

Navigando tra Geologia, Storia, Sismologia e Archeologia: i terremoti del 1783 e 1908 come chiavi di lettura dell'evoluzione recente dello Stretto di Messina

Navigating among Geology, Archaeology and History:

the 1783 and 1908 earthquakes as a key for understanding the recent evolution of the Messina Straits

VALENSISE GIANLUCA

RIASSUNTO - I due forti terremoti del 5 febbraio 1783 nella Piana di Gioia Tauro e del 28 dicembre 1908 nello Stretto di Messina rappresentano un'occasione unica per esplorare il rapporto che intercorre tra l'esistenza di una grande faglia sismogenetica e l'espressione superficiale della sua attività. La ricerca si è avvalsa di numerose osservazioni storiche e geologiche relative ai due terremoti, e per quello del 1908 anche di preziose osservazioni quantitative che hanno inaugurato l'era della sismologia strumentale in Italia. Entrambi i terremoti appaiono essere stati generati da grandi faglie estensionali *cieche*, ovvero non direttamente visibili in superficie, ma che controllano strettamente l'evoluzione della geologia e del paesaggio. Il confronto tra le caratteristiche della sorgente sismica e l'evoluzione dello Stretto suggerisce inoltre che quello del 1908 sia un "terremoto caratteristico", ovvero un evento che si ripete simile a sé stesso, e che ricorre con cadenza almeno millenaria.

PAROLE CHIAVE: Geofisica, Geomorfologia, Stretto di Messina, Terremoto del 1908, Faglia cieca, Terrazzi marini

ABSTRACT - The strong 5 February 1783, Gioia Tauro Plain and 28 December 1908, Messina Straits earthquakes comprise a unique opportunity to explore the relationships between the occurrence of a large seismogenic fault and the full surface expression of its activity. The research exploited many historical and geological observations relating to the two earthquakes, and for the 1908 earthquake also an invaluable set of quantita-

tive observations marking the inception of instrumental seismology in Italy. Both earthquakes appear to have been generated by large blind extensional faults exerting a close control on the evolution of the local geology and landscape. The comparison between the main properties of the seismic source and the evolution of the Messina Straits also suggests that the 1908 earthquake is a "characteristic earthquake", i.e. an earthquake that repeats similar to itself, and that its recurrence interval is in the order of a millennium.

KEY WORDS: Geophysics, Geomorphology, Messina Straits, 1908 earthquake, Blind fault, Marine terraces

1. - UN PARADIGMA DA ROVESCIARE

Tra i diversi fenomeni naturali il terremoto è certamente quello che ha influito maggiormente sulla storia delle civiltà: non solo attraverso la distruzione materiale delle opere dell'uomo, quali le città e le infrastrutture, ma anche per il forte impatto sulla sua stessa sussistenza; un impatto tale da causare gravi crisi economiche e sociali, fame, abbandoni di massa dei territori colpiti e migrazioni, talvolta ridisegnando la rete insediativa e delle comunicazioni di vasti ter-

ritori. In virtù della lunga storia demografica e culturale della nostra penisola, tutte queste circostanze valgono sicuramente per molti dei grandi terremoti italiani, a iniziare dai due eventi catastrofici trattati in questo articolo: quello che tra il 5 febbraio e il 28 aprile 1783 devastò buona parte della Calabria centrale e meridionale, attraverso almeno cinque forti scosse geograficamente e sismologicamente del tutto indipendenti tra loro, e quello che il 28 dicembre 1908, con una scossa singola ma potentissima, portò lutto e distruzione in tutta l'area a cavallo dello Stretto di Messina.

Sugli effetti di queste autentiche catastrofi si è già detto molto: per il terremoto del 1908 ad esempio si può consultare il volume pubblicato dall'INGV in occasione del centenario di questo evento, che raccoglie i contributi di ben 34 esperti e centinaia di pagine di documentazione originale (BERTOLASO *et alii*, 2008), mentre per i terremoti del 1783 si potrà fare riferimento al Catalogo dei Forti Terremoti in Italia, o

CFTI5Med (GUIDOBONI *et alii*, 2018; GUIDOBONI *et alii*, 2019). Il tema che vorrei discutere in questa nota è invece quello che riguarda più direttamente il geologo come attento osservatore e studioso della geologia e del paesaggio. Le catastrofi del 1783 e 1908 ci insegnano infatti che, ripetendosi nel tempo, il terremoto si configura come una *forza creatrice*, prima ancora che solamente come una *forza distruttrice*: creatrice di forme del paesaggio, di condizioni climatiche e ambientali, di risorse, di opportunità per l'uomo. Questa nota, quindi, rovescia il paradigma antropocentrico in virtù del quale i terremoti ci interessano solo per i danni che possono causare, adottando invece la prospettiva del geologo attento a capire come quegli stessi terremoti, e in generale i fenomeni geologici, rappresentino per molti versi non solo il respiro della Terra, ma anche il motore di molti eventi che riguardano la nostra presenza sul pianeta attraverso le diverse epoche storiche. Sul tema si veda anche l'interessante saggio di FORCE & MCFADGEN (2012).

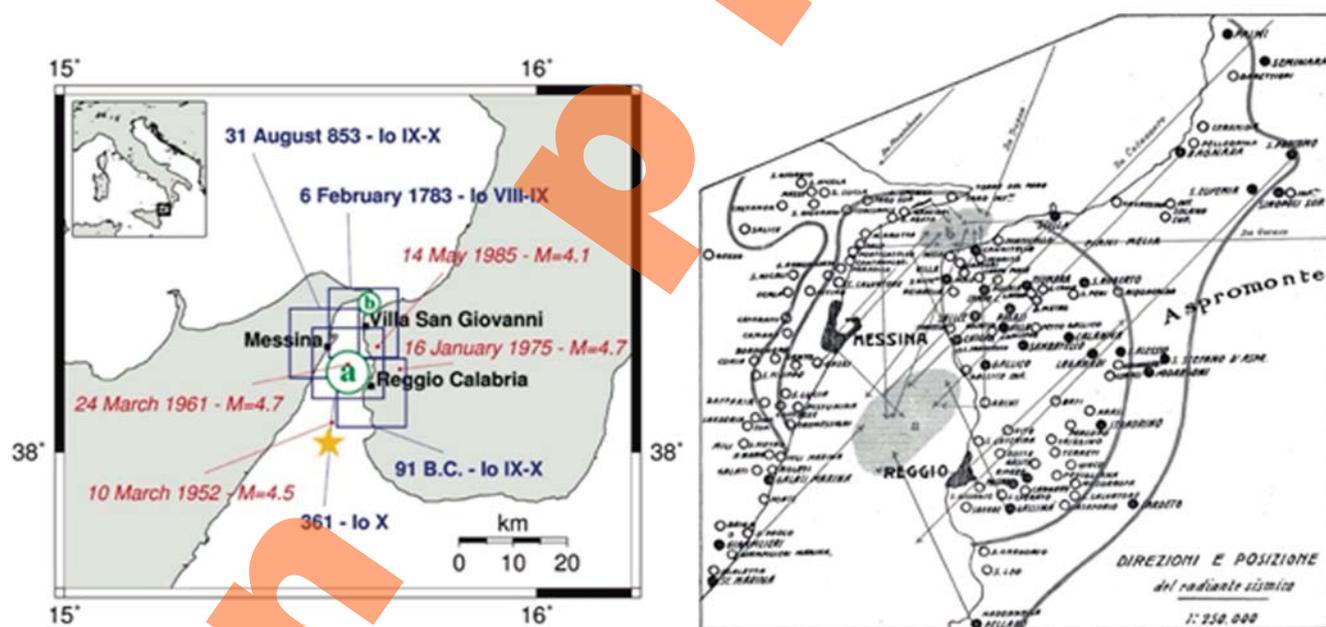


Fig. 1 - (a sinistra) Carta semplificata dello Stretto di Messina, mostrante i terremoti storici selezionati e gli epicentri calcolati da OMORI (1909) (a) e BARATTA (1910) (a e b): l'immagine è tratta da PINO *et alii* (2009). (a destra) Intensità del terremoto del 1908 per i gradi XI e X e ubicazione di due presumibili aree di massimo rilascio indipendenti (aree a tratteggio indicate con a e b): la principale situata appena ad ovest di Reggio Calabria, una secondaria situata a nord-est di Messina, vicino all'estremità settentrionale dello Stretto (da BARATTA 1910). Queste aree, mostrate anche nell'immagine di sinistra sempre come a e b, sono state ottenute dalle direzioni di caduta di manufatti selezionati (mostrate da piccole frecce), utilizzando un metodo sviluppato dal sismologo irlandese Robert Mallet nel 1858-1860. Si noti il diverso decadimento dell'intensità su entrambi i lati dello Stretto e la forte asimmetria del danneggiamento a sfavore della Calabria. - (left) Simplified map of the Messina Straits, showing selected historical earthquakes and the epicenter of the 1908 earthquake calculated by OMORI (1909) (a) and BARATTA (1910) (a and b): the image is taken from PINO *et alii* (2009). (right) Intensity pattern of the 1908 earthquake (only for the degrees X and XI) and location of two presumably independent major patches of seismic moment release (hatched areas indicated with a and b): the main one is located just west of Reggio Calabria, whereas the secondary one falls northeast of Messina, near the northern end of the Straits (from BARATTA 1910). These areas, shown as a and b also in the image on the left, were obtained from observations of selected fallen artifacts (shown by small arrows), using a method developed by Irish seismologist Robert Mallet in 1858-1860. Notice also the different decay of intensity on both sides of the Straits and the strong unbalance of damage, much more severe in Calabria than in Sicily.

2. - IL 1908: UN TERREMOTO CRUCIALE PER LA GEODINAMICA DEL MEDITERRANEO CENTRALE

Il terremoto del 28 dicembre 1908 nello Stretto di Messina è un caso piuttosto unico nel panorama della sismologia mondiale dell'inizio del XX secolo (Fig. 1). Non tanto e non solo per le sue dimensioni (M_W 7,1), che lo rendono comunque il più forte terremoto registrato strumentalmente in Italia, o per le oltre 80.000 vittime provocate nelle grandi e floride città di Messina e Reggio Calabria, che si affacciano sullo stretto che separa la Sicilia dall'Italia peninsulare; e neppure per l'interesse suscitato nella comunità sismologica globale, come testimonia il lavoro condotto dallo scienziato giapponese Fusakichi Omori (OMORI, 1909; VALENSISE, 2019). Il terremoto del 1908 è unico anche perché i dati scientifici-storici che ce lo hanno descritto da molteplici punti di osservazione ci hanno anche permesso di indagarne l'origine con un livello di dettaglio del tutto inusuale per un terremoto avvenuto agli albori dell'epoca strumentale.

Il ruolo dei dati storici nelle indagini sul terremoto del 1908 è stato quantomeno duplice. I primi sismogrammi, scritti da semplici strumenti meccanici ai primordi della Sismologia, e le osservazioni delle variazioni di quota causate dall'evento, basate invece su una tecnica geodetica all'epoca già abbastanza consolidata, hanno permesso di ipotizzare con

buona approssimazione la geometria della faglia che lo ha causato. Questi stessi dati hanno inoltre permesso a diversi gruppi di sismologi di indagare il suo meccanismo focale, la sua storia di rottura e persino la sua distribuzione dello *slip* cosismico, ovvero della dislocazione che ha avuto luogo tra i due lati del piano di faglia durante l'evento (Fig. 1; si veda PINO *et alii*, 2009, per un riepilogo esaustivo di cento anni esatti di studi e interpretazioni). Ma va ricordato che i dati strumentali furono integrati da rilievi ad altissima risoluzione condotti nelle zone più colpite a cura di celebri studiosi quali Giuseppe Mercalli (MERCALLI, 1909), il padre delle moderne scale di intensità, e Mario Baratta (BARATTA, 1910), l'autore de "I terremoti d'Italia", il primo moderno catalogo dei terremoti italiani (BARATTA, 1901). Questi rilievi hanno restituito un quadro molto dettagliato sia degli effetti secondari del terremoto sull'ambiente, ben sintetizzati da CACIAGLI (2008) e da COMERCI *et alii* (2015, 2020), sia dei danni subiti nella vasta regione colpita dal terremoto del 1908. Questa dovizia di dati ha consentito già agli studiosi di inizio '900 di filtrare le osservazioni di danneggiamento alla luce della vulnerabilità di edifici e infrastrutture danneggiati e delle caratteristiche dei terreni di fondazione, e quindi di valutare l'effettivo scuotimento del terreno e la sua distribuzione areale di dettaglio.

La combinazione delle numerose osservazioni storico-strumentali si è rivelata cruciale per valutare la distribuzione e le caratteristiche del moto del suolo

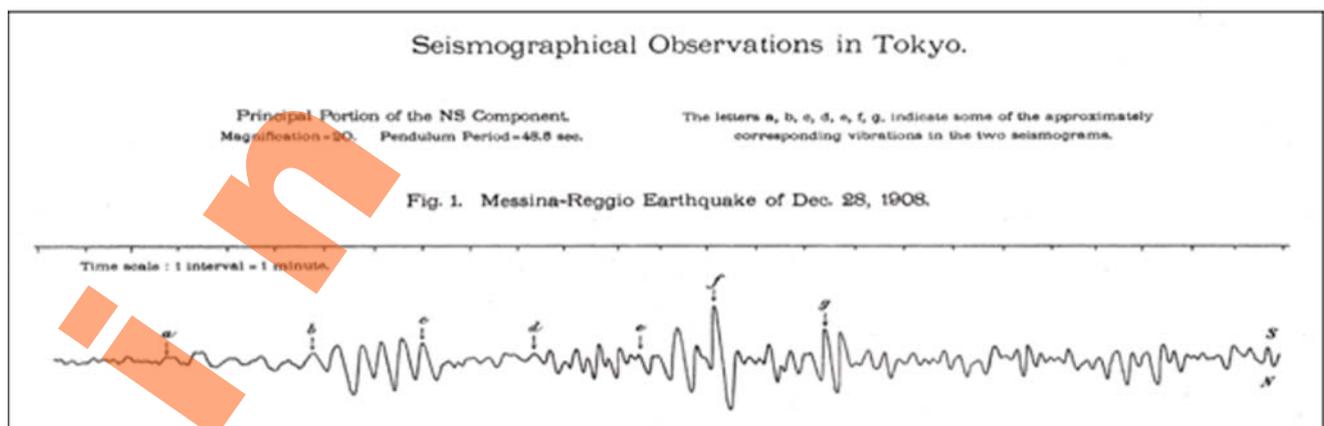


Fig. 2 - Sismogramma del terremoto del 28 dicembre 1908 registrato a Tokyo da uno strumento progettato e costruito dal sismologo giapponese Fusakichi Omori (da OMORI, 1909).

- Seismograph of the 28 December 1908 earthquake recorded in Tokyo by an instrument designed and built by Japanese seismologist Fusakichi Omori (from OMORI, 1909).

causato dal terremoto del 1908. Ma perché questa valutazione era così importante? La maggior parte delle indagini del terremoto del 1908 sono state stimolate non solo dalla legittima curiosità per un evento cruciale nella geodinamica del Mediterraneo centrale, e probabilmente anche una pietra miliare nella sismologia globale del suo tempo, ma anche dalla prevista costruzione di un attraversamento permanente dello Stretto di Messina, da realizzare con un ponte sospeso a campata unica di 3.300 m di lunghezza (si veda FIAMMENGHI *et alii*, 2009, per una revisione approfondita dei diversi progetti valutati). Pertanto, a seguito dell'avvio del progetto a metà degli anni '70, molta attività di ricerca è stata motivata - e in molti casi direttamente finanziata - dalla necessità di valutare la pericolosità sismica dell'area e di caratterizzare lo scuotimento del terreno che i pilastri del ponte subirebbero in caso di un grande terremoto nella zona. Il terremoto del 1908 è stato inevitabilmente scelto come *terremoto di progetto* per qualunque delle proposte di attraversamento permanente avanzate dalla comunità ingegneristica: una vera sfida, considerando che il terremoto del 1908 è ritenuto da molti avere un intervallo medio di ricorrenza di almeno un millennio (VALENSISE & PANTOSTI, 1992), tanto che ad oggi una sua ripetizione è altamente improbabile, e che il progettato ponte ricade interamente nel *near field* della faglia, ovvero ad una distanza che implica accelerazioni attese molto significative e quasi certamente superiori a 1.0 g, dove g è l'accelerazione di gravità.

3. - LE INDAGINI SISMOLOGICHE DEL TERREMOTO DEL 1908

Quello del 1908 è dunque il primo terremoto italiano - e uno dei primi al mondo - che è stato possibile studiare combinando osservazioni dirette di terreno con osservazioni strumentali simili a quelle disponibili per i terremoti odierni (Fig. 1). L'intera comunità scientifica del tempo fu coinvolta nel dibattito sulle cause del terremoto e del conseguente maremoto, e soprattutto sulla grande severità dei suoi effetti. Da subito molti studiosi, tra cui ad esem-

pio OMORI (1909), osservarono che la distruttività del terremoto del 1908 andava spiegata più con la scarsa resistenza degli edifici che come un effetto della sua pur elevata magnitudo, oggi stimata pari a M_w 7,1. Successive osservazioni ed analisi misero in evidenza anche la forte incidenza di effetti di amplificazione locale, particolarmente nella parte bassa della città di Messina.

Le prime indagini strumentali poterono contare su oltre 110 sismogrammi (Fig. 2), registrati a distanza regionale e tele-sismica, e su circa 100 osservazioni di variazioni di quota, ottenute dalla ribattitura di due linee geodetiche di livellazione del primo ordine, fortuitamente misurate solo pochi anni prima del terremoto (LOPERFIDO, 1909; Fig. 3).

Tra i numerosi fenomeni causati dal terremoto sull'ambiente e ben descritti dagli studiosi contemporanei non c'era nulla che fosse immediatamente riconducibile ai fenomeni di fagliazione superficiale che normalmente accompagnano un terremoto di

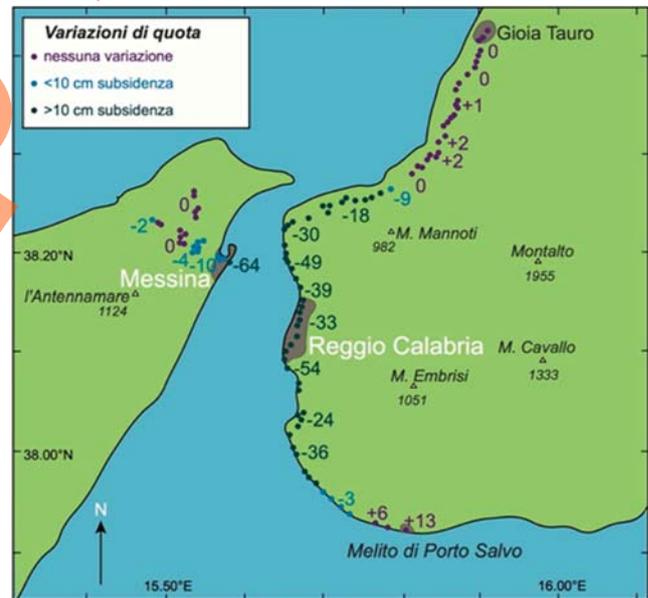


Fig. 3 - Variazioni di quota misurate da Loperfido (1909) a seguito del terremoto del 1908 (in cm). La subsidenza più significativa, certamente di natura tettonica, fu osservata lungo il litorale calabrese, con valori fino a 54 cm. Anche il porto di Messina subì sprofondamenti fino a 70 cm, da ascrivere per lo più a costipazione di depositi superficiali e solo in parte a subsidenza di natura tettonica. - Elevation changes measured by Loperfido (1909) following the 1908 earthquake (in cm). Significant and positively tectonic subsidence was observed along the Calabrian shore, where the land dropped up to 54 cm. Also the port of Messina sank dramatically - up to 70 cm - but in this case much of the drop in elevation was caused by settling of loose shallow deposits. The image is taken from VALENSISE *et alii* (2008).

queste dimensioni. Diversi autori, quindi, proposero che la faglia responsabile del terremoto potesse arrivare in superficie sotto le acque dello Stretto, interessando quindi il fondale marino: una ipotesi basata sulla somiglianza dei livelli di danneggiamento sulle due sponde (si vedano ad es. SCHICK, 1977, e BOTTARI *et alii*, 1986). Inizialmente questa ipotesi sembrò coerente con i risultati ottenuti da BARATTA (1910) il quale, utilizzando il metodo proposto dal sismologo irlandese ROBERT MALLET per localizzare i terremoti sulla base della direzione di caduta dei monumenti, aveva posto l'epicentro in mezzo allo Stretto, di fronte a Reggio Calabria (si veda l'area indicata con "a" in Fig. 1). A conclusioni simili era arrivato anche OMORI (1909) che, utilizzando la stessa metodologia, aveva localizzato nello stesso tratto di mare anche la sorgente del maremoto.

A partire dai primi anni '70 diversi studiosi si cimentarono nell'analisi dei dati strumentali, sismografici e geodetici. Il primo fu SCHICK (1977), il quale propose che il terremoto fosse stato generato da una grande faglia normale orientata N15°E, pendente 70° verso ovest e posta sotto l'asse dello Stretto (si veda la Fig. 4 e la faglia "A" in Fig. 5). Questo modello era però del tutto incompatibile con le variazioni di quota ottenute da LOPERFIDO (1909: Fig. 3), che mostravano un chiaro e sistematico profonda-

mento delle piane costiere su entrambe le sponde dello Stretto e suggerivano un modesto sollevamento delle due catene adiacenti (Aspromonte e Peloritani, rispettivamente sulla sponda calabrese e siciliana).

Negli anni successivi numerosi altri ricercatori utilizzarono le osservazioni di LOPERFIDO (1909) per riprodurre la sorgente del terremoto mediante modelli basati sulla *elastic dislocation theory*, che descrive la deformazione elastica di un corpo - roccioso, in questo caso - sottoposto a sforzo. I primi a usare questo approccio furono MULARGIA & BOSCHI (1983), i quali proposero un modello di sorgente con due faglie parallele orientate N20E° ma pendenti in versi opposti: la principale pendeva verso est con un angolo piuttosto basso (35°: Fig. 4 e "B" in Fig. 5). CAPUANO *et alii* (1988) proposero invece un meccanismo di sorgente basato su una sola faglia orientata N4°W, pendente 39° verso est e caratterizzata da cinematica estensionale con una significativa componente laterale destra (Fig. 4; "D" in Fig. 5).

Sulla base di un approccio lievemente più sofisticato che prevedeva variabilità dello spostamento sul piano di faglia (*variable slip approach*), BOSCHI *et alii* (1989) a loro volta proposero un modello con una singola faglia estensionale pura orientata N11°E e pendente 29° verso est ("E" in Fig. 5).

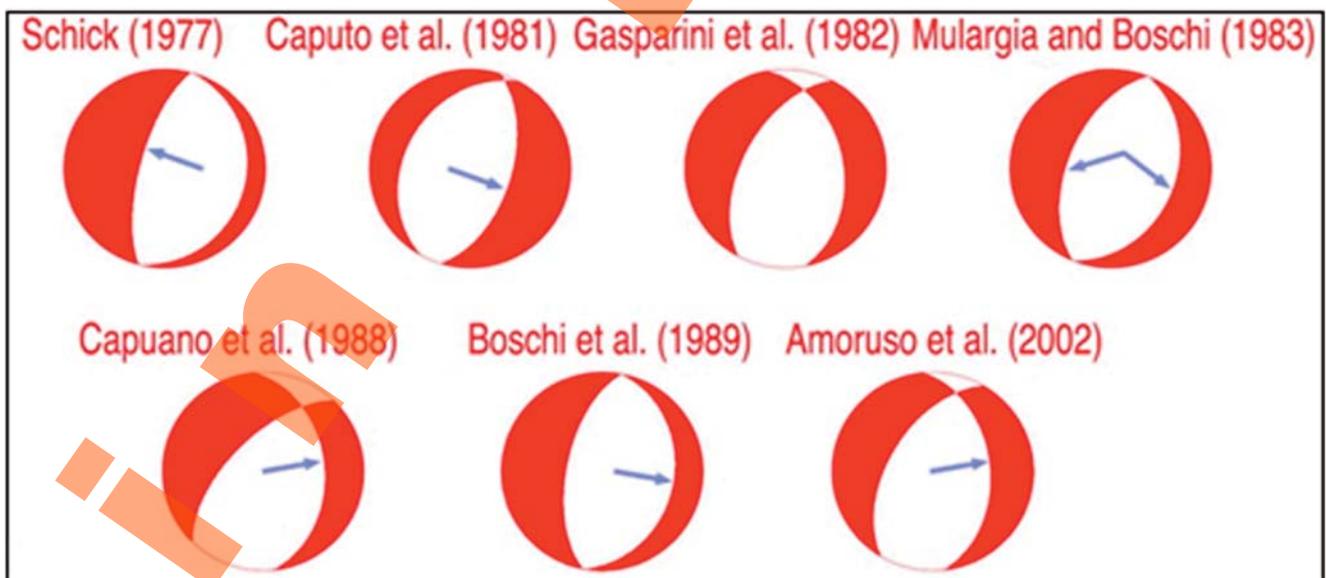


Fig. 4 - Riepilogo delle soluzioni focali disponibili per il piano di faglia che ha causato il terremoto del 1908. Il piano di faglia preferito è indicato da una freccia blu (da PINO *et alii*, 2009).

- Summary of the focal solutions available for the causative fault of the 1908 earthquake. The preferred fault plane is indicated by a blue arrow (from PINO *et alii*, 2009).

Secondo questi autori la fagliazione primaria sismo-genetica avrebbe avuto luogo solo tra 3 e 12 km di profondità e sarebbe stata concentrata in due zone di massimo rilascio di momento sismico: la prima posta vicino all'epicentro proposto da OMORI (1909) e BARATTA (1910) (Fig. 1), la seconda posta invece in prossimità dell'estremità settentrionale della faglia, e quindi dello Stretto. Utilizzando una tecnica simile, DE NATALE & PINGUE (1991; "F" in Fig. 5) identificarono una zona di massimo rilascio di momento sismico quasi coincidente con quella identificata da BOSCHI *et alii* (1989), seppure vincolando la faglia alla stessa orientazione già proposta da CAPUANO *et alii* (1988) (N4°W). A conclusioni simili arrivarono anche AMORUSO *et alii* (2002).

In sintesi, la maggior parte delle soluzioni strumentali ottenute convergeva nell'indicare come sorgente del terremoto un singolo piano di rottura principale pendente verso est ad un angolo decisamente basso per una faglia normale - ovvero sotto i 40° - ed estesa tra i 3-5 e i 12-20 km di profondità, a

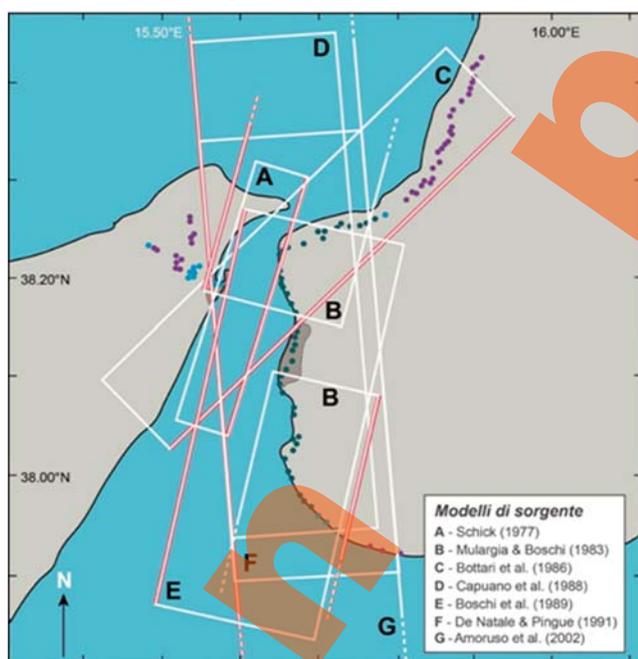


Fig. 5 - Proiezione in superficie dei piani di faglia pubblicati per il terremoto del 1908. Una doppia linea rossa marca il bordo superiore della faglia, indicando quindi il lato opposto a quello della direzione verso cui essa pende (ma si noti che tutte le faglie sono esplicitamente o implicitamente considerate cieche). L'immagine è tratta da VALENSISE *et alii* (2008).

- Surface projection of source models available for the 1908 earthquake. A red line marks the upper edge of the fault, indicating its dip direction (notice that all faults are explicitly or implicitly considered blind). The image is taken from VALENSISE *et alii* (2008).

seconda dei diversi modelli: una soluzione che poteva giustificare anche una totale assenza di rotture in superficie per tale faglia. Si noti che questa ipotesi di sorgente è del tutto coerente anche con la forte asimmetria nella distribuzione del danneggiamento causato dal terremoto del 1908, perché la porzione più profonda della faglia, che rilascia il grosso dell'energia sismica, si trova in larga parte sotto la Calabria, e in parte minore sotto al Mar Ionio (si confrontino le Figg. 1 e 5). Questa configurazione peraltro non esclude che il fondale dello Stretto possa essere stato interessato da rotture cosismiche; tuttavia, come suggeriscono anche i modelli analogici elaborati da BONINI *et alii* (2011), la stessa geometria del piano di rottura principale indica che queste eventuali rotture sarebbero state secondarie rispetto ad esso.

Tuttavia, questa conclusione "di consenso", per così dire, si poneva in marcato contrasto con gli schemi tettonici di questa regione, che tradizionalmente facevano riferimento ad una evoluzione a Graben. In altre parole, lo Stretto è stato spesso visto come una fossa tettonica bordata da faglie gerarchicamente confrontabili su entrambe le sponde (si vedano per esempio GHISSETTI, 1984; MONTENAT *et alii*, 1991; WESTAWAY, 1993; TORTORICI *et alii*, 1995). La gran parte di questi schemi spiegava la formazione dei numerosi terrazzi marini che si osservano su entrambe le sponde dello Stretto come il risultato dell'azione di una gradinata di faglie estensionali secondo il meccanismo del *footwall uplift*, ovvero del sollevamento al letto di faglie estensionali sub-parallele alla costa. Oltre a causare i forti terremoti che avvengono nella zona, queste faglie sarebbero allo stesso tempo responsabili di una significativa estensione dello Stretto, secondo la classica configurazione di un Graben. Tuttavia questa ipotesi è in contrasto con le stesse osservazioni geodetiche di LOPERFIDO (1909: Fig. 3), che mostrano un andamento molto "morbido", al netto di alcuni fenomeni locali, su una estensione di circa 80 km tra Gioia Tauro e Melito di Porto Salvo, e non mostrano alcuna irregolarità nell'attraversare le principali faglie di superficie riportate in letteratura, come la faglia di Reggio Calabria descritta ad esempio da TORTORICI *et alii* (1995).

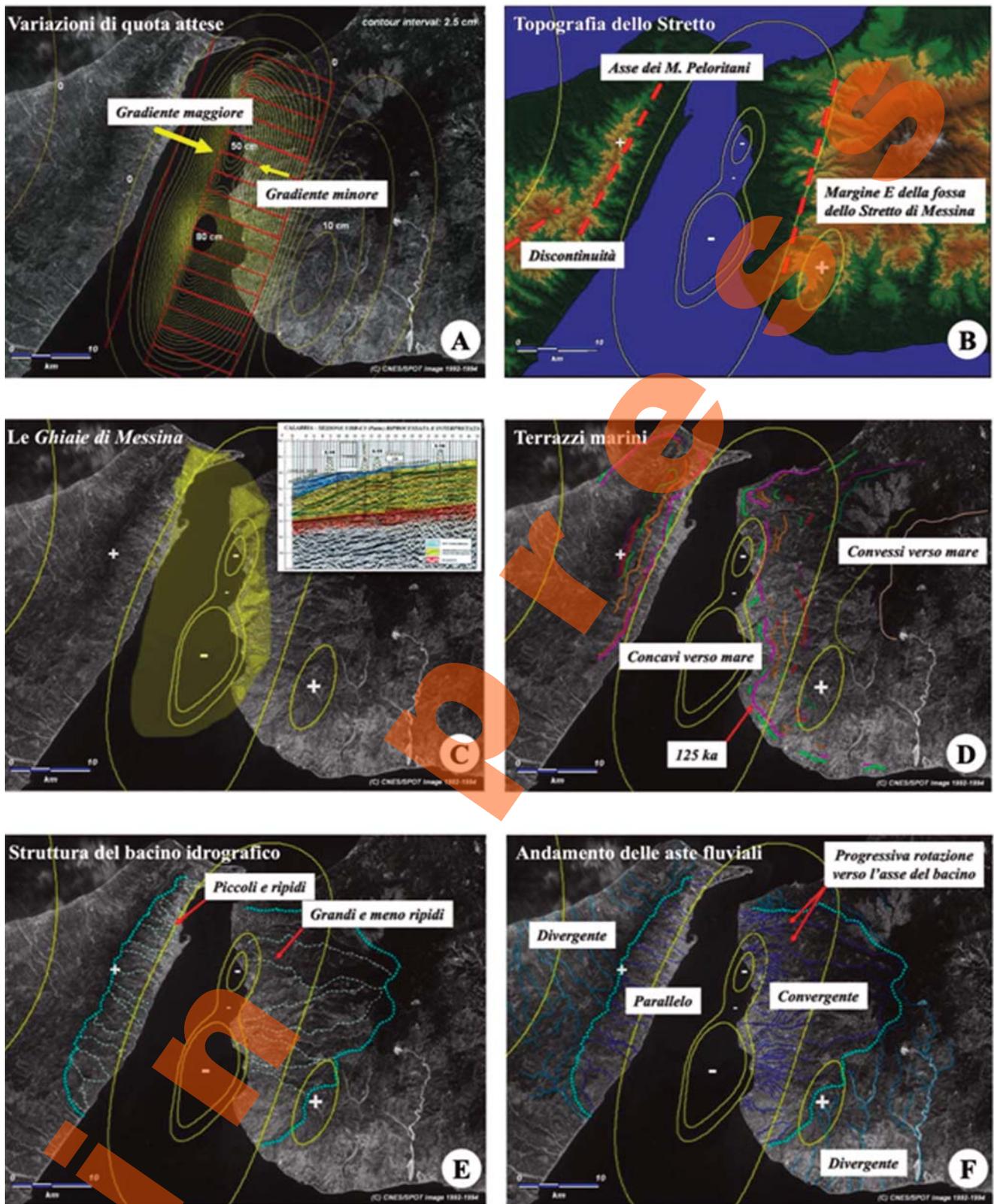


Fig. 6 - Sintesi dei rapporti tra variazioni di quota cosismiche (A) e elementi geologici e geomorfologici selezionati (B-F). Si faccia riferimento al testo per una discussione dei singoli casi presentati.

- Summary of the relationships between coseismic elevation changes (A) and selected geological, geomorphological and landscape features (B-F). Please refer to the text for a discussion of each individual case.

Secondo questa ipotesi, legata strettamente a quello che si può evincere dalla sola geologia di superficie, il terremoto del 1908 non sarebbe necessariamente l'unica manifestazione del campo di sforzi attivo nell'area, che avrebbe portato all'attuale configurazione dello Stretto. Numerose sorgenti sismogenetiche di geometria diversa contribuirebbero a determinare l'assetto strutturale e la sismicità dell'area; una configurazione che a mio avviso già a partire dagli anni '70 - e poi per tutti gli anni '80 - è stata smentita proprio dalle ricerche sul terremoto del 1908, che hanno indicato come responsabile di quell'evento un'unica grande faglia di dimensioni tali da controllare in modo geologicamente *sincrono* l'evoluzione di tutto lo Stretto.

Questa spiacevole contrapposizione tra *geologi* e *sismologi-geofisici* poteva essere ricomposta solo trovando nella stessa geologia di superficie degli indicatori che permettessero di "andare oltre" l'evidenza desumibile dal singolo affioramento, e che recassero invece la firma del segnale generato dall'attività delle faglie sismogenetiche, e dunque per definizione profonde. In altre parole, bisognava trovare il modo di riconciliare l'occorrenza - e quindi necessariamente anche la ricorrenza periodica - del grande terremoto, con quanto si osserva in superficie, o si evince da indagini del sottosuolo.

4. - ANDARE OLTRE: IL CONTROLLO DEI TERREMOTI SULL'EVOLUZIONE DELLA GEOLOGIA E DEL PAESAGGIO NELLE AREE TETTONICAMENTE ATTIVE

A partire dai primi anni '90 il terremoto del 1908 ha iniziato a essere riconsiderato in una chiave che consentisse di interpretarlo congiuntamente al contesto geologico e geodinamico in cui ha avuto luogo. In particolare, VALENSISE & PANTOSTI (1992) hanno tentato di riconciliare il modello di sorgente proposto da BOSCHI *et alii* (1989) con la geologia recente dello Stretto, proponendo che le principali caratteristiche dell'evoluzione strutturale, dei processi sedimentari e del paesaggio fossero

interpretabili come effetto del ripetersi di terremoti del tutto simili a quello del 1908.

Qual era la base teorica e osservativa di questo tentativo di riconciliazione? Già dalla fine degli anni '80 numerose ricerche si erano poste l'obiettivo di "leggere" i dati sismologici in una chiave che ne evidenziasse le possibili implicazioni di natura geologica e geomorfologica, estendendo la scala del tempo da quella del singolo terremoto, la cui ricorrenza si valuta in secoli o millenni, ai tempi caratteristici della Geologia del Quaternario, ad esempio alcune centinaia di migliaia di anni. Dopo le esperienze-pilota rappresentate dallo studio dei terremoti del Fucino del 1915 e dell'Irpinia del 1980, nei quali il movimento della faglia sismogenetica si era manifestato con rotture chiaramente osservabili in superficie, si era passati a valutare quali elementi della geologia di superficie e del paesaggio fossero adatti a registrare anche l'attività ripetuta di una faglia sismogenetica - dunque profonda - priva di espressione superficiale diretta, quale appariva essere quella responsabile del terremoto del 1908. Avvalendosi di casi reali, diversi autori hanno descritto un set di fenomeni geologici certamente e univocamente legati all'azione di una grande faglia attiva, proponendo regole generali che descrivessero questo legame: dapprima in maniera esclusivamente qualitativa, come nel caso di PANTOSTI & VALENSISE (1988) e, in seguito, in modo sempre più quantitativo e rigoroso. Ne sono esempi gli studi di VALENSISE & WARD (1991) sul terremoto di Loma Prieta del 1989; di WARD & VALENSISE (1994) sull'anticlinale di Palos Verdes, una struttura attiva sepolta nell'area urbana di Los Angeles e non associata ad un terremoto noto; di VALENSISE (1995) sull'evoluzione della porzione centrale della Faglia di San Andreas; di CUCCI *et alii* (1996) per l'Appennino meridionale; di BURRATO *et alii* (2003) per l'evoluzione morfotettonica della Pianura Padana; e di VANNOLI *et alii* (2004) per l'evoluzione recente e la sismogenesi lungo la costa della Marche settentrionali.

Il filo conduttore di tutte queste ricerche è che l'andamento e l'entità delle deformazioni indotte dall'azione di una faglia rispondono ad una teoria abbastanza semplice e ben verificata sperimentalmente, ovvero la già citata *elastic dislocation theory* e le sue esten-

sioni ai casi di comportamento non perfettamente elastico del volume crostale deformato. Questa teoria non è utile solo per indagare i rapporti tra il movimento di una faglia in un singolo terremoto e le dislocazioni che essa causa sulla superficie terrestre e che sono registrate da strumenti geodetici, ma anche per comprendere come nel lungo termine quella stessa faglia causa dislocazioni permanenti registrate da *marker* geologici e geomorfologici. In altre parole, con il procedere della dislocazione lungo il piano di faglia, dunque con il ripetersi dei terremoti - ma non necessariamente, perché gli stessi meccanismi operano anche se la faglia si muove in modo asismico - la deformazione delle superficie topografica e di tutti i corpi geologici presenti nell'area sovrastante la faglia stessa si accumula, dando luogo a un *pattern* caratteristico e ben prevedibile. Ad esempio, la teoria predice che una grande faglia estensionale a basso angolo (pendenza $<40^\circ$) produrrà una sinclinale asimmetrica, con il fianco più ripido che pende nella stessa direzione della faglia: nel caso dello Stretto si tratta del versante siciliano, che pende verso est. In superficie si registrerà un marcato sprofondamento nella parte centrale del campo complessivamente deformato, un debole sollevamento del *footwall* (letto) della faglia, e un sollevamento più marcato della porzione distale dell'*hanging-wall* (tetto) della faglia. Si tratta di un *pattern* forse controintuitivo, ma che è ben predetto dalla teoria e osservato sistematicamente per tutti i terremoti generati da una faglia con queste caratteristiche; non solo quello del 1908, per il quale restano incertezze legate alla vetustà dei dati strumentali utilizzati, ma anche per terremoti recenti molto ben documentati, come quello che il 30 ottobre 2016 ha interessato la Piana di Castelluccio e la città di Norcia (M_w 6.5: si veda ad esempio la discussione presentata in BONINI *et alii*, 2019).

5. - UN TERREMOTO CHE “APPARTIENE” ALLO STRETTO DI MESSINA

Dal punto di vista operativo, il primo passo da compiere è quello di individuare elementi geologici e morfologici che si prestino ad essere utilizzati per

indagare le caratteristiche delle strutture attive presenti nell'area di interesse. La scelta di tali elementi è determinata caso per caso dalla disponibilità di orizzonti sedimentari recenti, dalle caratteristiche del reticolo idrografico, dall'esistenza di rocce competenti deformate durante cicli tettonici diversi dall'attuale, dalla vicinanza del mare e quindi dalla possibile esistenza di terrazzi marini, evidenza di antiche linee di riva utilizzabili come superfici di riferimento. Entrando più nel dettaglio, questi elementi si dividono in tre categorie fondamentali:

a) forme del paesaggio che definiscono superfici di geometria iniziale nota e di età stimabile con buona approssimazione (ad esempio, linee di riva sollevate e terrazzi marini associati, linee di riva e terrazzi lacustri, allineamenti di tracce di modellazione in ambiente costiero);

b) depositi sedimentari che definiscono superfici di forma iniziale nota e di età stimabile con buona approssimazione (ad esempio, sedimenti marini di ambiente non costiero deposti su un basamento suborizzontale, depositi lacustri fini, sequenze di *fan-delta*);

c) andamento e caratteri generali del reticolo idrografico, quali il passaggio da comportamento erosivo a comportamento prevalentemente deposizionale, la morfologia generale dei bacini idrografici, le direzioni di massimo richiamo, eventuali fenomeni di rotazione delle aste fluviali e di antecedenza.

È intuitivo che l'approccio così sinteticamente tratteggiato funziona al meglio nell'indagine di faglie con componente verticale del moto dominante, ovvero di faglie *dip-slip* o quantomeno oblique; queste, a differenza delle faglie trascorrenti, creano sempre significativi contrasti topografici, mettendo in moto la catena di fenomeni geologici descritti ai punti a), b) e c). L'identificazione di eventuali componenti orizzontali del campo di deformazione tettonica è decisamente più ardua, per cui se si volesse indagare una faglia a presumibile movimento obliquo si continuerebbe a cercare di metterne in evidenza gli effetti di deformazione verticale, anche se subordinati.

Sia lo Stretto di Messina, sia l'adiacente Piana di Gioia Tauro rappresentano casi particolarmente favorevoli perché, in entrambe le aree, si ritrovano elementi riconducibili alle tre diverse categorie elencate,



Fig. 7 - Modello evolutivo complessivo dell'area dello Stretto. Al sollevamento complessivo della catena (freccie rosse), si contrappone localmente lo sprofondamento causato dall'attività della Faglia dello Stretto (a destra nell'immagine) e della Faglia della Piana di Gioia Tauro (a sinistra); dettagli su quest'ultima faglia possono essere desunti da VALENSISE & D'ADDEZIO (1994) e da DISS WORKING GROUP (2018). Viene mostrata schematicamente anche l'evoluzione del reticolo idrografico, attraverso la progressiva rotazione di tre fiumare che originano in punti molto vicini tra loro sul fianco NW dell'Aspromonte, ma sfociano in punti molto diversi della costa, rispondendo al richiamo prodotto dal progressivo approfondirsi di due grandi depocentri attivi, a loro volta controllati dalle due principali faglie attive della zona.

- Global evolutionary model of the Straits area. The uplift of the chain (red arrows), which takes place at rates up to 2.0 mm/y, is locally compensated by the sinking caused by the activity of the Messina Straits fault (to the right) and of the Gioia Tauro Plain fault (to the left); details on the latter fault can be obtained from VALENSISE & D'ADDEZIO (1994) and from DISS WORKING GROUP (2018). The evolution of the hydrographic network is schematically shown by the progressive rotation of three streams that originate from the same general area on the NW flank of the Aspromonte, but then flow into very different directions, in response to the progressive development of two large active depocentres, which in their turn are controlled by the two main active faults in the area.

e sono quindi possibili raffronti e verifiche incrociate. Del resto, tutti gli elementi descritti sotto le tre categorie hanno una risposta sincrona e congruente alle stesse sollecitazioni di carattere tettonico, e particolarmente alle variazioni di natura altimetrica. Ad esempio, il progressivo sprofondamento di un bacino ad opera di una faglia normale produrrà contemporaneamente richiamo del drenaggio e basculamento delle rocce affioranti sui fianchi della depressione verso la sua zona assiale, mentre eventuali linee di riva incise sui fianchi del bacino potranno essere portate a quote diverse in funzione della loro distanza dal centro di sprofondamento (questo tema verrà ripreso nella sezione successiva).

Fatte queste premesse si può passare ad esaminare nel dettaglio la Fig. 6, la quale nel pannello (A) mostra un modello semplificato di variazioni di quota cosismiche, ovvero generate dal terremoto del

1908, basandosi su un modello di faglia proposto dal DISS WORKING GROUP (2018) sulla base di quello originario di BOSCHI *et alii* (1989). Nei pannelli successivi (B-F) si mostra invece come i diversi elementi appaiono adattarsi al ripetersi dei terremoti, e quindi al procedere della deformazione tettonica. Si noti che i pannelli (B-F) riportano in forma semplificata i due depocentri creati dal terremoto: quello meridionale, che avrebbe visto un abbassamento cosmico fino a 80 cm e che include il punto in cui gli studiosi di inizio '900 hanno localizzato l'epicentro del terremoto (*a* in Fig. 1), e quello settentrionale, che avrebbe causato un abbassamento fino a 50 cm. Si noti anche che i due depocentri sono certamente più estesi verso WNW, ovvero verso la costa siciliana, ma la limitata risoluzione dei dati geodetici disponibili non consente di vincolarne correttamente la dimensione in direzione ortogonale all'asse della

faglia. L'immagine è racchiusa da un ampio ovale allungato per circa 60 km in direzione NNE-SSW, che può essere vista come la *linea di zero* della dislocazione verticale cosismica: tutto il territorio che ricade all'interno di questo ovale si è abbassato, mentre in un'ampia fascia posta al suo esterno si è registrato un movimento pressoché nullo o un sollevamento di entità variabile, ma non superiore ai 15-20 cm.

Rispetto a questo modello si osserva che (tra parentesi il pannello preso in considerazione):

(B) la *topografia dello Stretto* si conforma al modello sui tre lati (Aspromonte, Peloritani, chiusura nord dello Stretto);

(C) la *distribuzione delle Ghiaie di Messina*, un deposito molto caratteristico dell'area dello Stretto formato da ciottoli clinostratificati e progradanti verso l'asse dell'area più depressa, riproduce fedelmente l'area di massimo sprofondamento, quindi di massimo richiamo deposizionale. Le Ghiaie sono invece assenti nelle zone soggette a sollevamento cosismico, o perché mai deposte, o perché erose;

(D) i *terrazzi marini*, il cui andamento è stato ricostruito da vari autori, mostrano un comportamento duplice: quelli a quote più basse sembrano "abbracciare" l'area di massimo sprofondamento, mostrando una convessità verso ESE. A loro volta quelli più alti, troppo lontani dalla faglia per risentire della sua attività, mostrano una convessità verso WNW, apparentemente in risposta al sollevamento in blocco di tutto il massiccio dell'Aspromonte;

(E, F) l'*andamento del reticolo idrografico* denuncia un chiaro adattamento al progressivo sprofondamento dell'area assiale dello Stretto; sul versante calabrese alcune delle fiumare principali mostrano nella loro porzione terminale delle rotazioni che sembrano accompagnare la progressiva identificazione dei due depocentri e che sarebbe difficile spiegare con motivazioni di altra natura (ad esempio con disomogeneità litologiche). Il fenomeno è particolarmente evidente tra la Catona e Archi, nella porzione settentrionale dello Stretto, e tra la zona di Ravagnese-Aeroporto di Reggio e Pèllaro, nella porzione meridionale.

Tutte le evidenze discusse sono state interpretate da VALENSISE & PANTOSTI (1992) come prova di un

comportamento caratteristico (sensu SCHWARTZ & COPPERSMITH, 1984) della faglia responsabile del terremoto del 1908; un evento che avrebbe una forte tendenza a ripetere sé stesso con modalità ricorrenti, al punto da rendere la topografia, la geologia e la geomorfologia della regione che sovrasta la faglia molto simile alla distribuzione delle variazioni di quota causate da ogni singolo terremoto.

La fig. 7 mostra una sintesi estrema dei movimenti verticali che dominano nello Stretto di Messina, e che ne giustificano l'evoluzione recente e l'aspetto attuale. Il *sollevamento* a scala regionale e lo *sprofondamento* in corrispondenza delle aree sovrastanti le due grandi faglie attive, tra le più grandi di cui si abbia conoscenza in Italia, si sommano algebricamente, luogo per luogo: ma quale dei due processi avrà la meglio?

6. - UNO SGUARDO AL FUTURO DELLO STRETTO DI MESSINA

Si dice spesso che il compito principale del geologo, e particolarmente di quello che opera nel campo dei rischi naturali, consiste nel "ribaltare sul futuro la storia passata", per poter fare predizioni che siano solidamente ancorate a quello che ci insegnano i dati di terreno: tutto questo nel rispetto sia dei concetti fondamentali enunciati dai padri della Geologia, sia dei principi fisici che presiedono all'evoluzione dei processi geologici. Lo Stretto di Messina è certamente uno dei luoghi del pianeta in cui queste affermazioni assumono maggior concretezza e rilevanza socio-economica.

Iniziamo quindi dalla questione lasciata in sospeso alla fine della sezione precedente: tra i due processi in competizione - il sollevamento complessivo di tutta la regione e lo sprofondamento che si localizza nello Stretto e al di sotto della Piana di Gioia Tauro - quale è destinato a prevalere? Potremmo scoprirlo raccogliendo tutte le numerose stime disponibili per la velocità dei due processi e confrontandole, ma esiste un modo più semplice, immediato e strettamente geologico per ottenere comunque la risposta cercata. La fig. 8 mostra l'evoluzione delle

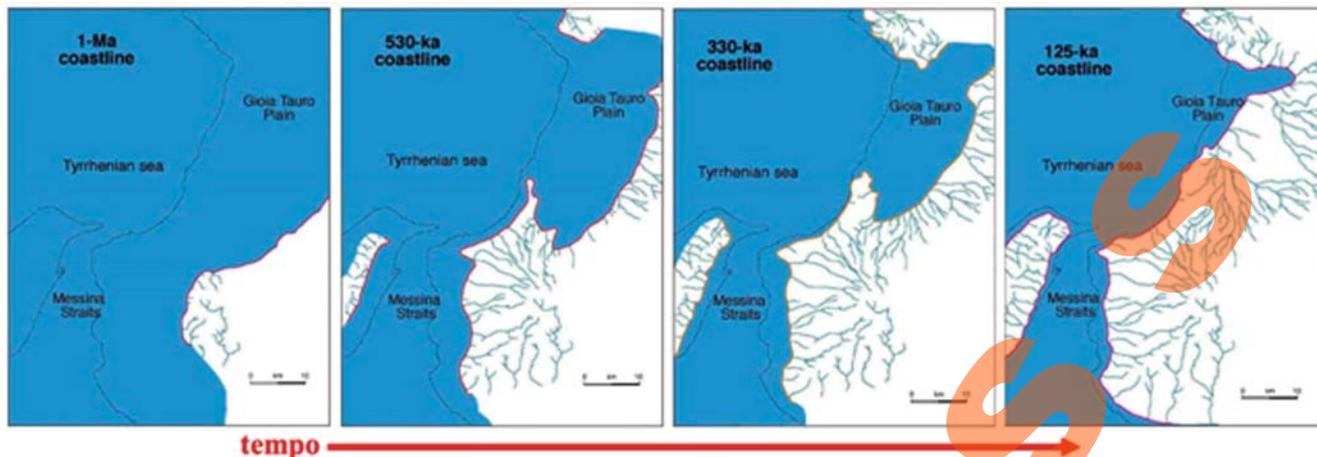


Fig. 8 - Evoluzione delle linee di riva dell'area compresa tra la Piana di Gioia Tauro e lo Stretto di Messina tra circa un milione di anni fa e il Tirreniano (125.000 anni circa: dati tratti da MIYAUCHI *et alii*, 1994, da VALENSISE & D'ADDEZIO, 1994, e da letteratura precedente citata in questi articoli).

- Evolution of fossil shorelines in the area between the Piana di Gioia Tauro and the Straits of Messina. The shorelines are dated from about a million years to about 125 Ky ago (data taken from MIYAUCHI *et alii*, 1994, from VALENSISE & D'ADDEZIO, 1994, and from previous literature cited in these articles).

linee di riva cartografate da generazioni di studiosi nello Stretto di Messina e nella Piana di Gioia Tauro. La ricostruzione e datazione del terrazzo tirreniano, quello risalente a circa 125.000 anni fa (pannello di destra), è abbastanza solida, mentre per i terrazzi più antichi la letteratura mostra una certa variabilità. Ma nonostante questo, l'evidenza dei fenomeni geologici in atto è molto chiara, ed è riconducibile ai già ricordati due processi: a) il costante sollevamento dell'Aspromonte, che si ritiene iniziato tra 700.000 e un milione di anni fa, e che ha progressivamente aumentato la superficie emersa e la quota dei rilievi; e b) l'attività delle due grandi faglie est-pendenti che esistono al di sotto della Piana di Gioia Tauro e dello Stretto di Messina, tragicamente testimoniata dai terremoti rispettivamente del 5 febbraio 1783 e del 28 dicembre 1908, che si manifesta come un processo che rallenta localmente questo sollevamento.

La fig. 8 documenta con immediatezza gli effetti nel tempo di questo meccanismo complessivo: a) prima di tutto evidenziando una differenza di stile tra i due bacini, che evidentemente partivano da quote strutturali diverse, tali per cui mentre lo Stretto di Messina è ancora occupato dal mare, la Piana di Gioia Tauro è ormai del tutto emersa; e poi b) mostrando che la velocità del sollevamento regionale, che si stima possa arrivare a 2,0 mm/anno, prevale decisamente rispetto alla velocità dello sprofondamento causato dall'attività delle grandi faglie che si

trovano al di sotto dei due bacini. Ne è testimonianza incontrovertibile il progressivo avanzamento delle linee di riva sui due lati dello Stretto.

Da queste osservazioni discende una conclusione che sarebbe arduo contestare: nello Stretto di Messina, il cui punto più profondo si trova oggi a circa 120 m di profondità, entro i prossimi 150.000 si potrebbe creare un ponte continentale simile a quello che si ritiene esistesse intorno a 18.000 anni fa, nel picco della glaciazione Würmiana, quando il livello del mare era oltre 120 m più basso dell'attuale. Questa circostanza renderebbe possibile attraversare lo Stretto a piedi e senza realizzare alcuna opera *ad hoc*. Si noti che l'emersione dello Stretto avverrebbe non per avvicinamento delle due masse corrispondenti ai Peloritani e all'Aspromonte - che in realtà non hanno mai smesso di allontanarsi, almeno da quando esiste la Faglia dello Stretto - ma solo grazie al progressivo sollevamento del fondale: questo ovviamente resta vero a meno di una repentina riduzione di velocità del sollevamento, uno scenario peraltro molto improbabile dal punto di vista geodinamico.

Semplici osservazioni geologiche, dunque, dimostrano che la velocità con cui la Faglia dello Stretto produce lo sprofondamento dell'asse dello Stretto, che a sua volta è proporzionale allo *slip rate* della stessa faglia, è largamente inferiore alla velocità con cui il sollevamento sta procedendo. Si tratta di un risultato di per sé già importante, ma ovviamente solo la cono-

scenza dello *slip rate* ci può dare indicazioni sulla frequenza con cui questa faglia può generare forti terremoti. Tuttavia, trattandosi di una faglia cieca, difficilmente questo parametro potrà essere valutato direttamente con i metodi della Paleosismologia.

Per stimare lo *slip rate* della Faglia dello Stretto,

seppure in modo indiretto, VALENSISE & PANTOSTI (1992) hanno ricostruito in dettaglio la quota della linea di riva tirreniana tra Scilla e Lazzaro, ai due estremi dello Stretto (Fig. 9, pannello inferiore). Secondo la loro analisi, questa linea di riva varia in quota tra 100 e 170 m circa, valori che corrispon-

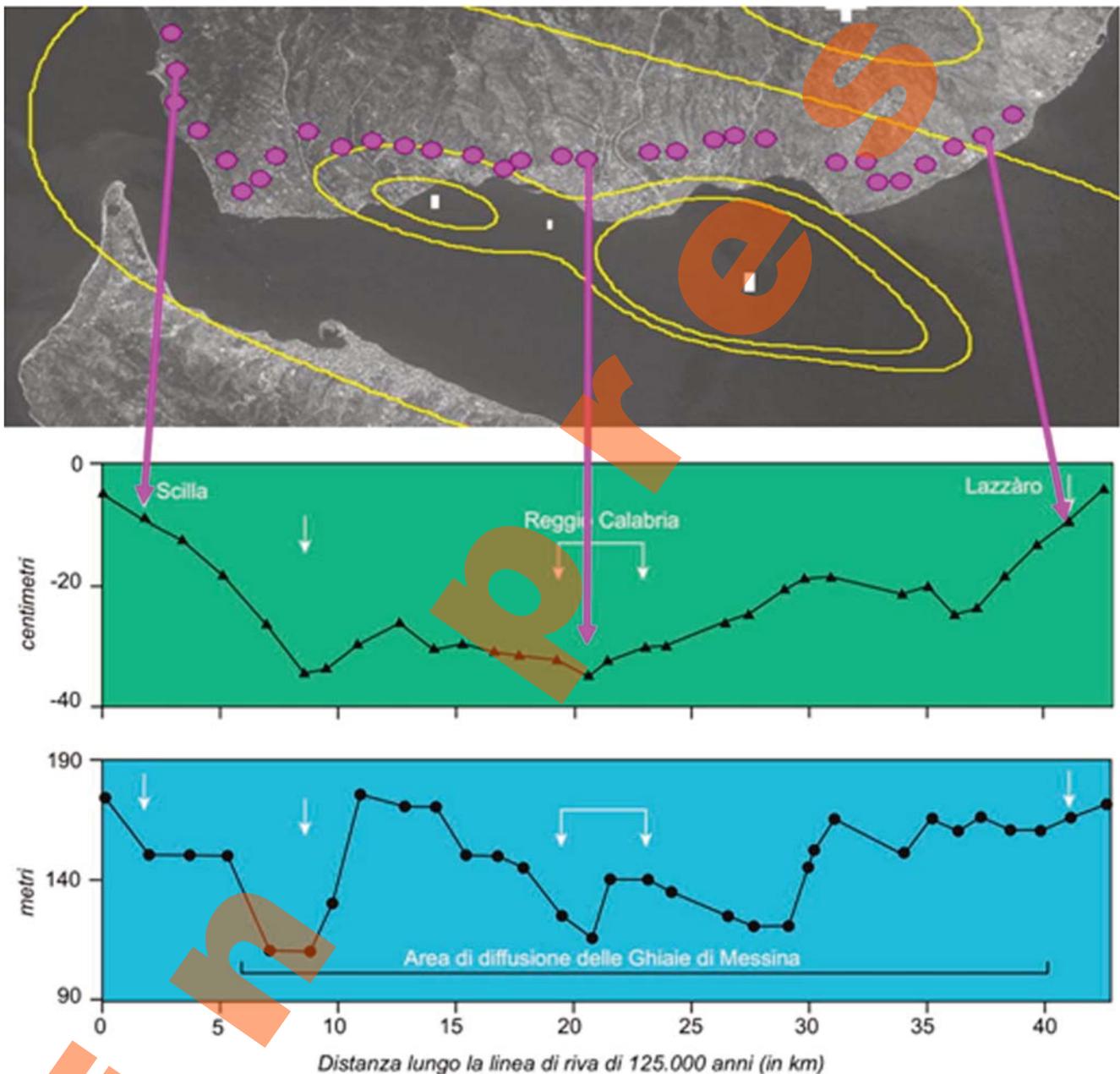


Fig. 9 - Confronto tra la subsidenza causata dal terremoto del 1908 lungo un transetto di costa che va da Scilla, a nord dello Stretto, fino a Lazzaro, nella parte meridionale (pannelli in alto e al centro), e la quota del terrazzo marino tirreniano lungo lo stesso transetto (pannello in basso). I pannelli centrale e inferiore sono tratti da VALENSISE & PANTOSTI (1992). Si faccia riferimento anche ai pannelli (A) e (D) della fig. 6.

- Comparison of the subsidence caused by the earthquake of 1908 along the coastline stretching from Scilla, located just north of the Straits, up to Lazzaro, in the southern part of the Straits (top and center panels), and the elevation of the 125 Ky marine terrace along the same transect (bottom panel). The center and bottom panels are from VALENSISE & PANTOSTI, (1992). Refer also to panels (A) and (D) in Fig. 6.

dono a tassi di sollevamento tra 0,9 e 1,4 mm/anno. Gli stessi autori hanno anche mostrato che la quota attuale di questo importante *marker* geologico si accorda con l'andamento della subsidenza indotta dal terremoto del 1908 lungo la sponda calabrese dello Stretto (Fig. 9, pannello centrale). Ne hanno concluso che le variazioni di quota della linea di riva di 125.000 anni fa sono il risultato del ripetersi di eventi di dislocazione, ovvero terremoti, lungo la Faglia dello Stretto: la linea di riva tirreniana e più bassa nei punti in cui si avvicina alla regione di massima subsidenza osservata nel 1908, e più alta nelle aree che ricadono al di fuori della zona interessata dalla faglia stessa, ovvero alle estremità dello Stretto e al di fuori di esso. In altre parole, la quota attuale della linea di riva sarebbe per così dire "modulata" dalla sua maggiore o minore vicinanza alla Faglia dello Stretto. Questa circostanza, unita all'assenza di repentine variazioni di quota nell'andamento di questa linea di riva, è anche un'importante indicazione del fatto che nessuna delle diverse faglie che intercettano la linea di riva tirreniana, come la faglia di Reggio Calabria descritta da TORTORICI *et alii* (1995), è stata attiva in modo significativo tra l'epoca di formazione della linea di riva stessa e l'attuale: diversamente, essa risulterebbe interrotta e dislocata in maniera brusca e chiaramente riconoscibile. Questa conclusione è avvalorata dall'assenza di scalini nell'andamento della subsidenza indotta dal terremoto all'attraversamento di queste faglie, dalle osservazioni di Loperfido (1909), e dall'assenza di evidenze di riattivazione a seguito del terremoto del 1908 (CACIAGLI, 2008; COMERCII *et alii*, 2015, 2020). Le faglie di superficie dello Stretto hanno quindi un ruolo marginale nella sua evoluzione strutturale recente; dunque non possono avere un ruolo di rilievo nella costruzione del paesaggio, e tantomeno nei processi sismogenetici.

Questa elaborazione ha consentito a VALENSISE & PANTOSTI (1992) di stimare un intervallo di ricorrenza di circa 1.000 anni per eventi tipo 1908, seppure con una forchetta di incertezza che va da 500 a 1.330 anni. Un intervallo lungo, a fronte della apparentemente elevata sismicità della Calabria, e che allontana molto nel tempo il verificarsi di una nuova catastrofe come quella del 1908; ma congruente sia

con la assenza di terremoti simili al 1908 nel record storico disponibile (GUIDOBONI *et alii*, 2008), sia con alcune evidenze archeo-sismologiche (GUIDOBONI *et alii*, 2000), secondo le quali nella seconda metà del quarto secolo si sarebbe verificato un terremoto di dimensioni paragonabili a quelle del 1908. Considerato che il valore medio della dislocazione cosismica stimata per il terremoto del 1908 è pari a 1,4 m, questo intervallo di ricorrenza porta a stimare uno *slip rate* medio di 1,4 mm/a, corrispondente a una velocità di subsidenza massima di 0,7 mm/a per la geometria della faglia data.

Se tutte queste stime sono corrette, e se la Faglia dello Stretto è attiva da meno di un milione di anni, come indirettamente confermato da MONACO *et alii* (1996), ci si aspetterebbe di vedere morfologie correlate all'attività della faglia con un rilievo topografico massimo di circa 700 m. Invece, sia il rilievo topografico osservato tra i due lati dello Stretto e la sua porzione offshore, sia il rilievo strutturale del basamento cristallino sono superiori a 2.500 m. Solo una piccola parte di questo rilievo può essere spiegata dal sollevamento dell'intera regione che, secondo BORDONI & VALENSISE (1998), ha una lunghezza d'onda dell'ordine di 100 km e presenta un culmine proprio allo Stretto di Messina. Se ne deduce che l'accordo tra la presenza di una grande faglia normale al di sotto dello Stretto di Messina e la sua configurazione a Graben è in parte fortuita. Dati di sismica a riflessione di buona qualità (CERNOBORI *et alii*, 1996) mostrano infatti che l'area dello Stretto coincide con una fossa tettonica tardo-miocenica orientata da N-S a NE-SW. Ne consegue che la depressione strutturale che separa la Sicilia dall'Italia continentale, e che ha come evidenza in superficie proprio le faglie minori dello Stretto, come la già ricordata Faglia di Reggio Calabria, esisteva ben prima della nascita della faglia del 1908: un fenomeno ricorrente in molte aree sismiche italiane, tanto da essere descritto come *mimicking* in VALENSISE & PANTOSTI (2001).

Quella che abbiamo narrato è una storia geologica affascinante e molto articolata, ed è anche un formidabile esempio di come l'evoluzione geologica sia strettamente legata all'evoluzione di un paesaggio

straordinario come quello dello Stretto di Messina. Ma è anche una storia che sarebbe stato difficile narrare senza poter contare su tutto ciò che abbiamo appreso dal terremoto del 1908, e in particolare dalla ricca documentazione prodotta ed elaborata da un gruppo di pionieri delle Scienze della Terra; un patrimonio unico che la storia ci ha trasferito perché potessimo trarne vantaggio ai nostri giorni.

BIBLIOGRAFIA

- AMORUSO A., CRESCENTINI L. & SCARPA R. (2002) - *Source parameters of the 1908 Messina Straits, Italy, earthquake from geodetic and seismic data*. J. Geophys. Res., **107** (B4), 2080; doi: 10.1029/2001JB000434.
- BARATTA M. (1901) - *I Terremoti d'Italia*. Saggio di Storia, Geografia e Bibliografia Sismica Italiana con 136 sismocartogrammi. Torino, 950 pp.
- BARATTA M. (1910) - *La catastrofe sismica calabro-messinese 28 dicembre 1908*. Relazione. Soc. Geogr. It., Roma, 2 voll., 458 p., con 30 tavv. alla fine del volume e 26 ripiegate nel volume. Ristampa anastatica a cura di Forni Editore, Sala Bolognese.
- BERTOLASO G., BOSCHI E., GUIDOBONI E. & VALENSISE G. (2008) - *Il terremoto e il maremoto del 28 dicembre 1908*. INGV e SGA Storia Geofisica Ambiente, ISBN-13: 978-88-852-13-15-9, 813 pp., con DVD-ROM: liberamente scaricabile dal CFTILab, Laboratorio Avanzato di Sismologia Storica: <http://www.cftilab.it/index.php/it/gli-scaffali/pubblicazioni/libri/7-il-terremoto-e-il-maremoto-del-28-dicembre-1908>.
- BONINI L., DI BUCCI D., TOSCANI G., SENO S. & VALENSISE G. (2011) - *Reconciling deep seismogenic and shallow active faults through analogue modelling: the case of the Messina Straits (southern Italy)*. J. Geol. Soc. London, **168**(1), 191-199.
- BONINI L., BASILI R., BURRATO P., CANNELLI V., FRACASSI U., MAESANO F.E., MELINI D., TARABUSI G., TIBERTI M.M., VANNOLI P. & VALENSISE G. (2019) - *Testing different tectonic models for the source of the Mw 6.5, 30 October 2016, Norcia earthquake (central Italy): A youthful normal fault, or negative inversion of an old thrust?* Tectonics, **38**(3), 990-1.017, <https://doi.org/10.1029/2018TC005185>.
- BORDONI P. & VALENSISE G. (1998) - *Deformation of the 125 ka marine terrace in Italy: tectonic implications*. In: *Coastal Tectonics*, a cura di I. S. STEWART e C. VITA-FINZI, Geological Society of London, Special Publications, 146, Londra, 71-110.
- BOSCHI E., PANTOSTI D. & VALENSISE G. (1989) - *Modello di sorgente per il terremoto di Messina del 1908 ed evoluzione recente dell'area dello Stretto*. Atti VIII Convegno G.N.G.T.S., Roma, 245-258.
- BOTTARI A., CARAPEZZA E., CARAPEZZA M., CARVENI P., CEFALI F., LO GIUDICE E. & PANDOLFO C. (1986) - *The 1908 Messina Strait earthquake in the regional geostructural framework*. J. of Geodynamics **5**, 275-302.
- BURRATO P., CIUCCI F. & VALENSISE G. (2003) - *An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*. Ann. Geophys., **46**(5), 865-882.
- CACIAGLI M. (2008) - *Le tracce del terremoto del 1908 nell'ambiente naturale*. In: BERTOLASO G., BOSCHI E., GUIDOBONI E., VALENSISE G., "Il terremoto e il maremoto del 28 dicembre 1908", edito da INGV e SGA Storia Geofisica Ambiente, 197-214.
- CAPUANO P., DE NATALE G., GASPARINI P., PINGUE F. & SCARPA R. (1988) - *A model for the 1908 Messina Straits (Italy) earthquake by inversion of leveling data*. Bull. Seismol. Soc. Am., **78**, 1.930-1.947.
- CERNOBORI L., HIRN H., MCBRIDE J.H., NICOLICH R., PETRONIO M., ROMANELLI M., STREAMERS PROFILE WORKING GROUP (1996) - *Crustal image of the Ionian basin and its Calabrian margins*. Tectonophysics, **264**, 175-189.
- COMERCI V., VITTORI E., BLUMETTI A.M., BRUSTIA E., DI MANNA P., GUERRIERI L., LUCARINI M. & SERVA L. (2020) - *Gli effetti tettonici del terremoto del 28 dicembre 1908 dalle fonti coeve*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **107**, pp. 427-440.
- COMERCI V., VITTORI E., BLUMETTI A.M., BRUSTIA E., DI MANNA P., GUERRIERI L., LUCARINI M. & SERVA L. (2015) - *Environmental effects of the December 28, 1908, Southern Calabria-Messina (Southern Italy) earthquake*. Nat. Hazards, **76**, 1849-1891, <https://doi.org/10.1007/s11069014-1573-x>.
- CUCCI L., D'ADDEZIO G., VALENSISE G. & BURRATO P. (1996) - *Investigating seismogenic faults in central and southern Apennines (Italy): modeling of fault related landscape features*. Annali di Geofisica, **94**, 603-618.
- DE NATALE G. & PINGUE F. (1991) - *A variable slip fault model for the 1908 Messina Straits (Italy) earthquake, by inversion of leveling data*. Geophys. J. Int., **104**, 73-84.
- DISS WORKING GROUP (2018) - *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, doi: 10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.
- FIAMMENGHI G., VULLO E., BRANCALEONI F., DIANA G., JAMIOLKOWSKI M., FACCIOLI E., VALENSISE G., SOLARI G., SŁUSZKA P. & GIMSING N.J. (2009) - *Messina Strait Bridge - The Challenge and the Dream*. Taylor & Francis Ltd, 334 pp., ISBN: 0415468140.
- FORCE E.R. & MCFADGEN B.G. (2012) - *Influences of active tectonism on human development*. In: GIOSAN L. et alii (a cura di), *Climates, Landscapes, and Civilizations*, <https://doi.org/10.1029/2012GM001215>.
- GHISETTI F. (1984) - *Recent deformations and the seismogenic source in the Messina Strait (Southern Italy)*. Tectonophysics, **109**, 191-208.
- GUIDOBONI E., MUGGIA A. & VALENSISE G. (2000) - *Aims and methods in territorial archaeology: possible clues to a strong fourth-century AD earthquake in the Straits of Messina (southern Italy)*. In: *The Archaeology of Geological Catastrophes*, a cura di W. J. MCGUIRE, D. R. GRIFFITHS, P. L. HANCOCK e I. S. STEWART,

- Geological Society, London, Special Publications, 171), Londra, 45-70.
- GUIDOBONI E., FERRARI G., MARIOTTI D., COMASTRI A., TARABUSI G., SGATTONI G. & VALENSISE G. (2018) - *CFI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*, <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>. Consultabile al sito: <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>.
- GUIDOBONI E., FERRARI G., TARABUSI G., SGATTONI G., COMASTRI A., MARIOTTI D., CIUCCARELLI C., BIANCHI M.G. & VALENSISE G. (2019) - *CFI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area*. Sci. Data, **6**, article number: 80, <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>.
- MERCALLI G. (1909) - *Contributo allo studio del terremoto calabro-messinese del 28 dicembre 1908*. Atti del Reale Istituto d'Incoraggiamento di Napoli, 249-292 serie 6, 7.
- MIYAUCHI T., DAI PRA G. & SYLOS LABINI S. (1994) - *Geochronology of Pleistocene marine terraces and regional tectonics in the Tyrrhenian coast of South Calabria*. Il Quaternario, **7** (1), 17-34.
- MONACO C., TORTORICI L., NICOLICH R., CERNOBORI L. & COSTA M. (1996) - *From collisional to rifted basins: an example from the southern Calabrian arc (Italy)*. Tectonophysics, **266**, 233-249.
- MONTENAT C., BARRIER P. & OTT D'ESTEVOU P. (1991) - *Some aspects of the recent tectonics in the Strait of Messina, Italy*. Tectonophysics, **194**, 203-215.
- MULARGIA F. & BOSCHI E. (1983) - *The 1908 Messina earthquake and related seismicity*. In *Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation*, ed. H. KANAMORI & E. BOSCHI, 493-518. Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi, course 85. Amsterdam and New York: Elsevier.
- OMORI F. (1909) - *Preliminary report on the Messina-Reggio earthquake of Dec. 28, 1908*. Bull. Imperial Earth. Invest. Comm., 3-2, 37-46.
- PANTOSTI D. & VALENSISE G. (1988) - *La faglia sud-appenninica: identificazione oggettiva di un lineamento sismogenetico nell'Appennino meridionale*, Atti VII Convegno G.N.G.T.S., Roma 1988, 205-220.
- PINO N.A., PIATANESI A., VALENSISE G. & BOSCHI E. (2009) - *The 28 December 1908 Messina Straits earthquake (M_W 7.1): a great earthquake throughout a century of seismology*. Seismol. Res. Lett. **80** (2), pp. 243-259, <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.2.243>.
- SCHICK R. (1977) - *Eine seismotektonische Bearbeitung des Erdbebens von Messina im Jahre 1908*. Geologisches Jahrbuch, Reihe E **11**, 74 pp.
- SCHWARTZ D.P. & COPPERSMITH K.J. (1984) - *Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones*. J. Geophys. Res., **89**, 5681-5698.
- TORTORICI L., MONACO C., TANSI C. & COCINA O. (1995) - *Recent and active tectonics in the Calabrian arc (Southern Italy)*. Tectonophysics **243**, 37-55.
- VALENSISE G. (1994) - *Geologic assessment of the relative contribution of strike-slip faulting, reverse-slip faulting and bulk squeezing in the creation of the Central Santa Cruz Mountains, California*. U.S. Geological Survey Professional Papers, 1550 F, 23-47.
- VALENSISE G. (2019) - *Fusakichi Omori and Italy: excerpts from the visits of a Japanese seismologist in the Belpaese*. Historia Scientiarum, **28**(3), 258-277.
- VALENSISE G. & D'ADDEZIO G. (1994) - *Il contributo della geologia di superficie all'identificazione delle strutture sismogenetiche della Piana di Gioia Tauro*, Pubblicazione I.N.G., **559**, 34 pp..
- VALENSISE G. & PANTOSTI D. (1992) - *A 125-Kyr-long geological record of seismic source repeatability: the Messina Straits (southern Italy) and the 1908 earthquake (MS 7 1/2)*. Terra Nova **4**, 472-483.
- VALENSISE G. & PANTOSTI D. (2001) - *The investigation of potential earthquake sources in peninsular Italy: a review*. J. Seismol., **5**(3), 287-306.
- VALENSISE G., BASILI R. & BURRATO P. (2008) - *La sorgente del terremoto del 1908 nel quadro sismotettonico dello Stretto di Messina*. In: BERTOLASO G., BOSCHI E., GUIDOBONI E., VALENSISE G., "Il terremoto e il maremoto del 28 dicembre 1908", edito da INGV e SGA Storia Geofisica Ambiente, 161-182.
- VANNOLI P., BASILI R. & VALENSISE G. (2004) - *New geomorphic evidence for anticlinal growth driven by blind-thrust faulting along the northern Marche coastal belt (central Italy)*. J. Seismol., **8**, 297-312.
- WARD S.N. & VALENSISE G. (1994) - *The Palos Verdes terraces, California: bathtub rings from a buried reverse fault*. J. Geophys. Res., **99**, 4485-4494.
- WESTAWAY R. (1993) - *Quaternary uplift of Southern Italy*. J. Geophys. Res., **98**, 21741-21772.