Wells e Coppersmith (1994) è:

$$M_w = 4.86 + 1.32 \cdot \log(L) \quad (1)$$

dove M_w è la magnitudo momento mentre L è la lunghezza della rottura in superficie espressa in km. L'Equazione (1) è empiricamente ricavata da 15 terremoti storici estensionali ed ha un range di attendibilità pari a $5.2 < M_w < 7.3$ e $2.5 < L < 41$ (Wells e Coppersmith, 1994). I dati utilizzati dagli autori includono soprattutto terremoti degli USA, e solo cinque terremoti avvenuti in Italia che sono: Avezzano 1915 M_w 7, Umbria 1979 M_w 5.9, Irpinia 1980 M_w 6.9, Lazio-Abruzzo 1984 M_w 5.8, and Umbria 1984 M_w 5.3.

L'equazione di Galli et al., (2008) è:

$$M_w = 4.7248 * L^{0.1046} \quad (2)$$

dove L è la lunghezza superficiale della faglia espressa in km. L'equazione è empiricamente ricavata da 16 paleoterremoti avvenuti negli ultimi 2.4 ka in Appennino con $M_w > 5.5$ (Galli et al., 2008).

L'equazione di Leonard (2010) è:

$$M_w = 4.40 + 1.52 \cdot \log(L) \quad (3)$$

dove L è la lunghezza della rottura in superficie espressa in km. Questa equazione è una revisione dell'Equazione (1). Leonard (2010), infatti, usa un database di terremoti più completo dotato di una maggiore omogeneità globale.

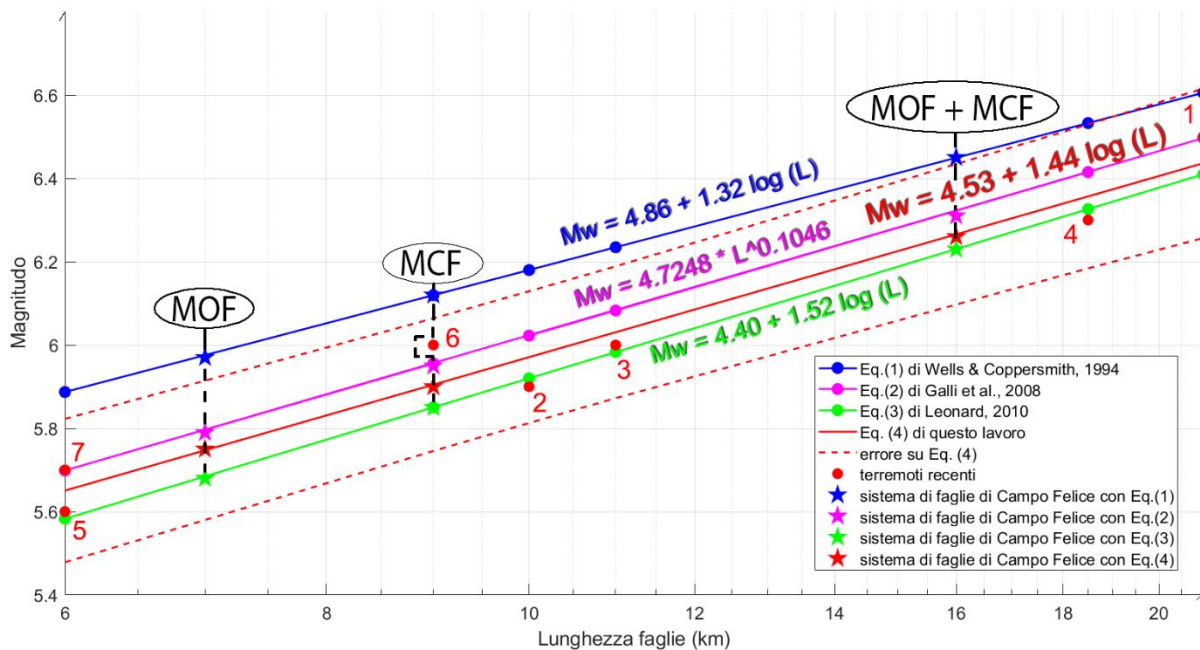


Figura 2. Grafico che mostra con diversi colori le equazioni empiriche usate in questo lavoro per calcolare le magnitudo massime attese dai dati di lunghezza delle faglie di Monte Orsello (MOF) e Monte Cefalone (MCF).

Ho applicato queste equazioni (1, 2 e 3) alle lunghezze delle faglie di Monte Orsello (MOF) e Monte Cefalone (MCF), ottenute a seguito del lavoro di rilevamento. In particolare, ho valutato la massima magnitudo attesa a seguito dell'attivazione indipendente di Monte Orsello e quella di Monte Cefalone, utilizzando singolarmente i loro valori di lunghezza (rispettivamente 7 e 9 km). Poiché dall'analisi strutturale ho valutato un *soft-linkage* tra le due faglie, ho valutato anche la magnitudo massima attesa a seguito della loro attivazione sincrona, utilizzando la loro lunghezza cumulativa (16 km). In Figura 2, con diversi colori, sono rappresentate le magnitudo massime attese a seguito dell'enucleazione di terremoti sul sistema di faglie di Campo Felice, ottenute con le diverse equazioni. Il range di magnitudo massime attese è tra 5.7 e 6.4.

In seguito, ho confrontato questi modelli con gli ultimi sette terremoti, misurati strumentalmente attraverso la rete sismica nonché attraverso inversioni InSar o GPS, avvenuti in Appennino Centrale con magnitudo superiore a 5.5 e lunghezza sub-superficiale compresa tra 6 e 21 km. Questi sono:

- Durante la sequenza di Colfiorito 1997, i due eventi del 26 Settembre (in Figura 2 terremoti n° 7 e 6) e l'evento del 14 Ottobre (in Figura 2 terremoto n° 5) con, rispettivamente, Mw 5.7 e L 6 km, Mw 6 e L 9 km, e Mw 5.6 e L 6 km (*Chiaraluce et al., 2003*).
- Il terremoto di L'aquila del 6 Aprile 2009 (in Figura 2 terremoto n° 4) con Mw 6.3 e L 18.5 km (*Guerrieri et al., 2010*).
- Durante la sequenza sismica di Amatrice-Norcia 2016, l'evento del 24 Agosto (in Figura 2 terremoto n° 3) con Mw 6 e L 11 km, l'evento del 26 Ottobre (in Figura 2 terremoto n° 2) con Mw 5.9 e L 10 km, e l'evento del 30 Ottobre (in Figura 2 terremoto n° 1) con Mw 6.5 e L 21 km (*Galadini et al., 2018*).

Attraverso il test statistico del X^2 (chi-quadro) ho valutato l'attendibilità delle varie equazioni in confronto a questi terremoti recenti. Attuando tale test statistico ho ottenuto che:

- L'Equazione (1) di *Wells e Coppersmith (1994)* modella i dati strumentali recenti con un X^2 di 8.26 che assegna una validità al modello del 14 %.
- L'Equazione (2) di *Galli et al. (2008)* modella i dati strumentali recenti con un X^2 di 1.07 che assegna una validità al modello del 96 %.
- L'Equazione (3) di *Leonard (2010)* modella i dati strumentali recenti con un X^2 di 1.15 che assegna una validità al modello del 95 %.

Questa analisi permette di affermare che l'Equazione (1), ampiamente utilizzata in letteratura, sovrastima i dati in Appennino centrale, mentre le Equazioni (2) e (3) hanno un'ottima validità locale per quest'area. Questa tesi, inoltre, propone una nuova legge empirica, potenzialmente utilizzabile in Appennino Centrale per terremoti di $5.5 < Mw < 6.5$ e $6 < L \text{ (km)} < 21$, in alternativa alle equazioni (2) e (3). Questa nuova legge empirica è stata ottenuta attuando una regressione lineare dei dati strumentali degli ultimi sette terremoti recenti. L'equazione così ottenuta è:

$$Mw = 4.53 + 1.44 \cdot \log(L) \quad (4)$$

con una deviazione standard di 0.16. Dove L è la lunghezza della rottura sub-superficiale ottenuta attraverso inversione InSar o GPS.

La magnitudo massima attesa per il sistema di faglie di Campo Felice è:

- Assumendo un'attivazione del segmento di Monte Orsello, Mw 5.79 con Eq. (2), 5.68 con l'Eq. (3) e 5.75 con l'Eq. (4).
- Assumendo un'attivazione del segmento di Monte Cefalone, Mw 5.95 con Eq. (2), 5.85 con l'Eq. (3) e 5.90 con l'Eq. (4).
- Assumendo un'attivazione sincrona del segmento di Monte Orsello e Monte Cefalone, Mw 6.31 con l'Eq. (2), 6.23 con l'Eq. (3), e 6.26 con l'Eq. (4).

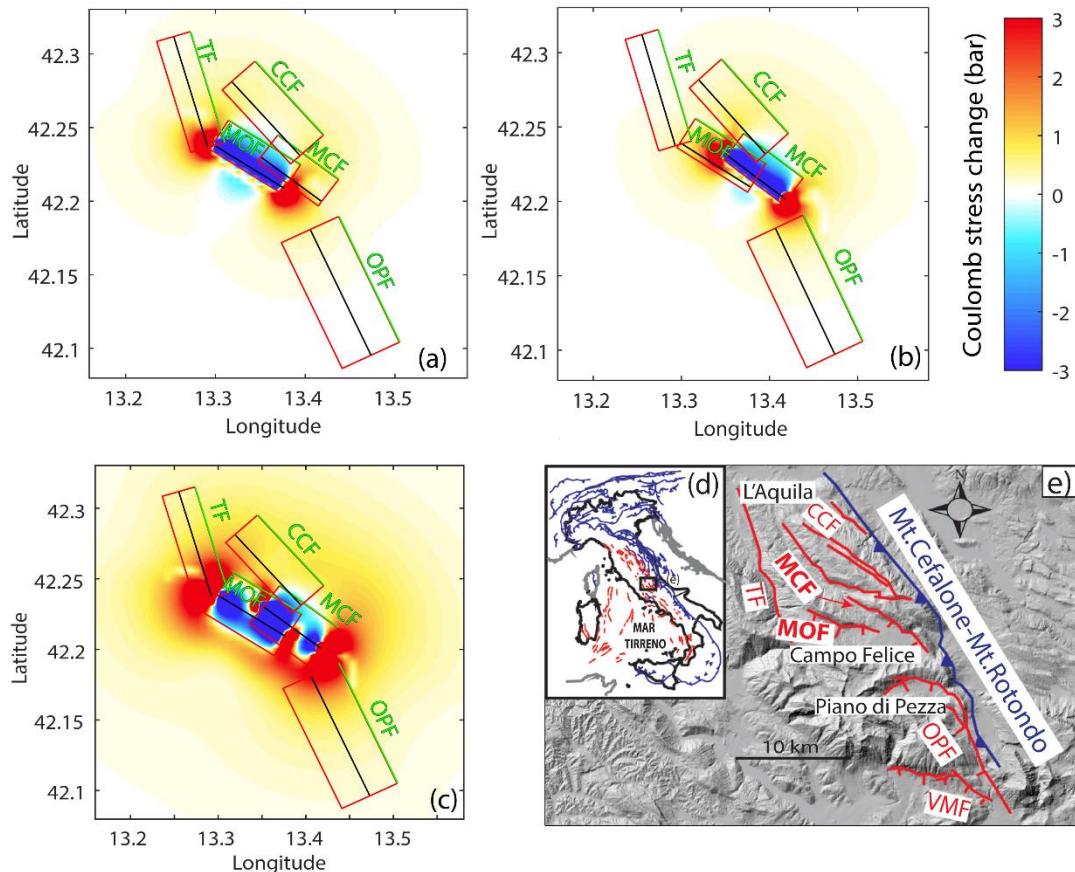


Figura 3. Modellazione della variazione di sforzo di Coulomb indotta da uno scivolamento cosismico delle faglie di: (a) Monte Orsello (MOF), (b) Monte Cefalone (MCF), (c) sincronicamente Monte Orsello e Monte Cefalone. (d) Assetto tettonico-strutturale dell'Italia (in rosso sono tracciate le faglie estensionali e in blu i sovrascorrimenti). (e) Schema strutturale dell'area di studio, in cui sono evidenziate oltre alle faglie di Campo Felice (MOF e MCF), le faglie di: Tornimparte (TF), Colle Cerasitto (CCF), Ovindoli-Pezza (OPF), Velino-Magnola (VMF).

Infine, per una valutazione completa del potenziale sismogenico dell'area di Campo Felice, attraverso la modellazione del cambiamento di sforzo di Coulomb, ho valutato il possibile innesco di sequenze sismiche con enucleazione di terremoti su più faglie adiacenti. Durante uno scivolamento sismico, si ha una diminuzione di sforzo di Coulomb lungo la faglia che si è attivata, e un conseguente aumento di sforzo nelle aree limitrofe. Un aumento dello sforzo di Coulomb può essere sufficiente a innescare nuovi terremoti (Stein, 2003). Ho applicato una modellazione dello sforzo di Coulomb al sistema di faglie di Campo Felice (Figura 3) assumendo:

- Una rottura cosismica singola di Monte Orsello (MOF) con Mw 5.75 e scivolamento cosismico medio di 0.3 m. In questo caso, si osserva un cambiamento positivo dello sforzo di Coulomb, e quindi la probabile enucleazione di terremoti successivi sulla faglia di Monte Cefalone (MCF) e lungo la parte meridionale della faglia di Tornimparte (TF).

- b) Una rottura cosismica singola di Monte Cefalone (MCF) con Mw 5.9 e scivolamento cosismico medio di 0.3 m. In questo caso, si osserva un cambiamento positivo dello sforzo di Coulomb e quindi la probabile enucleazione di terremoti successivi sulla faglia di Monte Orsello (MOF) e lungo la parte settentrionale della faglia di Ovindoli-Pezza (OPF).
- c) Una rottura cosismica sincrona di Monte Orsello (MOF) e Monte Cefalone (MCF) con Mw 6.3 e scivolamento cosismico medio di 0.5 m. In questo caso, si osserva un notevole cambiamento positivo dello sforzo di Coulomb e quindi la probabile enucleazione di terremoti successivi lungo la parte meridionale della faglia di Tornimparte (TF) e lungo la parte settentrionale della faglia di Ovindoli-Pezza (OPF).

5. Conclusioni

a) I terremoti intensi possono generare rotture cosismiche di più segmenti in maniera sincrona o a cascata. Poiché uno studio diretto in profondità delle sorgenti sismiche è impossibile, con questa tesi sul sistema di faglie attive di Campo Felice si dimostra che uno studio degli analoghi esposti permette di valutare i possibili scenari sismici (rotture singole o multiple, sincrone o a cascata). Lo studio della geometria, cinematica, e dinamica delle faglie esposte di Campo Felice valuta i diversi possibili scenari di rottura sismica e definisce così un valore di magnitudo massime attese compreso tra Mw 5.7 e Mw 6.4.

b) L'applicazione di tre note leggi empiriche tra lunghezza della rottura sismica e magnitudo del terremoto per valutazioni di potenziali sismici in Appennino centrale è stata validata utilizzando gli ultimi terremoti recenti avvenuti in quest'area con Mw > 5.5. Sono state validate, e quindi se ne suggerisce l'utilizzo anche per studi futuri in quest'area, le equazioni di *Leonard (2010)* e *Galli et al. (2008)*. Inoltre, è stata proposta una nuova relazione empirica derivante dalla regressione lineare effettuata sugli ultimi terremoti recenti. Si raccomanda dunque un approccio simile a quello qui descritto, basato sulla validazione locale prima dell'utilizzo di relazioni empiriche esistenti in letteratura, per valutazioni future di potenziali sismogenici in Italia ed altrove.

Una sintesi di questa tesi è ora in revisione per la sua pubblicazione sulla rivista *Tectonics*.

6. Bibliografia

- Benedetti et al.*, (2013). <https://doi.org/10.1002/jgrb.50299>
- Chiaraluce et al.*, (2003). <https://doi.org/10.1029/2002JB002166>
- Galadini et al.*, (2018). <https://doi.org/10.1193/101317EQS204M>
- Galli et al.*, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.01.001>
- Guerrieri et al.*, (2010). <https://doi.org/10.1029/2010JB007579>
- Leonard*, (2010). <https://doi.org/10.1785/0120090189>
- Peacock e Sanderson*, (1994). <https://doi.org/10.1306/BDF9046-1718-11D7-8645000102C1865D>
- Stein*, (2003). <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0103-72>
- Wells & Coppersmith*, (1994). Estratto da: <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/84/4/974/119792/New-empirical-relationships-among-magnitude?redirectedFrom=fulltext>
- Xu et al.*, (2018). <https://doi.org/10.1002/2017JB015168>