CITTÀ DI MESSINA

DIPARTIMENTO SERVIZI AMBIENTALI

Servizio Protezione Civile - Pronto Intervento

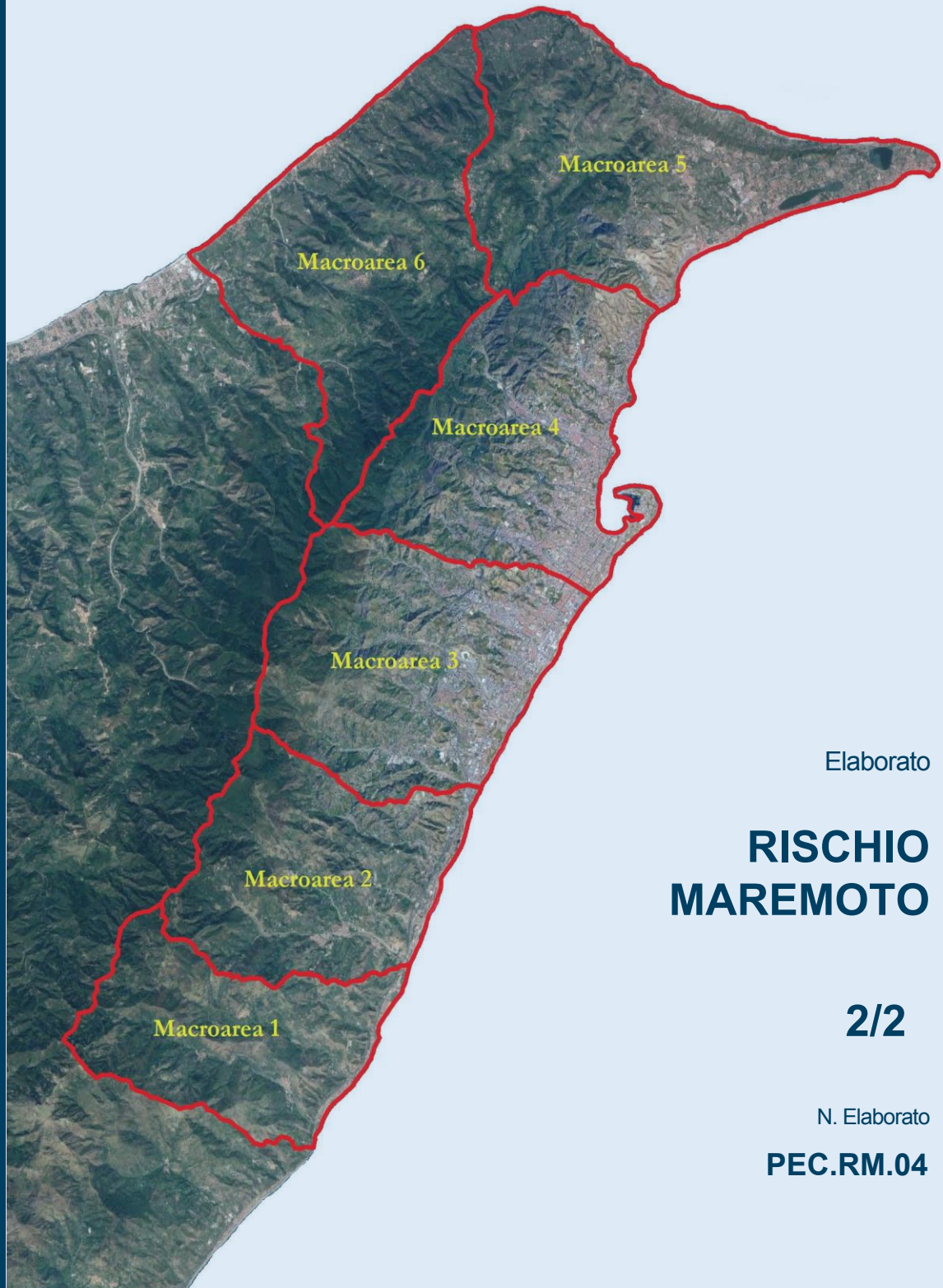
Sindaco
Dott. Federico BASILE

Ass. Protezione Civile
Dott. Massimiliano MINUTOLI

Dirigente Dipartimento
Ing. Antonio CARDIA

Resp. Servizio PC
Ing. Giuseppe MESSINA

PIANO EMERGENZA COMUNALE (P.E.C.)



Aggiornamento
Marzo 2023
Rev. 1 - Settembre 2023

Progettisti Piano P.C.

RTP PROTEC
(Capogruppo)
Dott. Ing. Antonio RIZZO

Dott. Geol. Sebastiano G. MONACO

Dott. Geol. Angelo PELLE

Elaborato

RISCHIO MAREMOTO

2/2

N. Elaborato

PEC.RM.04

I maremoti nel Comune di Messina

Stefano Tinti

Professore

Alberto Armigliato, Filippo Zaniboni

Ricercatori

Gianluca Pagnoni, Maria Ausilia Paparo

Assegnisti

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Settore Geofisica

Gennaio 2017

INTRODUZIONE

Questa relazione è stata sollecitata ad uno degli autori, il Prof. Stefano Tinti, dall'Ing. Antonio Rizzo, esperto del Sindaco per le attività di protezione civile del Comune di Messina, e riguarda la pericolosità associata agli tsunami sulle coste comunali. La relazione raccoglie i risultati che il Gruppo di Ricerca sui Maremoti (GRM) del Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) dell'Università di Bologna ha ottenuto negli ultimi anni. Vi si trovano risultati pubblicati in lavori scientifici di riviste specializzate e in rapporti di progetti di ricerca, nonché non ancora pubblicati ma presentati nel corso di convegni o sottomessi per pubblicazione. I risultati non sono il frutto di un lavoro orientato in modo specifico all'area del Comune di Messina. Quanto illustrato nella relazione è piuttosto ottenuto selezionando tra il materiale presentato in altri studi quello che riguarda direttamente o indirettamente l'area comunale. Uno studio specifico richiede tempo e risorse adeguate.

La relazione si sofferma sui principali eventi di tsunami che hanno, secondo le conoscenze storiche, interessato Messina e che sono stati studiati anche mediante simulazioni numeriche dal GRM. La parte finale della relazione concerne lo studio di pericolosità da tsunami che è stato compiuto dal GRM per le aree di Augusta e Siracusa mediante la tecnica degli scenari nell'ambito di un progetto europeo. Da essa si estrae e si illustra la parte che si può applicare al Comune di Messina, evidenziando comunque il caveat che l'analisi per Messina può essere considerata soltanto preliminare in quanto, essenzialmente, il Comune di Messina è out-of focus rispetto allo studio. Tale analisi viene comunque proposta perché si ritiene che sia molto interessante e degna di essere approfondita.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE III

INDICE DELLE TABELLE V

1. INTRODUZIONE GENERALE SUI MAREMOTI 1

1.1 METODI NUMERICI PER LO STUDIO DEI MAREMOTI 2

2. EVENTI STORICI IN ITALIA 3

2.1 MAREMOTI LUNGO LE COSTE ITALIANE 3

2.2 EVENTI RIGUARDANTI LA SICILIA ORIENTALE E IL COMUNE DI MESSINA ... 4

3. SIMULAZIONI NUMERICHE DEI PRINCIPALI MAREMOTI STORICI CHE HANNO INTERESSATO IL COMUNE DI MESSINA 5

3.1 IL MAREMOTO DEL 28 DICEMBRE 1908 6

3.2 IL MAREMOTO CAUSATO DALLA FRANA DI SCILLA DEL 6 FEBBRAIO 1783 9

3.3 I MAREMOTI DI STROMBOLI DEL 2002 12

3.4 IL MAREMOTO DELL'8 SETTEMBRE 1905 14

4. ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ DA TSUNAMI MEDIANTE IL METODO DEGLI SCENARI 14

4.1 GENERALITÀ 14

4.2 STUDIO DELLO SCENARIO AGGREGATO PER LE COSTE DEL COMUNE DI MESSINA 16

5. CONCLUSIONI 22

BIBLIOGRAFIA 25

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Mappa delle sorgenti di tsunami storici in Italia (a sinistra) e nella zona attorno allo Stretto di Messina (a destra). I cerchi colorati indicano le sorgenti di maremoti, le cui coordinate sono state ricavate dal catalogo ITC2. L'intensità degli eventi, misurata con la scala Sieberg-Ambraseys, viene rappresentata secondo lo schema nella legenda. In caso di terremoti, i cerchi si trovano in corrispondenza dell'epicentro. 5

Figura 2. Run-up osservati lungo la costa siciliana in occasione del maremoto del 1908. L'altezza delle colonne è proporzionale al run-up locale. 8

Figura 3. Massima elevazione simulata per lo tsunami del 1908. Sinistra. La sorgente è la faglia ipotizzata in Tinti e Armigliato (2001). Destra. Alla precedente faglia è aggiunta una sorgente come descritto nel testo. La figura è ripresa dall' "Atlante delle zone esposte al rischio di maremoto nell'area di Catania" (Tinti et al., 2010). 9

Figura 4. Massima elevazione dello tsunami provocato dalla frana di Scilla del 1783, in un'area estesa attorno a Scilla (sopra) e nell'area di Capo Peloro (sotto), dove è ben visibile l'inondazione delle zone di Pantano Piccolo e Torre del Faro (modificata da Zaniboni et al., 2016b) 11

Figura 5. Run-up osservati (triangoli rossi) e simulati (in nero) per il tratto orientale e settentrionale della costa di Stromboli in occasione dello tsunami del 2002, generato da due frane lungo la Sciara del Fuoco. 13

Figura 6. Zone sismogenetiche selezionate per la definizione degli scenari utilizzati nella valutazione della pericolosità legata ai maremoti lungo le coste orientali della Sicilia. 17

Figura 7. Set di griglie innestate utilizzate nelle simulazioni numeriche. Le risoluzioni sono rispettivamente: 3 km (griglia 1), 1 km (griglia 2), 200 m (griglia 3), 40 m (griglie 4 e 5)..... 18

Figura 8. Massima elevazione del mare lungo la costa messinese nello Stretto: per i diversi scenari considerati è rappresentata l'elevazione massima calcolata (in nero), la seconda elevazione massima (in rosso) e la terza (in verde). 19

Figura 9. Massima elevazione dell'acqua lungo la costa messinese dello Stretto per lo scenario aggregato. I diversi colori indicano i contributi di diverse sorgenti. Le stelle indicano i valori di run-up noti per il maremoto del 28 dicembre 1908. 20

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Tsunami storici studiati mediante modellazione numerica. Nella colonna relativa al tipo di sorgente i codici hanno le seguenti corrispondenze: EQ=terremoto; EL=frana da terremoto; VL=frana in ambiente vulcanico. L'intensità riportata segue la classificazione di Sieberg-Ambraseys. 6

1. INTRODUZIONE GENERALE SUI MAREMOTI

Il fenomeno naturale che viene indicato con il termine maremoto è un particolare tipo di perturbazione marina. Le onde che si vedono quotidianamente in mare sono principalmente eccitate dal vento e coinvolgono solo la parte superficiale della massa d'acqua. Per i maremoti, invece, tutta la colonna d'acqua dal fondo marino alla superficie ne viene interessata. In questo i maremoti possono essere assimilati più alle maree che alle onde di vento.

Il maremoto, o tsunami dalle parole giapponesi "*tsu*" = porto, e "*nami*" = grande onda, viene generato da un evento in grado di mobilizzare grandi masse d'acqua in tempi molto brevi. Il fenomeno tsunamigenico più frequente, stando ai cataloghi specialistici, è il terremoto. Circa il 77% dei casi inclusi nel catalogo mondiale dei maremoti del NOAA, NGDC/WDS è dovuto a terremoti. Un'altra causa, in grado di generare onde anche catastrofiche, sono le frane, sia sottomarine che subaeree, che in genere provocano maremoti con effetti su regioni geografiche meno estese. Esistono altre cause meno frequenti, come le eruzioni di vulcani sulla costa o sottomarini, o molto rare, come l'impatto di corpi celesti, meteoriti o asteroidi, che cadono in mare.

Per quanto riguarda il fenomeno fisico, in genere per gli tsunami si parla di "onde lunghe", in quanto la lunghezza d'onda che li caratterizza (cioè la distanza tra due creste o tra due ventri successivi) è, in mare aperto, molto maggiore della profondità locale dell'acqua. La velocità di fase di tali onde può raggiungere le centinaia di km/h, con ampiezze spesso modeste, che possono essere di pochi centimetri. Per tale ragione al largo gli tsunami il più delle volte non vengono percepiti. All'avvicinarsi della costa la profondità diminuisce, e con essa la velocità delle onde di maremoto. La conseguenza è l'aumento dell'ampiezza dell'onda, dovuto alla conservazione dell'energia. È a riva e nei porti che le onde possono avere effetto catastrofico (da questo deriva il termine giapponese tsunami), perché qui raggiungono la massima altezza e si possono abbattere con grande violenza contro strutture ed infrastrutture nella zona costiera.

Lo tsunami si può inizialmente manifestare sulla costa con un ritiro del mare oppure con un'inondazione. Ciò dipende dal meccanismo di generazione, dalla posizione della costa rispetto alla sorgente ed in parte anche dalla distanza della sorgente. La prima onda è

sempre seguita da altre che talvolta sono più alte della prima, con un intervallo tra una e l'altra che può variare da 1-2 minuti, nel caso di sorgenti locali di piccola estensione, fino a parecchie decine di minuti per gli tsunami generati da grandi terremoti.

Nella valutazione degli effetti di un maremoto a riva viene definita "massima inondazione" (o anche solo "inondazione") la massima distanza raggiunta dal mare rispetto alla normale linea di costa, e viene detta "*run-up*" la massima elevazione topografica raggiunta dallo tsunami durante l'inondazione. Il run-up non va confuso con l'altezza dell'onda sulla linea di costa: non sempre le due quantità coincidono. "L'altezza della colonna d'acqua", infine, denota in ogni punto la massima altezza raggiunta dal flusso d'acqua che inonda il terreno.

L'intensità degli tsunami viene misurata considerandone gli effetti a riva (in questo, simile alla scala macrosismica MCS per i terremoti), e si basa in Europa sulla scala Sieberg-Ambraseys, dal nome dei due scienziati che hanno contribuito a crearla. Tale scala ha 6 gradi di intensità che possono essere sintetizzati nel modo seguente: il grado 1 corrisponde a onde rilevabili soltanto tramite la strumentazione; i gradi 2 e 3 a maremoti che possono essere notati visivamente e che creano pochi danni; il grado 4 riguarda danneggiamenti a strutture leggere ed effetti su piccole imbarcazioni; ed infine i gradi 5 e 6 corrispondono a danni rilevanti o distruzione di strutture e grandi natanti, e alla perdita di vite umane.

1.1 METODI NUMERICI PER LO STUDIO DEI MAREMOTI

Per studiare i maremoti ed i loro effetti ci si può basare sulla modellazione numerica, formulando equazioni che per descrivere il fenomeno naturale utilizzano necessariamente approssimazioni, e risolvendole tramite tecniche di calcolo specifiche. I risultati presentati in questa relazione sono stati ottenuti mediante l'applicazione dei codici sviluppati dal GRM del DIFA dell'Università di Bologna.

Si tratta di modelli che simulano tutte le fasi del maremoto, partendo dal quella di generazione. Nel caso di un terremoto, si assume che lo spostamento della superficie del mare per effetto del sisma sia istantaneo e uguale allo spostamento verticale del fondo marino, calcolato attraverso la teoria di Okada (1992). Se la sorgente è una frana, si utilizza un codice numerico, denominato UBO-BLOCK, in grado di simulare l'intero moto di scivolamento della massa (sia fuori che dentro all'acqua) ed il relativo impulso tsunamigenico variabile nel tempo (vedi Tinti et al., 1997, per la descrizione del modello).

La propagazione del maremoto viene calcolata risolvendo le equazioni della fluidodinamica, mediante i codici UBO-TSUFE (Tinti et al., 1994) o UBO-TSUFD (Tinti e Tonini, 2013) a seconda delle tecniche di calcolo che si vogliono adottare. Entrambi i

codici permettono di calcolare i dettagli della propagazione delle onde di maremoto dalla sorgente fino alla linea di costa, e UBO-TSUFD consente anche di calcolare l'eventuale inondazione e run-up. Quando sono disponibili dati sperimentali (osservazioni testimoniali e/o misure strumentali), il confronto dei risultati dei modelli con i dati medesimi permette di perfezionare i parametri della sorgente tsunamigenica (risoluzione del problema inverso). I modelli citati sono stati validati ed ampiamente impiegati per l'analisi di casi di maremoto verificatisi in varie regioni del mondo. In questa relazione ci si concentra sui maremoti che interessano il Comune di Messina.

2. EVENTI STORICI IN ITALIA

2.1 MAREMOTI LUNGO LE COSTE ITALIANE

Le coste italiane sono interessate dai maremoti, sia per la posizione centrale che la penisola occupa nel Mar Mediterraneo, sia perché si trovano vicine a numerose sorgenti tsunamigeniche. Secondo il catalogo ITC2 (Italian Tsunami Catalogue, version 2, vedi Tinti et al., 2007 e successive revisioni) che comprende i maremoti con sorgenti vicine ma non generati da sorgenti remote, si contano 72 episodi di tsunami che hanno riguardato le nostre coste, la maggior parte dei quali ha attaccato l'Italia meridionale. La mappa della parte sinistra della Figura 1 mostra la posizione della sorgente dei maremoti. Molti tsunami del catalogo hanno avuto effetti solo su scala locale, ma gli eventi più forti hanno interessato aree più vaste. Il catalogo, che raccoglie tsunami verificatisi negli ultimi due millenni, è in realtà fortemente incompleto nella parte più antica, e presumibilmente raggiunge la completezza solo a partire dal 1600 circa.

Del numero totale di eventi catalogati, ben 52 (quindi circa il 72%) sono direttamente associabili ad eventi sismici. Si noti che la percentuale è simile a quella del catalogo mondiale NGDC/WDS. Inoltre, 11 casi sono associabili ad attività vulcanica, e 5 a frane. Infine, per 4 eventi non è stato possibile riconoscerne la causa. Al tempo stesso, se si considerano i cinque eventi eventi disastrosi (di intensità 5 o 6), si nota che il 60% è associabile a terremoti (1627 Gargano, 1693 Sicilia orientale, 1908 Stretto di Messina) ed il 40% a frane (1783 Scilla, 2002 Stromboli), il che dimostra che i maremoti da frana, pur essendo più rari, costituiscono comunque una seria minaccia per le comunità costiere, paragonabile ai maremoti da terremoto.

Considerando la mappa sulla sinistra della Figura 1, si possono notare maremoti con sorgente nel Mar Ligure (7), di fronte alla Toscana (2), così come nel mar Adriatico settentrionale (5). Si tratta di eventi con intensità che raggiunge al massimo il grado 4 della scala Sieberg-Ambraseys. Scendendo lungo l'Adriatico, un evento importante è quello che ha attaccato le coste del Gargano nel 1627 (intensità 5). Il dato più rilevante è che le zone più soggette all'attacco degli tsunami sono la Calabria meridionale (sia ionica che tirrenica) e la Sicilia orientale, dove si sono verificati la maggior parte degli eventi, soprattutto quelli di intensità più alta.

2.2 EVENTI RIGUARDANTI LA SICILIA ORIENTALE E IL COMUNE DI MESSINA

Il fatto che la regione comprendente la Sicilia orientale e la Calabria meridionale sia stata colpita, secondo il catalogo, da numerosi maremoti non deve sorprendere. In questa zona, infatti, si trovano molte sorgenti in relazione con l'attività vulcanica (Stromboli e Arcipelago Eolico, Etna), con la complessa dinamica tettonica dell'arco Calabro che dà luogo ad un'intensa attività sismica, e con la morfologia del fondale (scarpata Ibleo-Maltese, margine Calabro Ionico, margine Calabro Tirrenico, tutti soggetti a fenomeni di mobilizzazione di frane anche di grande volume).

La mappa delle sorgenti tsunamigeniche, rappresentata nella parte destra della Figura 1, mostra che i due eventi più disastrosi (di intensità 6) sono localizzati nello Stretto di Messina. I cerchi rossi indicano gli epicentri di due terremoti: il sisma che nel 1783 ha causato una catastrofica frana tsunamigenica a Scilla, a nord dello Stretto, ed il terremoto di Messina del 1908. Altri eventi rilevanti (di intensità 5) sono il maremoto associato al terremoto di Noto del 1693, che è il sisma con la massima magnitudo compreso nel catalogo dei terremoti italiani (Mw =7,3 in CPTI15, Rovida et al., 2016), e il maremoto del 2002 a Stromboli generato da due frane, mobilizzate dalla crisi parossistica del periodo.

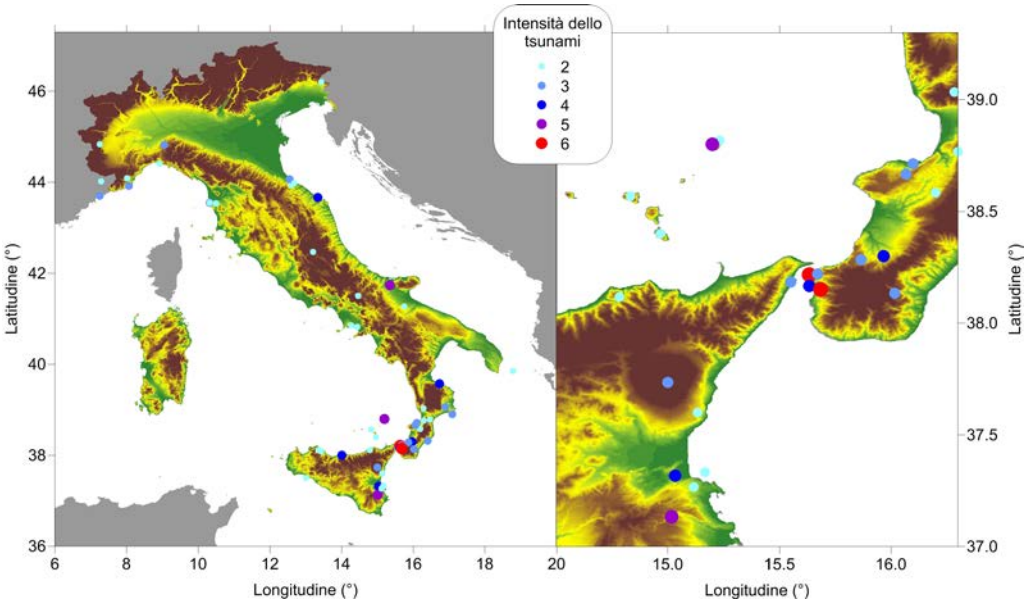


Figura 1. *Mappa delle sorgenti di tsunami storici in Italia (a sinistra) e nella zona attorno allo Stretto di Messina (a destra). I cerchi colorati indicano le sorgenti di maremoti, le cui coordinate sono state ricavate dal catalogo ITC2. L'intensità degli eventi, misurata con la scala Sieberg-Ambraseys, viene rappresentata secondo lo schema nella legenda. In caso di terremoti, i cerchi si trovano in corrispondenza dell'epicentro.*

3. SIMULAZIONI NUMERICHE DEI PRINCIPALI MAREMOTI STORICI CHE HANNO INTERESSATO IL COMUNE DI MESSINA

L'analisi dei cataloghi e delle testimonianze storiche fornisce indicazioni fondamentali per l'individuazione degli eventi che hanno colpito la zona oggetto dello studio, in questo caso il Comune di Messina. Una volta scelto un evento, si procede alla ricostruzione del relativo scenario, cioè alla caratterizzazione della sorgente, alla sua modellazione, alla simulazione del maremoto da essa generato, ed alla stima degli effetti. Il confronto dei risultati ottenuti con i dati disponibili permette di validare lo scenario, ed eventualmente di modificare i parametri che governano i modelli numerici.

Per il Comune di Messina, gli eventi scelti per le simulazioni numeriche sono quelli elencati in Tabella 1, che riporta dati tratti dal catalogo ITC2. Si tratta dei maremoti già ricordati nel paragrafo precedente (tsunami del 1908, paragrafo 3.1; del 1783, paragrafo 3.2; del 2002, paragrafo 3.3) a cui è stato aggiunto il maremoto causato dal terremoto del 1905 nel Golfo di Sant'Eufemia nella Calabria Tirrenica (paragrafo 3.4). Non si tratteranno qui i maremoti generati dai terremoti del 1169 e dell'11 gennaio 1693. Nel primo caso, le fonti storiche riferiscono di effetti di maremoto distruttivi nella città di Messina, con il mare che prima si ritirò e poi attaccò la città, distruggendo le mura e inondando l'abitato. Allo stato attuale delle conoscenze, formulare ipotesi sulla faglia sorgente del 1169 è molto difficile e di conseguenza non si propone qui alcuna simulazione, che può essere rimandata ad uno studio specifico. Nel secondo caso (1693), l'evento non viene incluso in quanto i danni maggiori furono sperimentati nelle Province di Siracusa e Catania. È comunque opportuno ricordare che il maremoto del 1693 fu osservato tanto a Messina (3 sequenze di ritiro del mare e successivo ritorno nella zona della Cittadella, con molti pesci lasciati sulla riva) quanto a Taormina, dove il mare si ritirò per circa mezzo miglio, trasportando alcune piccole imbarcazioni.

Tabella 1. *Tsunami storici studiati mediante modellazione numerica. Nella colonna relativa al tipo di sorgente i codici hanno le seguenti corrispondenze: EQ=terremoto; EL=frana da terremoto; VL=frana in ambiente vulcanico. L'intensità riportata segue la classificazione di Sieberg-Ambraseys.*

Scenario	Localizzazione della sorgente	Tipo di Sorgente	Intensità dello tsunami	Magnitudo del terremoto (Mw)
1908	Stretto di Messina	EQ	6	7,1
1783	Scilla	EL	6	
2002	Stromboli	VL	5	
1905	Golfo di Sant'Eufemia	EQ	3	6,9

3.1 IL MAREMOTO DEL 28 DICEMBRE 1908

Il terremoto del 1908 è probabilmente la catastrofe naturale che più è rimasta impressa nell'immaginario della popolazione siciliana e calabrese, visto l'elevatissimo numero di morti (oltre 85000 nella ricostruzione di Guidoboni e Valensise, 2011) e la vasta distruzione che ha colpito città e villaggi lungo le due coste dello Stretto di Messina. Nella mattinata del 28 dicembre 1908, un fortissimo sisma (di magnitudo Mw=7,1 secondo il catalogo CPTI15, Rovida et al., 2016) si generò nell'area dello Stretto, tra Messina e Reggio Calabria, in una zona che tuttora è oggetto di discussione fra gli scienziati. Ai danni provocati dalle scosse sismiche, si aggiunsero gli effetti di un forte maremoto. Il 90% degli edifici di Messina venne distrutto, e metà della popolazione della città rimase uccisa. La

difficoltà nella ricostruzione esatta degli eventi non permette di distinguere con precisione quante furono le vittime del maremoto.

Le numerose fonti del periodo, e principalmente i lavori di Platania (1909) e Baratta (1910), riportano un'accurata ricostruzione degli effetti del maremoto lungo le coste siciliane e calabresi, che sono riassunte, insieme a molte altre, nel catalogo ITC2 e nei lavori di Tinti e Giuliani (1983) e di Tinti e Armigliato (2003). Ci limitiamo qui a ricordare alcune delle caratteristiche principali:

- ✓ I dati sui tempi di arrivo dello tsunami, ricavabili dalle testimonianze storiche, indicano che le prime località colpite dall'onda si trovano nella parte meridionale dello Stretto, dal che si può dedurre che la sorgente del maremoto può essere localizzata in tale area;
- ✓ in molte località, con poche eccezioni, la prima manifestazione dello tsunami fu un consistente ritiro del mare, fino a 150 metri (Platania, 1909);
- ✓ le zone maggiormente interessate dallo tsunami sulla costa siciliana si trovano nella parte meridionale dello Stretto, da Scaletta Zanclea a Giardini Naxos, con diminuzione rapida del run-up osservato verso nord e più moderata verso sud (come si può vedere dalla Figura 2);
- ✓ Le altezze massime di run-up lungo la costa siciliana sono state riscontrate a Sant'Alessio (11,7 m) ed a Giardini Naxos (9,5 m).

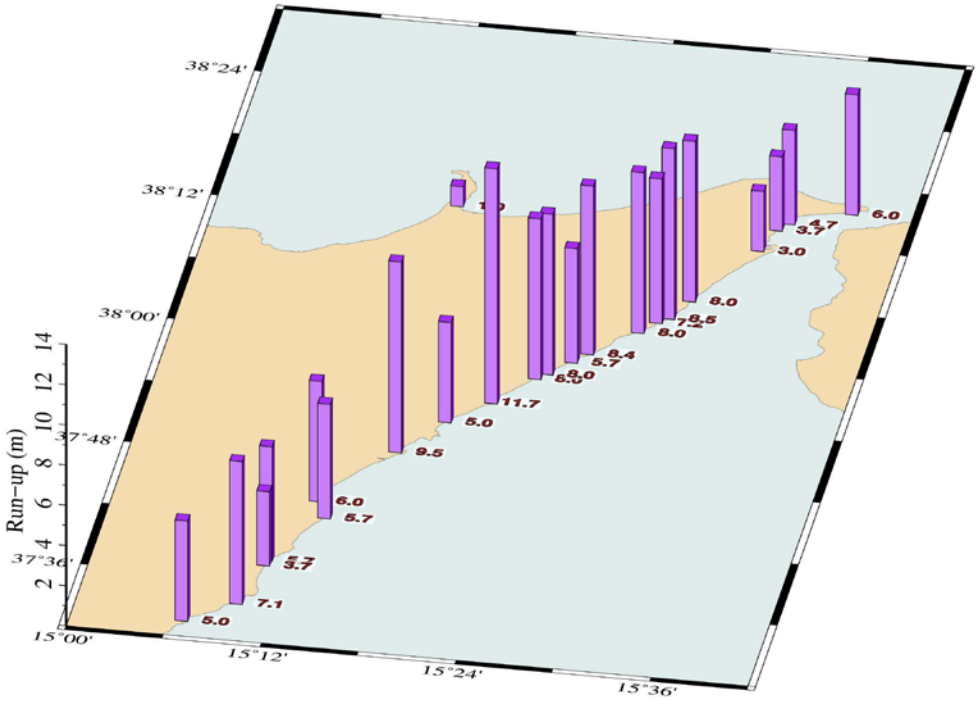


Figura 2. *Run-up osservati lungo la costa siciliana in occasione del maremoto del 1908. L'altezza delle colonne è proporzionale al run-up locale.*

Le simulazioni numeriche dello tsunami si basano sulla ricostruzione della sorgente sismica. Numerosi studi scientifici hanno ipotizzato diverse configurazioni per la faglia responsabile del terremoto, tipicamente confinate allo stretto di Messina, ma nessuna è risultata soddisfacente. Infatti, i maremoti calcolati per tali faglie non riproducono i dati sperimentali (Tinti e Armigliato, 2003). In sostanza, tutte le sorgenti proposte danno luogo ad una sottostima dell'altezza delle onde di maremoto. Per questo motivo, è stata anche avanzata l'ipotesi che il maremoto sia stato prodotto da una grossa frana sottomarina indotta dal terremoto (Billi et al., 2008) e localizzata al largo di Giardini Naxos o da numerose frane minori, avvenute nello Stretto (Favalli et al., 2009). L'ipotesi di un'unica frana è stata contestata per mancanza di evidenze geologiche, e giudicata priva di fondamento (Argnani et al., 2009), mentre l'ipotesi di frane minori che hanno agito come sorgenti tsunamigeniche aggiuntive sembra essere plausibile. Il dibattito è ancora aperto (v. anche la discussione nel cap. 4).

In questa relazione viene presentata una simulazione dello tsunami del 1908 tratta da ricerche concernenti scenari di maremoto per la città di Catania (Tinti et al., 2010 e Tonini et al., 2011). In tali ricerche, oltre alla sorgente ipotizzata in Tinti e Armigliato (2001) che in analogia ad altre non riesce a generare maremoti compatibili con le osservazioni, è stato considerato un contributo aggiuntivo, cioè una depressione localizzata a sud dello Stretto, che renda conto dei prevalenti primi arrivi negativi. La Figura 3 riporta i risultati delle simulazioni per l'intera costa ionica della Sicilia, con la mappa delle massime elevazioni raggiunte dalle onde per ogni punto del dominio di calcolo numerico. Si noti come l'ipotesi alla base della figura di destra sembra fornire una distribuzione delle elevazioni più coerente con le osservazioni riportate nei cataloghi. La distribuzione spaziale delle altezze massime è comunque ancora insoddisfacente ed ulteriormente migliorabile.

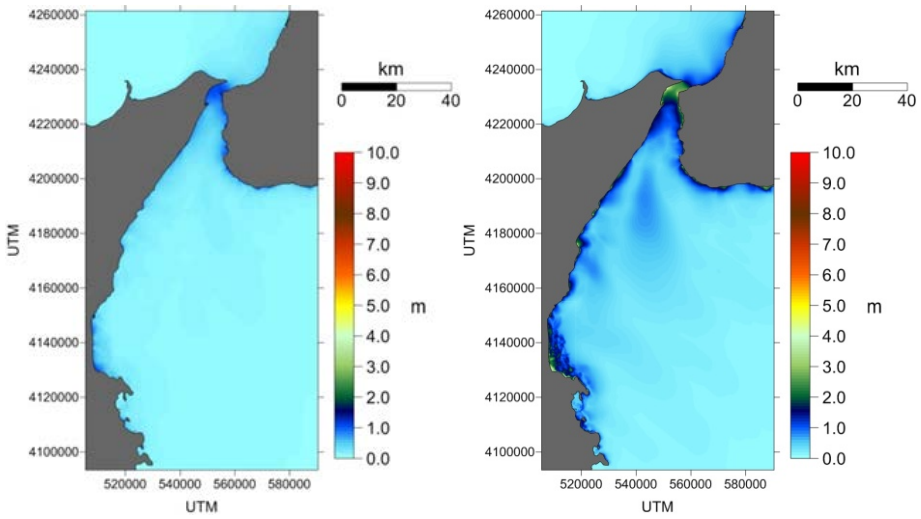


Figura 3. *Massima elevazione simulata per lo tsunami del 1908. Sinistra. La sorgente è la faglia ipotizzata in Tinti e Armigliato (2001). Destra. Alla precedente faglia è aggiunta una sorgente come descritto nel testo. La figura è ripresa dall' "Atlante delle zone esposte al rischio di maremoto nell'area di Catania" (Tinti et al., 2010).*

3.2 IL MAREMOTO CAUSATO DALLA FRANA DI SCILLA DEL 6 FEBBRAIO 1783

A partire dal mese di febbraio del 1783, una lunga sequenza sismica colpì la Calabria, con 5 forti terremoti concentrati nel periodo febbraio-marzo, il più forte dei quali (5

febbraio) raggiunse magnitudo 7,1 secondo il CPTI15 (Rovida et al., 2016). La notte seguente, un altro forte terremoto colpì la zona, mobilizzando un costone roccioso lungo le pendici del Monte Pacì che precipitò in mare, provocando uno tsunami che raggiunse il paese di Scilla, distante circa un chilometro, nel giro di un solo minuto. Sfortunatamente, a causa dei terremoti dei giorni precedenti, gran parte della popolazione si era rifugiata sulla spiaggia per sfuggire all'effetto dei crolli: si stima che i morti causati dal maremoto siano stati più di 1500 (Graziani et al., 2006).

Le ricostruzioni storiche sono in gran parte contenute nelle relazioni di Sarconi (1784), Minasi (1785) e De Lorenzo (1895), che risultano sorprendentemente precise e dettagliate nella descrizione della frana e degli effetti del maremoto. I lavori di Tinti e Guidoboni (1988) e Graziani et al. (2006) riassumono e riprendono le osservazioni storiche, che riportano danni e vittime anche nella costa siciliana. A Messina furono osservate onde fino a 2 metri, mentre a Torre Faro la costa fu inondata per circa 600 passi (run-up stimato di circa 6 metri), con 26 vittime accertate e molti danni a imbarcazioni e abitazioni. Anche verso Capo Peloro i campi attorno al Pantano Piccolo furono inondati, con case, animali e persone trascinati in acqua (Graziani et al., 2006).

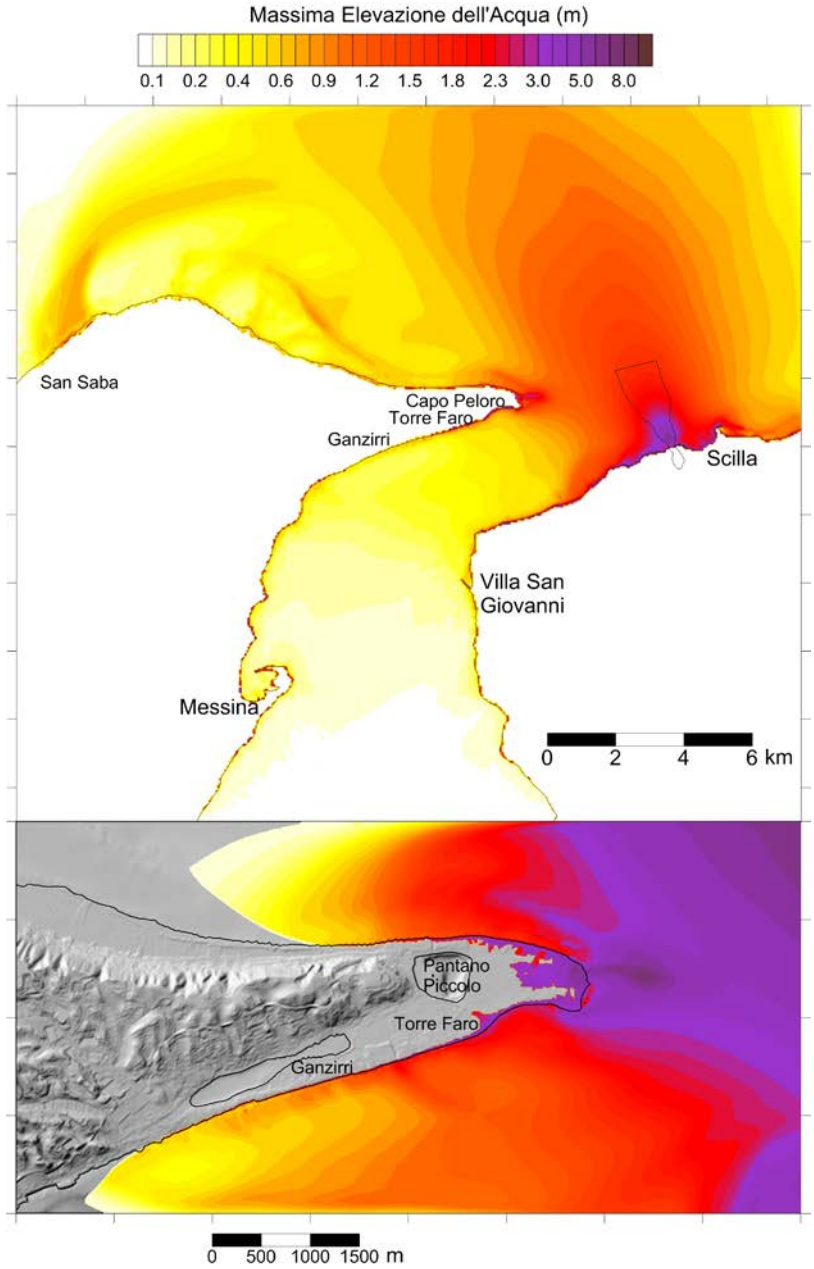


Figura 4. *Massima elevazione dello tsunami provocato dalla frana di Scilla del 1783, in un'area estesa attorno a Scilla (sopra) e nell'area di Capo Peloro (sotto), dove è ben visibile l'inondazione delle zone di Pantano Piccolo e Torre del Faro (modificata da Zaniboni et al., 2016b).*

Altre ricerche che confermano in modo diretto l'arrivo delle onde di maremoto nella zona di Capo Peloro riguardano i depositi lasciati dallo tsunami quando inonda la terraferma. Le indagini stratigrafiche descritte in De Martini et al. (2012) mostrano come nella zona di Torre degli Inglesi siano stati riconosciuti, caratterizzati e datati depositi di origine marina, associabili al maremoto del 1783.

La Figura 4 nella parte superiore (modificata da Zaniboni et al., 2016b), mostra la massima elevazione del maremoto derivante dalle simulazioni numeriche. Si vede chiaramente che, a parte la zona della sorgente, gran parte dell'energia dello tsunami si dirige direttamente vero Capo Peloro. Ciò si può ascrivere principalmente ad effetti di batimetria, che influenza la velocità delle onde e di conseguenza la loro direzione di propagazione, analogamente all'effetto rifrattivo di onde di luce che attraversano un mezzo con indice di rifrazione variabile. È assai interessante notare che anche nella zona di San Saba lo tsunami viene amplificato per le medesime ragioni.

Nella parte inferiore della Figura 4, che si stringe sulla zona di Capo Peloro, dove il maremoto è stato calcolato su una griglia ad alta risoluzione, si mostra che, secondo le simulazioni, la zona intorno al Pantano Piccolo risulta inondata per più di 1 km, e quella di Torre Faro per circa 500 m, in buona analogia con quanto osservato. Le elevazioni massime simulate raggiungono i 5 metri. Il lago di Ganzirri, protetto da una lingua di terra che raggiunge l'altezza topografica di 6-7 metri non viene raggiunto dallo tsunami.

3.3 I MAREMOTI DI STROMBOLI DEL 2002

Gli ultimi mesi del 2002 furono caratterizzati, sull'isola di Stromboli, da una prolungata e particolarmente intensa attività vulcanica, durante la quale il 30 dicembre si staccarono due frane sul versante della Sciara del Fuoco, una sottomarina e la seconda, 7 minuti dopo, nella sovrastante parte emersa. Entrambe generarono un maremoto, che fu avvertito come un singolo evento dalla popolazione. Nel giro di pochi minuti le onde investirono tutta l'isola, colpendo soprattutto la costa settentrionale ed orientale. Fortunatamente, vista la bassa stagione turistica, non ci furono vittime, ma i danni ad abitazioni private e strutture commerciali, soprattutto nella zona di Ficogrande, furono ingenti (si veda Tinti et al., 2006a, per una descrizione degli effetti).

Alcuni effetti furono osservati anche nell'isola di Panarea, una ventina di km a sud-ovest, dove lo tsunami si manifestò con un ritiro del mare fino a 100 metri, seguito da un'inondazione che provocò danni nel porto di San Pietro. Altri effetti minori si ebbero nella raffineria di Milazzo, a Mondello e ad Ustica. Si può affermare comunque che il maremoto ebbe principalmente effetti a livello locale.

La Figura 5 riporta le misure effettuate durante alcune campagne di rilevazione post-maremoto (v. Tinti et al., 2006a). Il massimo run-up di 10,7 m fu misurato nella zona di Spiaggia Lunga, sulla costa nord a ovest di Ficogrande. Anche nella costa orientale furono misurate altezze di run-up oltre i 5 m.

Le frane, secondo ricostruzioni fatte sulla base delle misure di campagne batimetriche successive, avevano un volume di circa 10-20 milioni di metri cubi (Chiocci et al., 2008). Il maremoto che generò le onde più alte e che fu responsabile dei valori di run-up riportati in Figura 5 fu il primo.

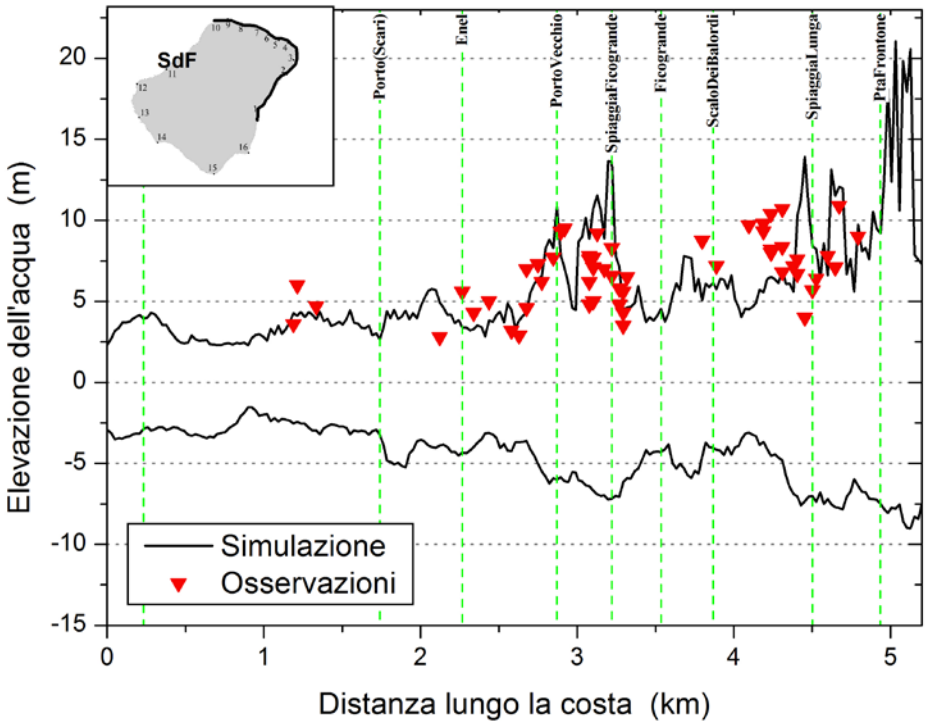


Figura 5. *Run-up osservati (triangoli rossi) e simulati (in nero) per il tratto orientale e settentrionale della costa di Stromboli in occasione dello tsunami del 2002, generato da due frane lungo la Sciara del Fuoco.*

I risultati delle simulazioni sono descritti per esteso in Tinti et al. (2006b), e sono qui riassunti nella Figura 5, per la costa settentrionale ed orientale di Stromboli dove i run-up osservati sono confrontati con i run-up calcolati. L'accordo è notevole, a parte qualche discrepanza (soprattutto nel tratto tra Spiaggia Lunga e Ficogrande, dove le simulazioni sottostimano le osservazioni) probabilmente dovuta a particolari conformazioni della costa

non ricostruite nel dettaglio nella griglia di simulazione. Le simulazioni forniscono anche dati sul ritiro del mare provocato dallo tsunami per il quale non ci sono osservazioni o dati sperimentali.

3.4 IL MAREMOTO DELL'8 SETTEMBRE 1905

Il terremoto dell'8 settembre 1905 in Calabria è tuttora oggetto di indagine e dibattito in ambito scientifico, in merito soprattutto alla determinazione della faglia che l'ha generato. Nel recente lavoro di Loreto et al. (2016) la faglia è localizzata nel Golfo di Sant'Eufemia e la magnitudo stimata in 6,9. Il sisma fu disastroso: provocò circa 550 morti (Baratta, 1906), danni alle abitazioni, ed effetti ambientali come frane, liquefazioni, crepe nel terreno. Il terremoto provocò uno tsunami, pur di entità contenuta.

Lo tsunami colpì i litorali della Calabria penetrando per decine di metri in alcune località. Riguardo alla Provincia di Messina, si sa che a Milazzo il mare prese ad oscillare con periodo di 30 minuti ed ampiezza di 80 cm, mentre nel porto di Messina le oscillazioni raggiunsero i 10 cm.

Le simulazioni numeriche, basate sulla ricostruzione della faglia descritta in Loreto et al. (2016), confermano che il maremoto fu modesto sulle coste siciliane dove la massima elevazione calcolata è dell'ordine del mezzo metro.

4. ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ DA TSUNAMI MEDIANTE IL METODO DEGLI SCENARI

4.1 GENERALITÀ

Lo studio dei maremoti che riguardano il Comune di Messina si è concentrato fin qui sulla breve ricostruzione degli eventi storici. Questa rappresenta solo una componente della procedura necessaria per una stima completa della pericolosità. In generale, fissata un'area costiera per la quale si voglia studiare la pericolosità da maremoto, possono essere

seguiti due approcci alternativi, ciascuno dei quali presenta vantaggi e svantaggi che devono essere attentamente valutati a priori. I due approcci consistono 1) nell'analisi probabilistica e 2) nell'esame degli scenari peggiori possibili, ovvero degli scenari "credibili" che causano i massimi effetti (worst-case credible scenarios).

Nell'approccio probabilistico a tutte le sorgenti che sono ritenute rilevanti in termini di generazione, propagazione ed impatto di onde di maremoto per l'area in esame viene attribuito un insieme di parametri descrittivi, ciascuno dei quali può variare all'interno di un dato intervallo di valori. Per esempio, nel caso dei terremoti, ad ogni faglia (nota o potenziale) vengono assegnate una magnitudo massima, una o più leggi di regressione che permettano di definire le dimensioni della faglia a partire da ciascun valore di magnitudo, intervalli di variabilità per gli angoli che definiscono il meccanismo focale, un intervallo per la profondità ipocentrale. Per ogni configurazione viene assunta una probabilità di occorrenza e viene effettuata una simulazione numerica del maremoto. I risultati sono forniti in termini di valori attesi per un definito periodo di tempo di determinate metriche del maremoto come, ad esempio, l'ampiezza massima dell'onda di tsunami, o la massima colonna d'acqua sulla terraferma nei prossimi 100 anni. Dal punto di vista computazionale l'approccio probabilistico richiede un sforzo che è tanto più oneroso quanto più numerose sono le configurazioni considerate (tipicamente migliaia) e quanto più estesa è l'area costiera che si vuole studiare. Per contenere i tempi di calcolo si è spesso costretti ad effettuare le simulazioni di maremoto facendo semplificazioni drastiche, tralasciando per esempio gli effetti non-lineari che sono quelli decisivi nel processo di inondazione, e su griglie di calcolo non eccessivamente dettagliate. Inoltre, ad oggi, la metodologia probabilistica è applicabile solo alle sorgenti sismiche, per le quali esistono una letteratura ampia e diversi modelli riguardanti la probabilità di occorrenza di terremoti. Lo stesso non può dirsi per le frane, per le quali approcci probabilistici avanzati non sono ancora praticabili.

Il secondo approccio si basa sulla definizione di un numero limitato di scenari peggiori possibili per l'area in questione. Come nel caso precedente, il primo passo consiste nell'individuare e caratterizzare tutte le sorgenti capaci di generare maremoti che possano propagarsi fino ai tratti di costa studiati. Possono essere inclusi terremoti, frane, eruzioni vulcaniche e la scelta deve essere fatta sulla base non solo della storia passata, ma anche dell'attività presente (sismicità della zona, stabilità dei pendii) e delle indicazioni sull'attività futura che provengono dalla geodinamica, dalla geomorfologia, dalle prospezioni geofisiche a terra e a mare. L'analisi critica e ponderata di tutte le informazioni disponibili per diverse aree sorgente porta alla selezione di un numero limitato (tipicamente non più di alcune decine) di scenari che consistono, per esempio, in geometrie e massime magnitudo per le faglie sismogenetiche, e in volumi massimi possibili per corpi franosi lungo pendii favorevoli all'innesco di frane. Dato il numero ridotto di scenari selezionati, l'approccio consente di simulare il maremoto di ogni scenario con codici numerici che implementano anche il calcolo dell'inondazione su griglie ad alta risoluzione (da poche decine di metri a

pochi metri) nelle zone costiere dove è richiesto il maggiore dettaglio. Può comunque essere più ragionevole effettuare un primo set di simulazioni su griglie a minor definizione (poche centinaia di metri) mediante equazioni lineari, con lo scopo di valutare in modo speditivo il peso relativo dei vari scenari sulle elevazioni massime calcolate lungo le linee di costa in esame. Fatto ciò, si è in grado di scremare ulteriormente il numero di scenari, mantenendo solo quelli che più frequentemente compaiono fra i "responsabili" delle massime ampiezze. Per questo sottoinsieme di scenari, infine, si realizzano le simulazioni di dettaglio citate in precedenza. Infine, ad ogni punto della griglia di calcolo si associa il massimo fra i risultati relativi ai vari scenari, ottenendo il cosiddetto "scenario aggregato", che può essere realizzato per qualsiasi osservabile desiderato.

Nel seguito illustreremo l'applicazione del metodo degli scenari effettuata nell'ambito del progetto triennale europeo ASTARTE ("Assessment, STrategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe", Grant 603839, 7th FP - ENV.2013.6.4-3, coordinato dall'IPMA, Lisbona, ed ancora in corso) e ci focalizzeremo sui risultati riguardanti il Comune di Messina.

4.2 STUDIO DELLO SCENARIO AGGREGATO PER LE COSTE DEL COMUNE DI MESSINA

A conoscenza degli autori, una valutazione sistematica e completa della pericolosità legata ai maremoti per le coste del Comune di Messina non è mai stata intrapresa fino ad oggi, anche gli studi svolti su singoli eventi (1908, 2002) sono stati numerosi. Inoltre, è opportuno menzionare che nell'ambito del progetto europeo TRANSFER ("Tsunami Risk And Strategies For the European Region", Contract N. 37058, 6th FP – SUSTDEV-2005—3.IV.2.2, coordinato dal Prof. Stefano Tinti e condotto dal 2006 al 2009), la città di Messina fu selezionata come area test per lo sviluppo e l'applicazione di tecniche innovative per la valutazione della pericolosità e del rischio legate ai maremoti. Ma, dal momento che nel corso del progetto TRANSFER il GRM ha posto il focus sullo sviluppo e validazione di tecniche numeriche e sulla raccolta di dati di maremoto (sviluppo di cataloghi), uno studio organico della pericolosità da tsunami su tutte le coste messinesi non è ancora stato effettuato.

In questo capitolo forniamo un estratto dei risultati derivanti dall'applicazione dell'approccio "a scenari" da parte del GRM nell'ambito del progetto ASTARTE citato sopra, in cui l'attenzione è centrata non sul messinese ma sulle città di Augusta e Siracusa. I dettagli sono reperibili nel Deliverable D8.8, disponibile sul sito del progetto (http://www.astarte-project.eu/index.php/deliverables.html). Qui ci limitiamo ad alcuni

punti salienti. La scelta delle aree di interesse influisce ovviamente sulla scelta delle sorgenti, così come della risoluzione delle griglie di calcolo. Per quanto riguarda le sorgenti, sono state scelte cinque diverse aree-sorgente (Figura 6), che coincidono con altrettante zone sismogenetiche (infatti, non vengono prese in esame né frane né eruzioni vulcaniche): 1) la zona della scarpata ibleo-maltese al largo della Sicilia orientale (HM), 2) l'area dello Stretto di Messina (MS), 3) la zona di subduzione ionica (IS), 4) il prisma di accrezione al largo della Calabria (CO), 5) l'arco ellenico occidentale, a sua volta diviso nella porzione a nord della faglia di Cefalonia e in quella a sud della medesima (WH).

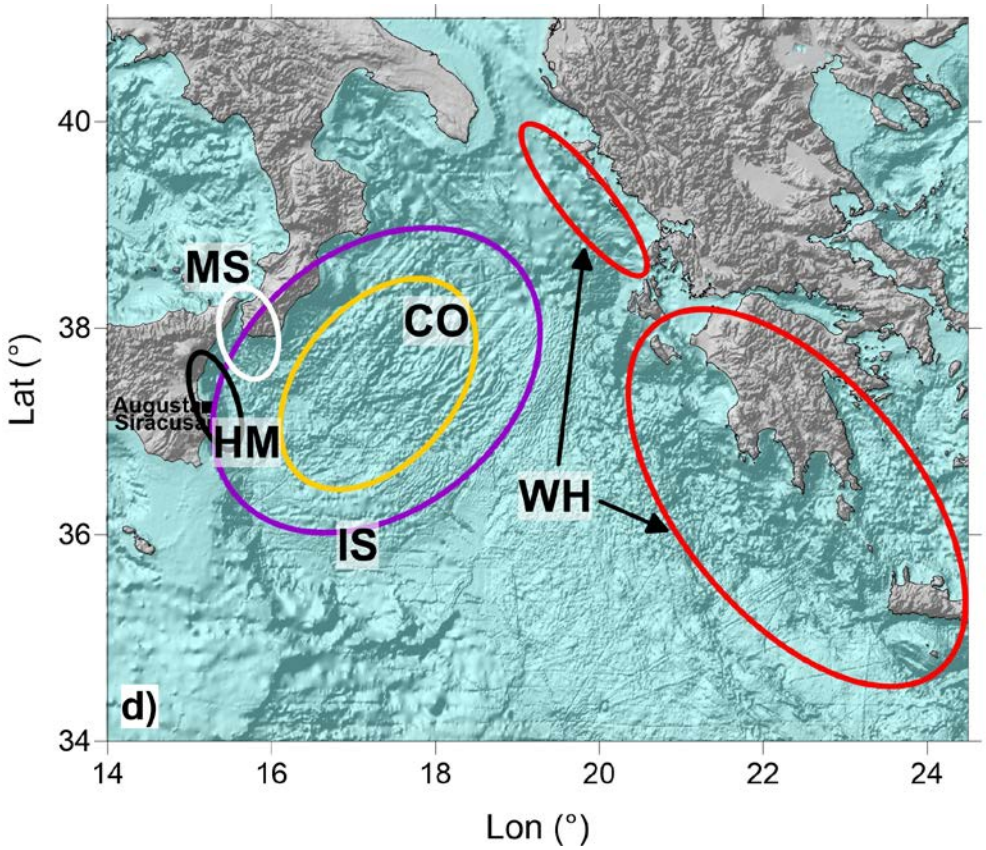


Figura 6. *Zone sismogenetiche selezionate per la definizione degli scenari utilizzati nella valutazione della pericolosità legata ai maremoti lungo le coste orientali della Sicilia.*

Per ciascuna delle cinque aree sono state selezionate opportune geometrie di faglia, tutte accomunate da una medesima magnitudo massima: 7,4 per HM (sulla base del terremoto del 1693), 7,2 per MS (terremoto del 1908), 7,1 per CO e la porzione nord di WH (stima riportata dal database ESDF-SHARE, vedi Basili et al., 2013), da 7,4 a 8,3 per IS (a partire da diversi studi di geologia marina, fra cui Gutscher et al., 2006 e 2016; Polonia

et al., 2014), 8,5 per la porzione meridionale di WH (sulla base del terremoto del 365). In totale, sono stati definiti 32 scenari di terremoti tsunamigenici.

Per quanto riguarda le griglie numeriche, le simulazioni sono state svolte su un set di griglie innestate che prevede due griglie ad alta risoluzione (40 m) per le aree intorno ad Augusta e Siracusa (griglie 4 e 5, Figura 7), mentre il territorio messinese è incluso in una griglia di minor dettaglio con un passo di 200 m (griglia 3, Figura 7). Queste sono a loro volta incluse in una griglia a 1 km che copre lo Ionio occidentale (griglia 2) ed in una a 3 km che copre tutto lo Ionio (griglia 1) fino all'area sorgente (stimata) del terremoto del 365.

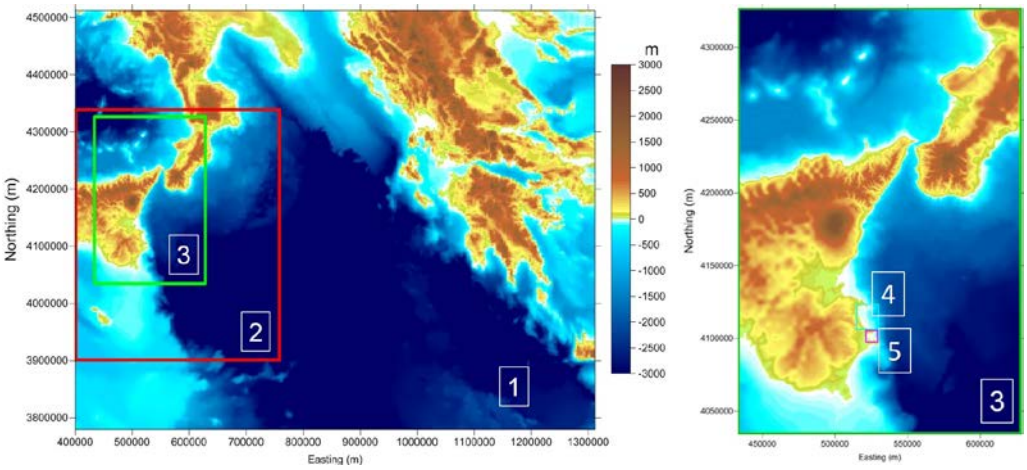


Figura 7. *Set di griglie innestate utilizzate nelle simulazioni numeriche. Le risoluzioni sono rispettivamente: 3 km (griglia 1), 1 km (griglia 2), 200 m (griglia 3), 40 m (griglie 4 e 5).*

Per ognuno dei 32 scenari sono stati simulati i maremoti corrispondenti. Nella griglia 3, che contiene anche le coste del messinese, i risultati sono frutto di simulazioni lineari e la condizione al contorno imposta sulla costa può essere assimilata alla presenza di un muro verticale. I risultati relativi ai 32 scenari individuali possono infine essere sintetizzati in uno o più scenari aggregati. La Figura 8 contiene una mappa della massima elevazione del mare calcolata lungo la costa ionica della Provincia di Messina. In particolare, la Figura 8 riporta tre diversi scenari aggregati corrispondenti ai primi tre valori di elevazione massima in ciascun punto di griglia. In prima approssimazione, questo può essere un modo per rappresentare la dispersione dei risultati. Limitandoci alla prima curva in nero, si nota come nella zona settentrionale dello Stretto, a nord del porto di Messina, i massimi "assoluti" raggiungono quasi i 4 metri, per poi scendere a 2 metri fino alla zona di Giampilieri. Proseguendo verso sud i massimi tornano a salire, fino a raggiungere nuovamente i 4 metri, pur con variazioni locali molto accentuate.

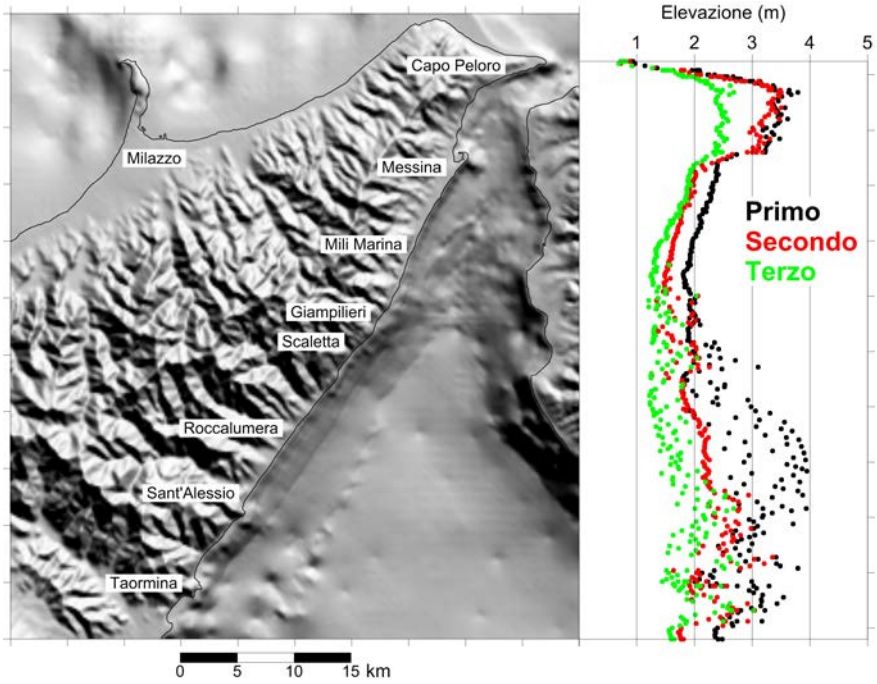


Figura 8. *Massima elevazione del mare lungo la costa messinese nello Stretto: per i diversi scenari considerati è rappresentata l'elevazione massima calcolata (in nero), la seconda elevazione massima (in rosso) e la terza (in verde).*

Limitandoci nuovamente all'aggregato dei massimi, è ragionevole chiedersi quali delle 32 sorgenti scelte produca gli effetti più rilevanti. La Figura 9 contiene la curva dell'aggregato delle ampiezze massime calcolate, in cui ogni punto è stato colorato a seconda della sorgente che genera tale massimo. I risultati ottenuti sono solo parzialmente sorprendenti e possono essere spiegati a partire dalle geometrie di faglia e dalle magnitudo massime adottate. L'unica faglia localizzata nell'area dello stretto di Messina capace di dare un contributo rilevante è quella indicata con il codice MS-04: si tratta di una faglia ricavata a partire da Aloisi et al. (2013), che si trova in parte nello stretto sul versante calabro e in parte subito all'uscita meridionale dello Stretto, con uno strike N-S per cui la direttività è massima verso la porzione di costa sicula compresa approssimativamente fra Scaletta Zanclea e Taormina. La magnitudo di 7,4 con distribuzione di slip uniforme sulla faglia giustifica il moderato livello delle altezze massime calcolate. L'altra faglia che domina i risultati di Figura 9 ha codice WH-09 e si riferisce ad una sorgente con magnitudo 8,5 situata lungo la porzione meridionale dell'arco ellenico occidentale, subito a sud della faglia

trascorrente di Cefalonia. Pur trattandosi di una sorgente che possiamo definire a tutti gli effetti "remota", essa è in grado di produrre altezze massime paragonabili o addirittura superiori a quelle calcolate a partire da sorgenti locali, specialmente nel Comune di Messina. I motivi sono la grande lunghezza d'onda, dovuta all'ampia area interessata dallo spostamento verticale cosismico in corrispondenza della sorgente, e il grande valore di magnitudo.

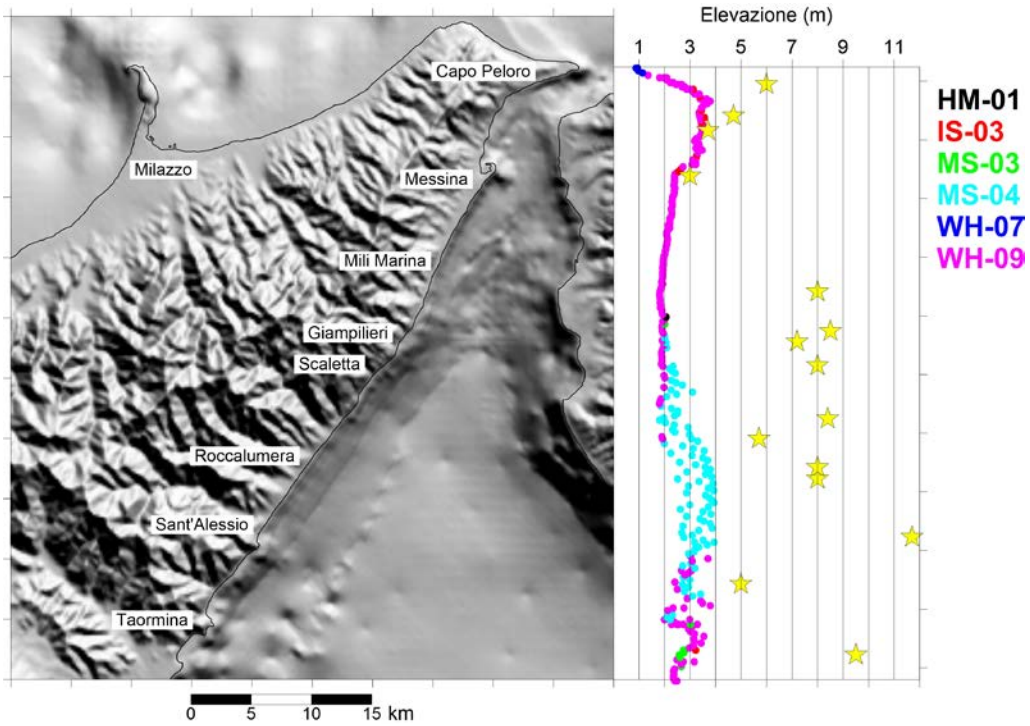


Figura 9. *Massima elevazione dell'acqua lungo la costa messinese dello Stretto per lo scenario aggregato. I diversi colori indicano i contributi di diverse sorgenti. Le stelle indicano i valori di run-up noti per il maremoto del 28 dicembre 1908.*

La Figura 9 contiene anche i valori di run-up misurati in occasione del maremoto seguito al terremoto del 28 dicembre 1908, rappresentati come stelle gialle. È evidente come i nostri risultati siano ben lontani dal riprodurre i dati sperimentali, che invece dovrebbero ricadere entro i livelli di inondazione previsti da un approccio basato sui "peggiori scenari credibili". Va anche chiarito che il confronto è improprio e viene proposto qui solo per

mettere in evidenza quali sono gli ingredienti che ancora mancano per una definizione della pericolosità da maremoto per le coste del messinese.

Ci sono almeno due ingredienti mancanti nell'analisi. Il primo riguarda il calcolo numerico ed il secondo la caratterizzazione delle sorgenti. Ricordando che i risultati mostrati sono estratti da uno studio focalizzato su aree diverse dal Comune di Messina, occorre rilevare che una stima di dettaglio della pericolosità da maremoti richiede l'utilizzo di codici numerici non lineari che implementano il calcolo dell'inondazione su griglie ad alta risoluzione. Infatti, codici lineari su griglie a risoluzione non sufficiente come quelli usati per le simulazioni considerate portano spesso alla sottostima dell'altezza delle onde. Come sottolineato, essi vengono usati solo per una stima preliminare e per selezionare le sorgenti più significative per il tratto di costa in esame. Nello studio effettuato nel progetto ASTARTE da cui sono estratti i risultati riferiti in questa relazione, codici e griglie più sofisticati sono stati utilizzati per la stima della pericolosità nei Comuni di Augusta e di Siracusa. Inoltre, una grave lacuna dell'analisi fin qui descritta riguarda proprio l'evento del 1908. È opportuno evidenziare che fino ad ora nessuno è stato in grado di proporre una faglia che al tempo stesso riproduca gli effetti sismici, geodetici e di danno provocati dal terremoto del 1908 e giustifichi anche gli effetti del maremoto che ne seguì. Sulla scia di una scuola di pensiero che ha preso piede negli ultimi anni, è necessario sondare ipotesi alternative alla sola sorgente sismica, con speciale enfasi sulle frane. Alcuni studiosi (v. i lavori di Billi et al., 2008; Favalli et al., 2009) hanno postulato che il maremoto fu dovuto a frane innescate dal terremoto. Recentemente sono stati pubblicati alcuni studi (ad esempio Ridente et al., 2014) che elaborano e commentano i dati ottenuti nel corso delle campagne di esplorazione marina finanziate dal progetto MAGIC (http://www.magicproject.it/index.php/it/). È quindi oggi disponibile (anche se non sempre facilmente accessibile) una mole di dati che dovrebbe permettere la caratterizzazione dettagliata di corpi di frana lungo i margini costieri della Sicilia orientale e dello Stretto di Messina, e conseguentemente la stima del loro potenziale tsunamigenico.

Va ricordato inoltre che per uno studio approfondito della pericolosità da tsunami per il Comune di Messina l'insieme delle sorgenti da prendere in esame deve essere esteso rispetto a quelle mostrate in Figura 6. Dal punto di vista sismico, si deve completare l'insieme delle zone sorgente includendo il margine tirrenico della Calabria, dove si sono verificati terremoti capaci di produrre maremoti in grado di attaccare le coste settentrionali del Comune di Messina e dello Stretto (1783, 1905). Non deve essere trascurata nemmeno la zona di deformazione attiva che si trova al largo della Sicilia settentrionale (e.g. Lorito et al., 2008; Basili et al., 2013). Ponendo attenzione alle frane, la stima della pericolosità non può prescindere né da scenari basati su frane lungo il margine tirrenico della Calabria (1783), né da quelli relativi all'attività delle isole vulcaniche di Stromboli (2002) e di Vulcano. Da approfondire sono infine gli aspetti legati a strutture sommerse come il Marsili, che hanno ricevuto notevole attenzione a livello mediatico in tempi recenti, ma per

le quali è difficile, senza un'analisi specifica, stimare il tasso di attività ed il livello di pericolosità.

5. CONCLUSIONI

La presente relazione raccoglie i risultati sugli tsunami compiuti dal GRM del DIFA dell'Università di Bologna negli ultimi anni e che riguardano le coste del messinese. La relazione, dopo un'introduzione in cui sono esposti i concetti di base sul fenomeno maremoto e vengono forniti alcuni ragguagli sulla distribuzione ed intensità dei maremoti sulle coste italiane, passa in rassegna gli eventi di maremoto più importanti che hanno colpito il Comune di Messina e dei quali si hanno evidenze storiche. Tutti gli eventi descritti sono stati studiati anche mediante simulazioni numeriche e gli studi hanno rilevanza scientifica in quanto sono stati pubblicati su riviste del settore o presentati a convegni internazionali.

L'ultima parte della relazione è uno studio di pericolosità da tsunami basata sulla tecnica degli scenari peggiori possibili (worst-case scenario). Lo studio vero e proprio effettuato nell'ambito del progetto europeo ASTARTE riguarda i comuni di Augusta e Siracusa e consta di una fase preliminare che permette la selezione delle sorgenti più importanti e di una fase di dettaglio dove si calcolano le inondazioni ed il relativo scenario aggregato. La fase preliminare di tale analisi copre anche il messinese ed è qui riportata. Le simulazioni sono state fatte a partire da 32 sorgenti sismiche che generano maremoti in grado di colpire la costa orientale della Sicilia, ivi comprese le coste messinesi dello Stretto. I codici di simulazione risolvono equazioni lineari su una griglia con passo di 200 m e non sono in grado di calcolare inondazione ed altezze di run-up ma soltanto l'altezza delle onde in corrispondenza della linea di costa. Le Figure 8 e 9 riassumono i risultati e mettono in evidenza che i terremoti considerati generano tsunami che sulle coste dello Stretto nel Comune di Messina possono raggiungere altezze fra i 3 e i 4 m (Figura 8) e che la sorgente che è più efficace (Figura 9) è situata lontano dallo Stretto nell'arco Ellenico orientale. Un'ulteriore osservazione è che i massimi calcolati nello scenario aggregato sono inferiori ai run-up osservati per il maremoto del 28 dicembre 1908. L'incongruenza è già stata notata e motivata nel precedente capitolo 4. Vale la pena sinteticamente menzionare che: 1) se si fossero usati i codici non lineari e le griglie di calcolo di grande risoluzione e 2) se si fossero prese in considerazione anche maremoti prodotti da frane locali, la discrepanza sarebbe, molto probabilmente, stata sanata.

Ciò detto, il contributo che questa relazione intende presentare al Comune di Messina riassume le ricerche condotte dal GRM negli ultimi anni e dimostra che le competenze del GRM, e più in generale l'avanzamento straordinario che si è avuto nell'ultimo decennio nelle conoscenze e nelle tecniche di simulazione della tsunami science, consentono di intraprendere analisi specifiche e mirate nel Comune di Messina per la stima di pericolosità da maremoto.

BIBLIOGRAFIA

Aloisi M., Bruno V., Cannavò F., Ferranti L., Mattia M., Monaco C., Palano M. (2013) Are the source models of the M 7.1 1908 Messina Straits earthquake reliable? Insights from a novel inversion and a sensitivity analysis of levelling data. Geophys. J. Int. 192, 1025-1041.

Argnani A., Chiocci F.L., Tinti S., Bosman A., Lodi M.V., Pagnoni G., Zaniboni F. (2009) Comment on "On the cause of the 1908 Messina tsunami, southern Italy" by Andrea Billi et al., Geophys. Res. Lett., 36, L13307, doi: 10.1029/2009GL037332.

Baratta M. (1906) Il grande terremoto calabro dell'8 settembre 1905. Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, 22.

Baratta M. (1910) La catastrofe sismica calabro-messinese (28 dicembre 1908), Rel. Soc. Geog. It., Roma, pp. 496.

Basili R., Kastelic V., Demircioglu M. B., Garcia Moreno D., Nemser E. S., Petricca P., Sboras S. P., Besana-Ostman G.M., Cabral J., Camelbeeck T., Caputo R., Danciu L., Domac H., Fonseca J., García-Mayordomo J., Giardini D., Glavatovic B., Gulen L., Ince Y., Pavlides S., Sesetyan K., Tarabusi G., Tiberti M. M., Utkucu M., Valensise G., Vanneste K., Vilanova S., Wössner J. (2013) The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE. http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/, doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.

Billi, A., Funiciello, R., Minelli, L., Faccenna, C., Neri, G., Orecchio, B., Presti, D., 2008. On the cause of the 1908 Messina tsunami, southern Italy. Geophys. Res. Lett. 35, L06301. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL033251.

Chiocci F.L, Romagnoli C., Tommasi P., Bosman A. (2008) The Stromboli 2002 tsunamigenic submarine slide: Characteristics and possible failure mechanisms, J. Geophys. Res., 113, B10102, doi: 10.1029/2007JB005172.

De Lorenzo A. (1895) Un secondo manipolo di monografie e memorie reggine e calabresi, Siena

De Martini P.M., Barbano M.S., Pantosti D., Smedile A., Pirrotta C., Del Carlo P., Pinzi S. (2012) Geological evidence for paleotsunamis along eastern Sicily (Italy): an overview. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 2569-2580. doi: 10.5194/nhess-12-2569-2012.

Favalli, M., Boschi, E., Mazzarini, F., Pareschi, M.T., 2009. Seismic and landslide source of the 1908 Straits of Messina tsunami (Sicily, Italy). Geophys. Res. Lett. 36, L16304. http://dx.doi.org/10.1029/2009GL039135.

Graziani L., Maramai A., Tinti S. (2006) A revision of the 1783–1784 Calabrian (southern Italy) tsunamis, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 1053-1060, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/1053/2006/.

Guidoboni E., Valensise G. (2011) Il peso economico e sociale dei disastri sismici in Italia negli ultimi 150 anni. Bononia University Press, ISBN: 978-88-7395-683-9, 550 pp.

Gutscher M.-A., Roger J., Baptista M.A., Miranda J.M., Tinti S. (2006) Source of the 1693 Catania earthquake and tsunami (southern Italy): new evidence from tsunami modelling of a locked subduction fault plane. Geophys. Res. Lett. 33, L08309, doi:10.1029/2005GL025442.

Gutscher M.-A., Dominguez S., Mercier de Lapiney B., Pinheiro L., Gallais F., Babonneau N., Cattaneo A., Le Faou Y., Barreca G., Micallef A., Rovere M. (2016) Tectonic expression of an active slab tear from high-resolution seismic and bathymetric data offshore Sicily (Ionian Sea). Tectonics, 35, 39-54, doi:10.1002/2015TC003898.

Loreto M.F., Pagnoni G., Pettenati F., Armigliato A., Tinti S., Sandron D., Brutto F., Muto F., Facchin L., Zgur F. (2016) Reconstructed seismic and tsunami scenarios of the 1905 Calabria earthquake (SE Tyrrhenian sea) as a tool for geohazard assessment, under revision in Engineering Geology.

Lorito, S., Tiberti, M.M., Basili, R., Piatanesi, A., Valensise, G., 2008. Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea: Scenarios of potential threats to Southern Italy. J. Geophys. Res. 113, B01301, 10.1029/2007JB004943

Minasi G. (1785) Continuazione ed appendice sopra i tremuoti descritti nella relazione colla data di Scilla de 30 settembre 1783, con altro che accadde in progresso, Messina.

NGDC/WDS-National Geophysical Data Center/World Data System, Global Historical Tsunami Database, Boulder, CO, USA. (Available at http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)

Okada Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 82, no. 2, 1018-1040.

Platania G. (1909) Il maremoto dello Stretto di Messina del 28 dicembre 1908, Boll. Soc. Sism. ltal. 13, 369-458 (in ltalian).

Polonia, A., Torelli, L., Gasperini, L., Mussoni, P., 2012. Active faults and historical earthquakes in the Messina Straits area (Ionian Sea). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12, 2311-2328.

Ridente D., Martorelli E., Bosman A., Chiocci F. L. (2014) High-resolution morpho-bathymetric imaging of the Messina Strait(Southern Italy). New insights on the 1908 earthquake and tsunami. Geomorphology, 208, 149-159.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds.) (2016) CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15

Sarconi M. (1784) Istoria de' fenomeni del tremuoto avvenuto nelle Calabrie e nel Valdemone nell'anno 1783. Napoli.

Tinti S., Armigliato A. (2001) Impact of large tsunamis in the Messina Straits: the case of the 28 December 1908 tsunami, in "Tsunami Research at the End of a Critical Decade", (Hebenstreit G. Ed.), Vol. 18, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 139-162.

Tinti S., Armigliato A. (2003) The use of scenarios to evaluate tsunami impact in South Italy, Marine Geology, 199, 221-243, doi: 10.1016/S0025-3227(03)00192-0.

Tinti S., Armigliato A., Pagnoni G., Tonini R., Zaniboni F. (2010) Atlante delle zone esposte al rischio di maremoto nell'area di Catania. © 2010 Editrice Compositori, Bologna. ISBN 978-88-7794-727-7.

Tinti S., Bortolucci E., Vannini C. (1997) A block-based theoretical model suited to gravitational sliding, Natural Hazards, 16, 1-28.

Tinti S., Gavagni I., Piatanesi A. (1994) A finite-element numerical approach for modelling tsunamis, Annali di Geofisica, 37, 1009-1026.

Tinti S., Giuliani D. (1983) The Messina Straits tsunami of the 28th of December 1908: a critical review of experimental data and observations, Il Nuovo Cimento, Vol. 6 C, N. 4, 424-442.

Tinti S., Guidoboni E. (1988) Revision of the tsunami occurred in 1783 in Calabria and Sicily (Italy). Sci Tsunami Hazards 6:17–22.

Tinti S., Maramai A., Armigliato A., Graziani L., Manucci A., Pagnoni G., Zaniboni F. (2006) Observations of physical effects from tsunamis of December 30, 2002 at Stromboli volcano, southern Italy, Bulletin of Volcanology, 68, 450-461, doi: 10.1007/s00445-005-0021-x.

Tinti S., Maramai A., Graziani L. (2007) The Italian Tsunami Catalogue – Version 2. http://portale.ingv.it/servizi-e-risorse/BD/catalogo-tsunami/catalogo-degli-tsunami-italiani

Tinti S., Pagnoni G., Zaniboni F. (2006) The landslides and tsunamis of 30th December 2002 in Stromboli analysed through numerical simulations, Bulletin of Volcanology, 68, 462-479, doi: 10.1007/s00445-005-0022-9.

Tinti S., Tonini R. (2013) The UBO-TSUFD tsunami inundation model: validation and application to a tsunami case study focused on the city of Catania, Italy, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 1795–1816, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/1795/2013/, doi: 10.5194/nhess-13-1795-2013.

Tonini R., Armigliato A., Pagnoni G., Zaniboni F., Tinti S. (2011) Tsunami hazard for the city of Catania, eastern Sicily, Italy, assessed by means of Worst-case Credible Tsunami Scenario Analysis (WCTSA), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1217-1232, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1217/2011/, doi: 10.5194/nhess-11-1217-2011.

Zaniboni F., Armigliato A., Tinti S. (2016a), A numerical investigation of the 1783 landslide-induced catastrophic tsunami in Scilla, Italy. Nat Hazards (2016) 84:S455–S470. doi: 10.1007/s11069-016-2461-3.

Zaniboni F., Armigliato A., Tinti S., Pagnoni G., Paparo M.A. (2016b), Numerical investigation of the 1783 landslide-induced tsunami in Scilla (Italy). Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-8953, EGU General Assembly 2016, Vienna (Austria), 17-22 April 2016.