

Analisi del rischio tsunami applicata ad un tratto della costa Ligure

B. FEDERICI¹, F. BACINO, T. COSSO¹, P. POGGI, L. REBAUDENGO LANDÓ², D. SGUERSO¹

¹DIMSET (Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti)

²DIAM (Dipartimento di Ingegneria Ambientale)

Università degli Studi di Genova

Email: bianca.federici@unige.it

Sommario

Lo *tsunami* è un treno d'onde generato in un corpo d'acqua in seguito ad un disturbo improvviso che può derivare principalmente da un forte terremoto, una grande frana, o un'improvvisa attività vulcanica. Le altezze d'onda, irrilevanti al largo, crescono rapidamente quando lo *tsunami* raggiunge le zone costiere, causando locali e rapidi innalzamenti del livello del mare che coinvolgono imponenti masse d'acqua, con conseguenze anche catastrofiche.

Onde di *tsunami* di notevoli dimensioni hanno colpito le coste del Giappone, dell'Alaska, delle isole Hawaii, dell'America meridionale e del Sud-Est Asiatico; essendo il Mar Mediterraneo un'area geologicamente attiva, esso ha caratteristiche idonee al verificarsi del fenomeno, sebbene di intensità minore a causa delle minori dimensioni del bacino; d'altra parte ciò fa sì che il tempo trascorso tra la generazione dello tsunami e l'arrivo dell'onda a riva possa essere molto limitato. Per questo motivo, accanto al possibile sviluppo di una rete di rilevamento e monitoraggio, potrebbe essere utile individuare i tratti di costa maggiormente a rischio, al fine di indicare alle pubbliche amministrazioni potenziali strutture strategiche da proteggere (quali porti, depuratori, ospedali, scuole, strade, ferrovie, etc.), identificare aree sicure dove convogliare la popolazione durante l'evento, e migliorare la sensibilità della popolazione su questo particolare rischio.

Nel presente lavoro è stata implementata una procedura per la realizzazione di Mappe di Inondazione *Tsunami* che permettano di individuare le aree potenzialmente interessate da allagamento nel caso si verifichi uno *tsunami* di altezza d'onda nota. In particolare, è stata valutata la massima risalita verticale dell'onda incidente sulla costa (*run-up*) e la sua successiva propagazione sulla terraferma, in funzione delle caratteristiche morfologiche, della vegetazione e dell'urbanizzazione della zona analizzata. Tale procedura è stata applicata tramite il GIS *open-source* e *free software* GRASS 6.0 per una prima analisi al tratto costiero del ponente ligure compreso tra i comuni di Bergeggi e Noli, in provincia di Savona, ottenendo risultati che sembrano essere realistici nonostante siano state introdotte diverse semplificazioni, a causa della complessità del fenomeno.

1. Introduzione

Lo *tsunami* è un treno d'onde generato in un corpo d'acqua in seguito ad un disturbo improvviso che può derivare da forti terremoti, da importanti frane sottomarine, da attività vulcanica o ancora dall'impatto di un grosso meteorite.

La parola "*tsunami*" in giapponese significa letteralmente "onda del porto". Tale significato è dovuto al fatto che, in seguito ad un maremoto, il moto ondoso può penetrare all'interno dei porti, andare in risonanza con le strutture e provocare seri danni.

L'onda di maremoto (D'Agostino et al., 2004) è un'onda caratterizzata, in mare aperto, da lunghezze e periodi d'onda notevoli ($L \approx 70 \div 160 \text{ km}$ e $T \approx 2 \text{ min} \div 1 \text{ h}$) ed altezze d'onda irrilevanti ($H \approx 60$

cm ÷ 3 m) che crescono rapidamente quando le onde raggiungono le zone costiere, caratterizzate da una bassa profondità del fondale marino. Ciò è dovuto al fatto che:

- per altezze d'onda modeste rispetto alla profondità h del fondale marino, la celerità c_0 di un'onda di *tsunami*, ossia la velocità di propagazione della perturbazione, aumenta con la profondità h secondo la relazione:

$$c_0 = \sqrt{gh} \quad (1)$$

dove g è l'accelerazione di gravità, risultando perciò elevata in mare aperto ($c_0 \approx 800 \text{ km/h}$) e diminuendo in corrispondenza della costa ($c_0 \approx 45 \div 100 \text{ km/h}$);

- nella propagazione dal largo verso riva, si può ipotizzare che il flusso di energia E_f , ovvero l'energia che attraversa la sezione verticale unitaria trasversale all'onda nell'unità di tempo, rimanga costante; questa è funzione dell'altezza d'onda e della celerità secondo la seguente relazione:

$$E_f = \rho g \frac{H^2}{8} c_0 \quad (2)$$

per cui, al diminuire della celerità dell'onda di *tsunami* in prossimità della costa, l'altezza d'onda H aumenta. È questo il motivo per cui lo *tsunami*, impercettibile in mare aperto, può crescere di diversi metri avvicinandosi a riva. Tale trasformazione è rappresentata in figura 1.

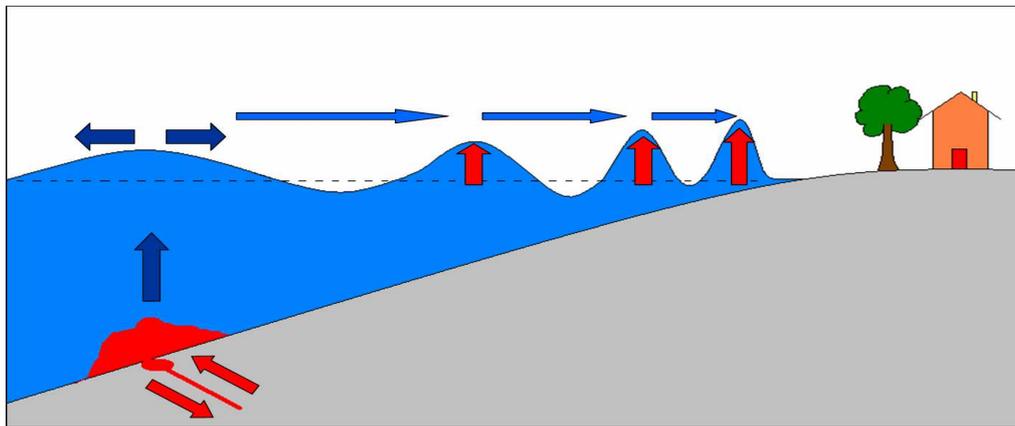


Figura 1. Propagazione delle onde di tsunami dal largo verso riva.

Le onde di *tsunami*, a differenza delle onde generate dal vento, non sono onde frangenti ma piuttosto sono paragonabili a rapide maree, ossia locali e rapidi innalzamenti del livello del mare, che coinvolgono tutta la massa d'acqua presente dal fondo fino alla superficie libera del mare, di larghezza variabile da alcune centinaia di metri fino a diversi chilometri. Ne deriva che il volume d'acqua interessato da tali spostamenti è veramente imponente, dell'ordine di diversi milioni di metri cubi per chilometro di territorio inondato, con portate che potrebbe raggiungere valori dell'ordine di $100 \cdot 000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per questo motivo le conseguenze degli *tsunami* possono essere catastrofiche: la massa d'acqua che invade la terra emersa provoca vittime, distruzione delle vie di comunicazione e delle strutture, erosione delle spiagge e successivo trasporto del materiale eroso sulla terra emersa, asportazione della vegetazione spontanea e delle colture agricole, salinizzazione delle falde, etc.

Nel passato onde di *tsunami* di notevoli dimensioni hanno colpito le coste del Giappone, dell'Alaska, delle isole Hawaii, dell'America meridionale e del Sud-Est Asiatico.

Anche il Mar Mediterraneo è un'area geologicamente attiva con caratteristiche idonee al verificarsi di uno *tsunami*, quali sismicità, eruzioni vulcaniche e rischio di frane sottomarine, particolarmente in corrispondenza delle coste italiane e greche. L'intensità degli eventi è ovviamente di minore intensità

rispetto alle aree oceaniche precedentemente citate, se non altro grazie alle minori dimensioni del bacino (ampiezza e profondità).

Negli ultimi novecento anni in Italia si sono verificati 71 *tsunami*, con una media di oltre 12 eventi ogni 100 anni, nelle seguenti aree (Ortolani et al., 2004):

- 1 nel Lazio;
- 1 nella Calabria Settentrionale Ionica;
- 2 nella Sicilia Settentrionale;
- 2 nella Sicilia Meridionale;
- 3 in Toscana;
- 9 nel Golfo di Napoli;
- 10 lungo le Coste Adriatiche;
- 23 nello stretto di Messina, Sicilia Orientale, Calabria Meridionale Tirrenica e Isole Eolie;
- 14 nella Liguria Occidentale e nella Francia Sud-Orientale.

Occorre sottolineare che le coste italiane non sono protette né da strutture idonee a riparare la costa e limitare i danni, né da opportuni sistemi di allarme. È in questa direzione, quindi, che ci si deve muovere nel futuro per poter garantire un'adeguata sicurezza sia alle persone che alle strutture presenti nelle zone a rischio.

Un utile contributo all'attuazione di piani di allarme *tsunami* potrebbe provenire dalla realizzazione di Mappe d'Inondazione che tengano conto della morfologia del territorio e dell'uso del suolo in prossimità delle coste, fornendo indicazioni utili circa le aree potenzialmente interessate dalla propagazione dell'onda sulla terraferma.

In particolare, nel presente lavoro è stato utilizzato il GIS *open-source* e *free software* GRASS 6.0 secondo una procedura, illustrata nel paragrafo 3, tramite la quale è stata valutata la massima risalita verticale dell'onda *tsunami* incidente sulla costa (*run-up*) e la sua successiva propagazione sulla terraferma, in funzione delle caratteristiche morfologiche, della vegetazione e dell'urbanizzazione della zona analizzata. Tale procedura è stata applicata per una prima analisi al tratto costiero del ponente ligure circostante il comune di Spotorno, compreso tra Bergeggi e Noli, in provincia di Savona (figura 2).

La scelta di tale zona è stata dettata dal desiderio di analizzare la risposta all'arrivo di un'onda di *tsunami* da parte delle differenti tipologie di costa presenti, quali:

- spiagge a debole pendenza prive di protezione, maggiormente esposte al pericolo *tsunami*;
- scogliere rocciose, sicuramente meno soggette a danni, per le quali è interessante valutare l'innalzamento dell'onda nell'impatto.



Figura 2. Mappa della Liguria con indicato il tratto di costa di interesse.

2. Modellazione idraulica

Data la complessità del fenomeno *tsunami*, se ne è affrontata la modellazione suddividendola in una prima fase atta a valutare l'innalzamento dell'onda dovuto all'impatto con la costa (par. 2.1), ed in una seconda che analizzi il propagarsi dell'inondazione sul territorio (par. 2.2).

Le altezze delle onde incidenti a riva dipendono ovviamente dall'importanza del fenomeno che le ha generate, ma anche dalla loro propagazione dal largo verso la costa; a tale riguardo sono state effettuate le seguenti ipotesi semplificative:

- l'onda è stata schematizzata come un'onda rettangolare identificata solamente attraverso la prima cresta;
- si è trascurato il fatto che spesso la prima onda può non essere la più distruttiva ed inoltre non si sono analizzati gli effetti di riflusso;
- si è ipotizzato che il fronte d'onda sia parallelo alla linea di costa in ogni suo punto;
- non si è tenuto conto del fatto che l'altezza d'onda possa subire incrementi in presenza di baie o stretti.

L'altezza d'onda a riva H è stata pertanto determinata considerando il processo di shoaling, che riproduce la variazione dell'altezza d'onda al diminuire della profondità; in particolare, adottando una espressione valida per le onde solitarie al primo ordine di approssimazione (Legge di Green), si ha la seguente relazione:

$$H = H_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

dove h_0 e H_0 sono rispettivamente la profondità del mare e l'altezza d'onda dove questa viene generata, mentre h e H sono i valori in prossimità della costa.

Per valutare i valori di altezza d'onda rappresentativi per l'area in esame, si è fatto riferimento allo *tsunami* causato dal catastrofico terremoto che ha interessato la Liguria il 23 febbraio 1887 di magnitudo stimata pari a 6.2 - 6.5 con epicentro localizzato a 20 km al largo di Imperia; essendo la profondità al largo $h_0 = 2000$ m e quella a riva h in prossimità della tratto di costa analizzato pari a 3 m, ipotizzando un'altezza d'onda al largo H_0 variabile tra 0.1 e 0.5 m, dalla (3) si ottengono valori di altezza d'onda a riva H compresi tra 0.5 e 2.5 m (tabella 1). Nelle successive analisi si sono pertanto considerati tre differenti valori di H , pari a 0.5 m, 1.5 m e 2.5 m. Si tenga conto che il massimo innalzamento del livello del mare osservato durante tale evento è stato valutato ad Imperia pari a 1.5 m; di conseguenza i tre casi che si è deciso di analizzare possono considerarsi rappresentativi rispettivamente di *tsunami* deboli, intensi ed estremi per tali aree.

H_0 [m]	H [m]
0.10	0.51
0.20	1.02
0.30	1.52
0.40	2.03
0.50	2.54

Tabella 1. Altezza d'onda H a riva in funzione dell'altezza d'onda al largo H_0 per valori della profondità sulla costa h e della profondità al largo h_0 caratteristici dell'area in esame.

2.1 Determinazione del run-up

Il *run-up* è una misura della massima risalita verticale dell'onda rispetto alla linea di riva, funzione sia dell'altezza dell'onda incidente a riva, che delle caratteristiche della costa sulla quale la massa d'acqua va ad impattare.

Esso è stato valutato ipotizzando che tutta l'energia cinetica dell'onda incidente la costa si trasformi istantaneamente in energia potenziale, causando un innalzamento della massa d'acqua come schematizzato in figura 3. In realtà tale trasformazione avviene in modo graduale durante la propagazione dell'acqua sulla terraferma, per cui l'innalzamento in figura 3 deriva dall'approssimazione effettuata.

Considerando un'onda *tsunami* incidente su un tratto di costa di inclinazione α rispetto all'orizzontale, i volumi associati al carico cinetico e potenziale per unità di larghezza (intesa parallela alla linea di costa) sono rispettivamente pari a:

$$V_c = HL + \left(\frac{H^2}{2 \tan \alpha} \right) \quad \text{e} \quad V_p = z_{\max} \left(\frac{H}{\tan \alpha} \right) \quad (4a, b)$$

dove L è lunghezza dell'onda incidente e z_{\max} è il massimo sovrizzo raggiunto dall'acqua rispetto all'altezza d'onda H .

Essendo il carico cinetico e potenziale (energia per unità di peso) rispettivamente pari a:

$$H_c = \frac{U^2}{2g} \quad \text{e} \quad H_p = z_{\max} \quad (5a, b)$$

applicando il principio di conservazione dell'energia meccanica ai volumi d'acqua in gioco:

$$\rho g V_c H_c = \rho g V_p H_p \quad (6)$$

con ρ massa volumetrica dell'acqua e g accelerazione di gravità, si ricava:

$$z_{\max} = \sqrt{\frac{U^2}{2g} \tan \alpha \left(L + \frac{H}{2 \tan \alpha} \right)} \quad (7)$$

dove:

- la velocità dell'onda a riva U , valutata localmente in corrispondenza della cresta, risulta pari a $U = c_0 \sqrt{1 + H/h}$, con c_0 celerità dell'onda al largo;
- la lunghezza d'onda L di un'onda solitaria, tagliata in modo da identificare una lunghezza finita, risulta pari a $L = \frac{4q_* h}{\sqrt{3\delta}}$, con $\delta = \frac{H}{h}$ e $q_* = 2.415$.

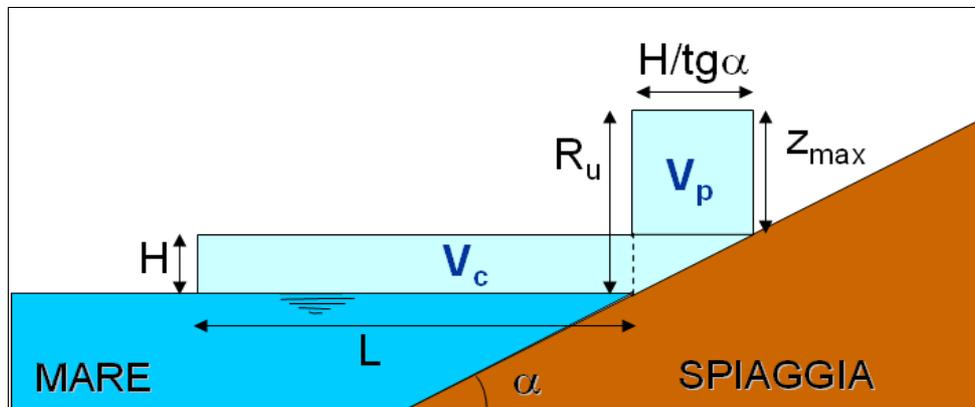


Figura 3. Schematizzazione del fenomeno di run-up nel caso di onda incidente su costa di inclinazione generica rispetto all'orizzontale.

Infine il *run-up* R_U è dato dalla somma dei seguenti contributi:

$$R_U = H + z_{max} \quad (8)$$

risultando perciò funzione della profondità e dell'altezza d'onda a riva, oltre che della pendenza locale in corrispondenza della linea di costa.

2.2 Determinazione dell'inondazione

Per determinare le aree di inondazione si è ipotizzato che l'onda, raggiunta la sua altezza massima, mantenga la condizione di pelo libero orizzontale (figura 4). E' questa un'ipotesi a favore di sicurezza che, come primo approccio al problema, trascura completamente la perdita di energia che la massa d'acqua subisce durante la propagazione sulla terraferma; sotto questa ipotesi l'avanzamento dell'onda verso l'interno della costa dipenderebbe solamente dalle dimensioni dell'onda e dalla morfologia del territorio. Per considerare l'eventuale presenza di ostacoli che l'onda può incontrare, occorrerà tenere conto di un coefficiente di scabrezza ε rappresentativo delle discontinuità della superficie, dovute ad esempio a vegetazione ed urbanizzato.

Pertanto l'estensione della zona inondata I può essere espressa dalla relazione:

$$I = \varepsilon \frac{R_U}{\tan \alpha} \quad (9)$$

con ε coefficiente di scabrezza e α la pendenza locale del tratto di costa interessato.

Nella procedura illustrata in dettaglio nel paragrafo 3, l'inondazione è stata valutata puntualmente, in ogni pixel, noti il *run-up* R_U lungo la linea di costa e i valori di pendenza e scabrezza puntuali del territorio.

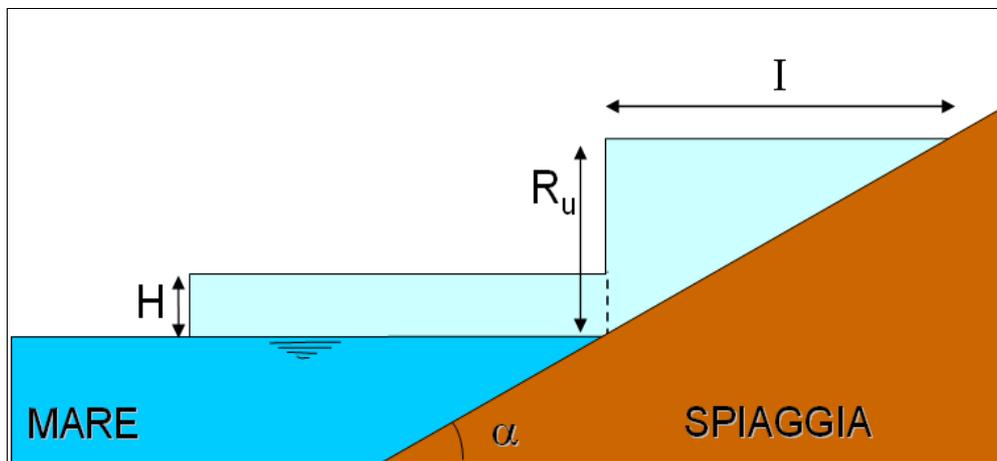


Figura 4. Schematizzazione del processo di inondazione.

3. Procedura adottata

Nel presente lavoro si è cercato di individuare una prima procedura, non troppo complessa ma allo stesso tempo sufficientemente realistica, per la valutazione delle aree potenzialmente interessate da un evento *tsunami*, tramite applicazione della modellazione idraulica descritta nel paragrafo precedente.

Lo strumento adottato è il GIS (*Geographic Information System*) open-source e free software GRASS 6.0 (*Geographic Resources Analysis Support System*) che, oltre a permettere

l'implementazione di moduli dedicati scritti dall'utente, è particolarmente utile nel calcolo di funzioni anche logiche su mappe raster.

Dopo una prima fase di importazione dei dati necessari all'analisi (paragrafo 3.1), si sono valutate le pendenze caratteristiche della zona costiera (paragrafo 3.2) per poi calcolare il *run-up* dell'onda in ogni punto della linea di costa (paragrafo 3.3); quindi, associando a quest'ultimo un'analisi delle caratteristiche morfologiche, vegetazionali e di urbanizzazione dell'area oggetto di studio (paragrafo 3.4), si è giunti alla realizzazione delle mappe d'inondazione (paragrafo 3.5). Per ciascuna fase si riportano per completezza i comandi di GRASS impiegati.

Come già illustrato nel paragrafo 1, la procedura adottata è stata applicata al tratto costiero del ponente ligure circostante il comune di Spotorno interessando parzialmente anche i comuni limitrofi di Bergeggi e Noli, analisi alla quale i paragrafi che seguono si riferiscono.

3.1 Importazione dei dati

I dati cartografici utilizzati per le analisi che seguono, sono prodotti della Regione Liguria nel sistema di riferimento Roma'40 con proiezione cartografica Gauss-Boaga:

- Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5000 nel formato vettoriale - shape;
- Carta Uso del Suolo alla scala 1:25000 nel formato vettoriale - shape;
- Modello Digitale del Terreno (DTM) con risoluzione 5 m x 5 m (raster - ascii).

L'area in esame comprende interamente il comune di Spotorno e parzialmente quello di Bergeggi e Noli, come illustrato nella figura 5.

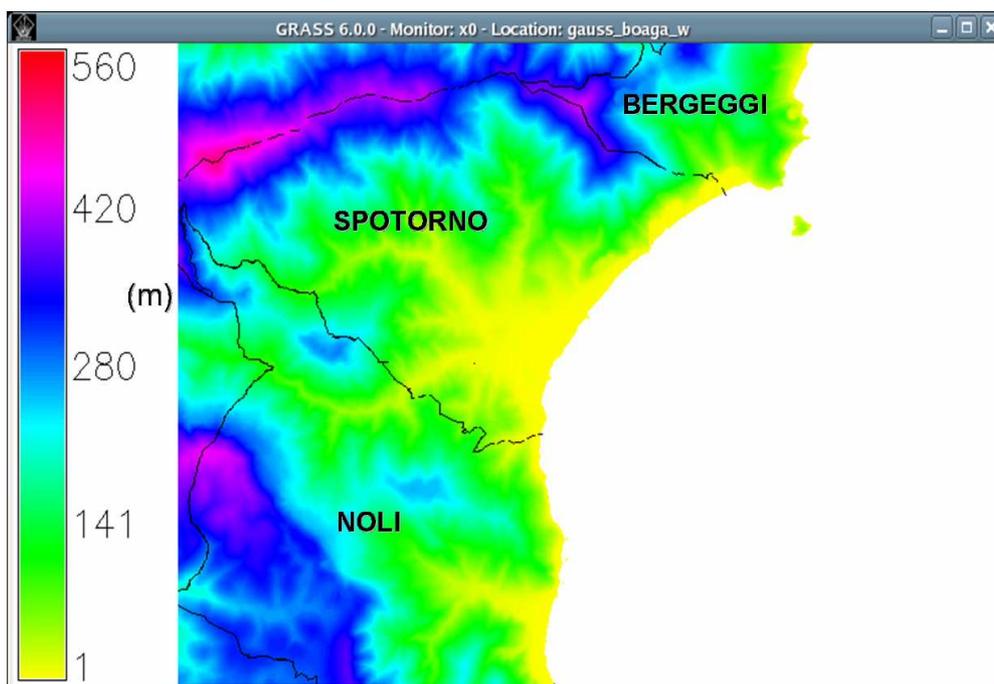


Figura 5. DTM dell'area in esame, con indicati i comuni interessati.

3.2 Pendenza media caratteristica della zona costiera

Al fine di calcolare i valori di *run-up* è stato necessario associare a ciascun punto della linea di costa il valore della pendenza rappresentativa dell'area soggetta all'impatto dell'onda, mediante la seguente procedura:

- realizzazione della mappa delle pendenze a partire dal DTM attraverso il comando `r.slope.aspect`;

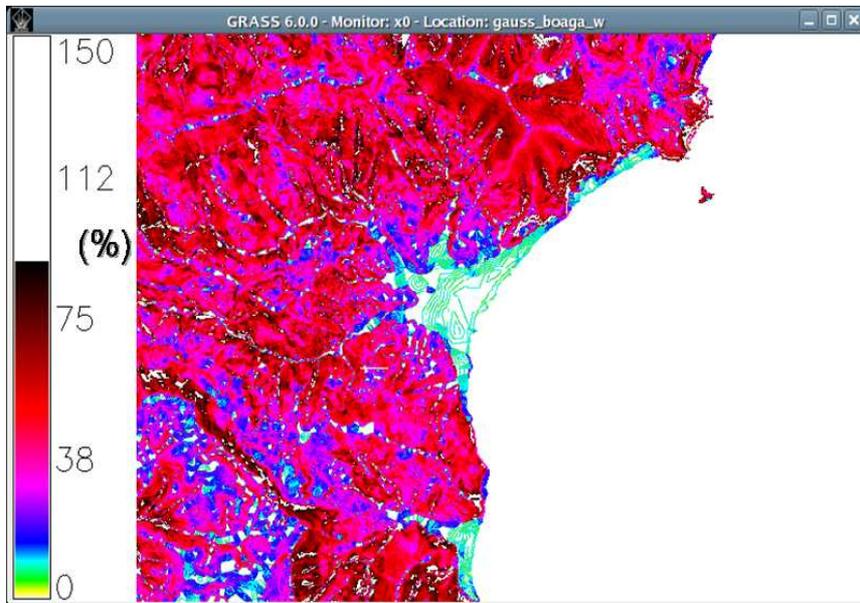


Figura 6. Mappa delle pendenze.

- calcolo dei valori medi delle pendenze su aree di dimensione tali da rappresentare l'andamento medio del territorio sul quale l'onda va a impattare, a monte della linea di costa; questo è stato effettuato attraverso il comando `r.neighbors` quale media mobile applicata ad aree di 9 x 9 pixels corrispondenti a 45m x 45m, avendo escluso dal calcolo i valori relativi al territorio bagnato dal mare.

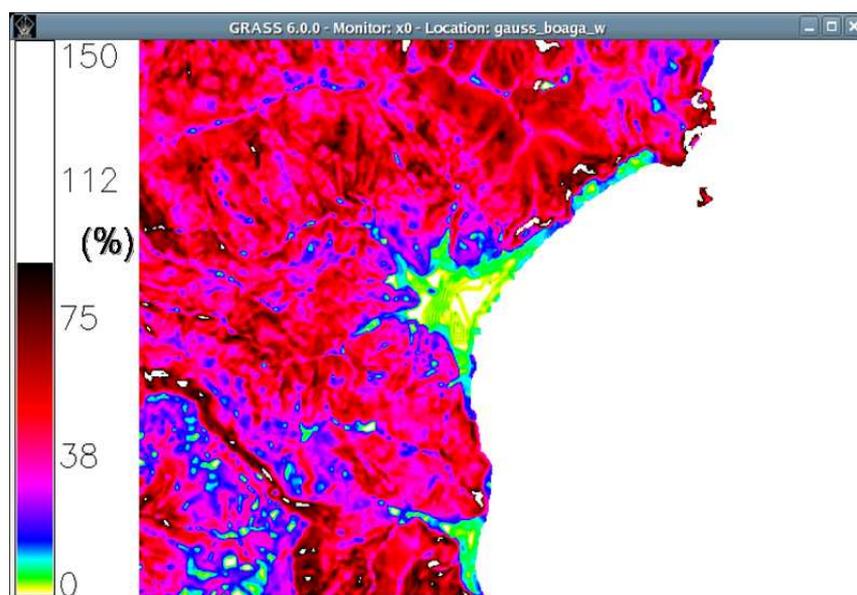


Figura 7. Mappa dei valori di pendenza medi su (45x45) m.

- associazione alla linea di costa (presente nel CTR vettoriale) del valore della pendenza media precedentemente calcolato. Tale operazione è stata ottenuta attraverso la creazione di una fascia di rispetto, detta *buffer*, di larghezza a monte della linea di costa pari a 5 m (corrispondente alla dimensione del pixel raster; operazione effettuata tramite il comando v.buffer con relativa creazione della tabella del database associato tramite il comando v.digit), la successiva trasformazione del *buffer* in raster (v.to.rast) per ottenere infine, tramite intersezione della mappa così ottenuta con quella delle pendenze medie con r.mapcalc, la mappa raster della sola linea di costa con associata ad ogni pixel i valori delle pendenze medie (figura 8).

In figura 8 è riportata la linea di costa, discretizzata ai 5 m, con associati i valori delle pendenze medie estratte dalla mappa visualizzata in figura 7. I valori elevati delle pendenze evidenziano la presenza di una scogliera (nel tratto di confine tra il comune di Bergeggi e quello di Spotorno), mentre i valori molto lievi delle pendenze sono in corrispondenza del tratto di arenile del comune di Spotorno.

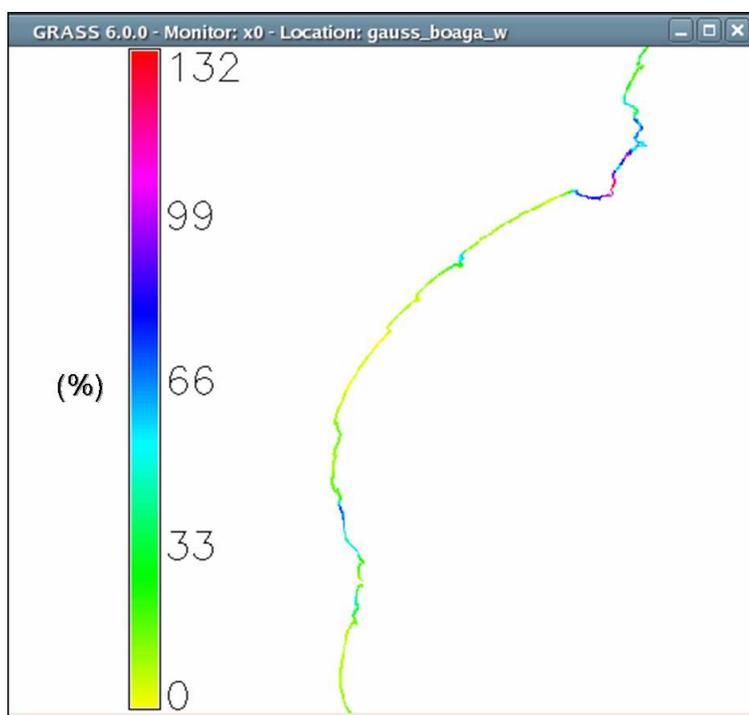


Figura 8. Linea di costa vettoriale a cui è stata associata la pendenza media caratteristica del tratto di costa.

3.3 Run-up dell'onda tsunami incidente sulla costa

Una volta ottenuti i valori delle pendenze medie lungo la linea di costa del tratto in esame, si è proceduto al calcolo dei valori di *run-up* a questa associati per le diverse altezze d'onda incidenti, valutate in precedenza nel paragrafo 2.

L'espressione utilizzata per il calcolo del run-up, ottenuta dalle equazioni (7) e (8), è la seguente:

$$R_U = H + \sqrt{\frac{U^2}{2g} \tan \alpha \left(L + \frac{H}{2 \tan \alpha} \right)} \quad (10)$$

dove R_U è il *run-up*, H è l'altezza d'onda a riva, L e U sono rispettivamente la lunghezza e la velocità dell'onda che giunge a riva (a loro volta funzioni della profondità e della altezza d'onda a riva), mentre $\tan \alpha$ è il valore locale della pendenza media ottenuta al paragrafo precedente.

Anche in questo caso risulta particolarmente utile il comando di GRASS `r.mapcalc`, comando che permette l'applicazione a mappe raster di espressioni sia logiche che numeriche; la (10) è stata quindi applicata a ciascun pixel della linea di costa ottenuta al paragrafo 3.2, mediante la seguente sintassi:

$$runup_H = if(pendenza_med > 0, H + \sqrt{k'(pendenza_med/100) + k''})$$

dove k' e k'' sono costanti funzione delle caratteristiche dell'onda incidente analizzata, che nel caso in esame valgono rispettivamente 71.72 e 0.4375 per $H=0.5$ m, 53.24 e 1.6875 per $H=1.5$ m, e 50.40 e 3.4375 per $H=2.5$ m.

Nelle figure 9, 10 e 11 sono riportate le mappe del *run-up* per le 3 altezze d'onda prese in considerazione; si noti come i valori varino da qualche metro in corrispondenza delle spiagge alla decina di metri in corrispondenza delle scogliere, anche nel caso di altezza d'onda $H=0.5$ m.

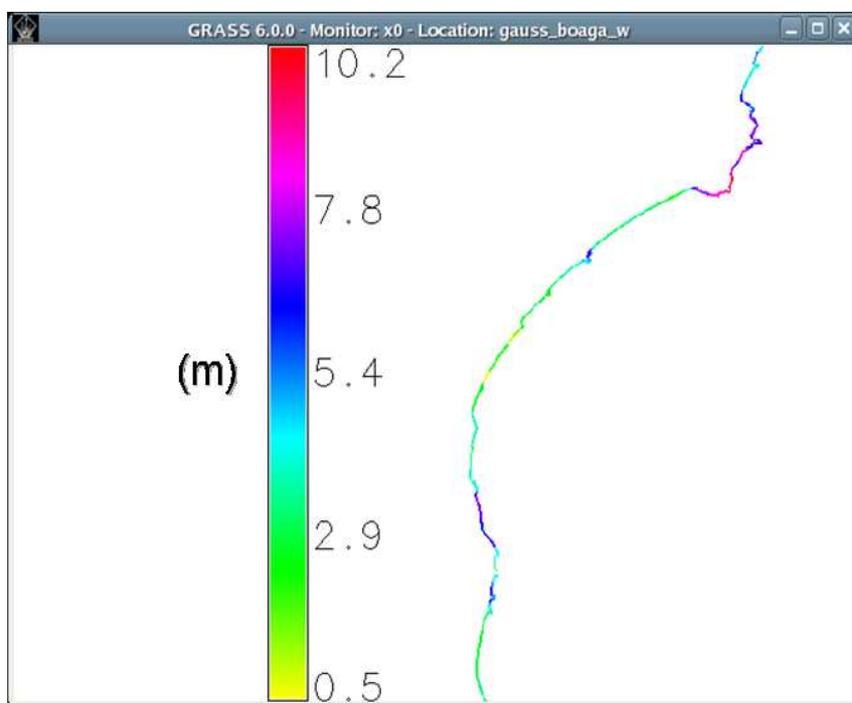


Figura 9. Mappa del *run-up* per altezza d'onda a riva $H = 0.50$ m.

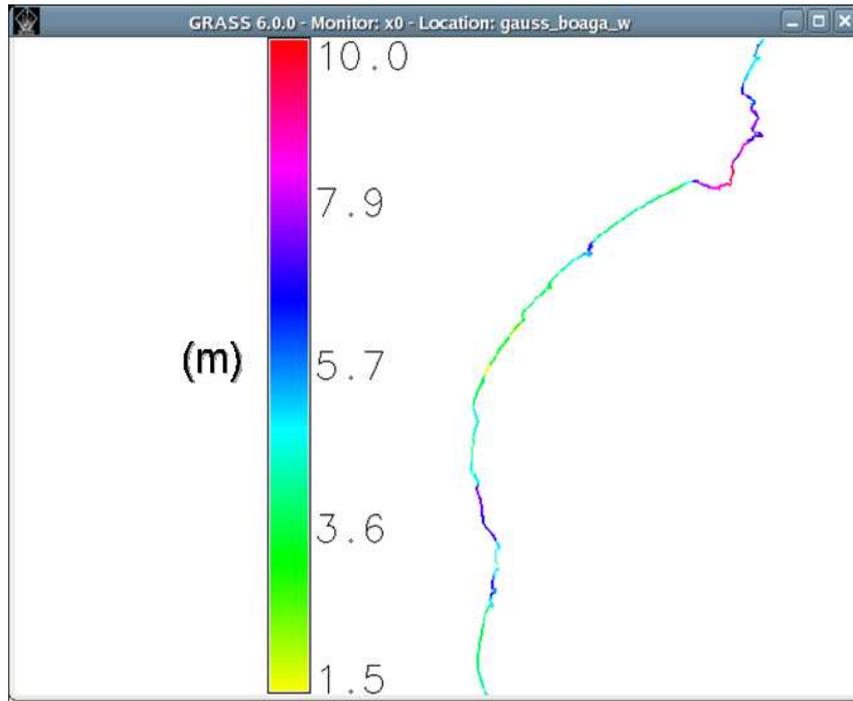


Figura 10. Mappa del run-up per altezza d'onda a riva $H = 1.50$ m.

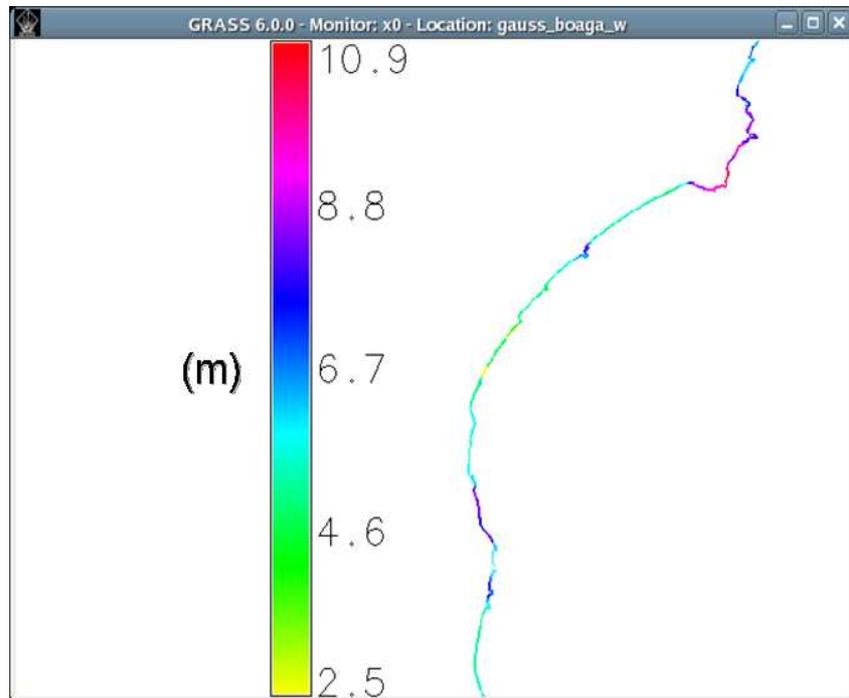


Figura 11. Mappa del run-up per altezza d'onda a riva $H = 2.50$ m.

3.4 Analisi della scabrezza del territorio

Per valutare la propagazione dell'onda *tsunami* verso l'interno della costa occorre tenere conto sia delle caratteristiche morfologiche dell'area in esame, che della presenza o meno di ostacoli e della loro natura.

Nella presente analisi si sono considerate le aree urbanizzate e quelle coperte da vegetazione; si è quindi proceduto ad individuare macro-zone di territorio sufficientemente omogenee dal punto di vista delle discontinuità che la superficie oppone alla propagazione dell'onda, a cui poter associare un coefficiente di scabrezza ε (compreso tra 0 e 1).

La ricerca di tali macro-zone è stata effettuata riclassificando la Carta Uso del Suolo a partire dalla stessa trasformata in formato raster (v.to.rast, figura 12), raggruppando in un'unica classe tutte le categorie aventi le medesime caratteristiche dal punto di vista della capacità di rallentare l'onda *tsunami* sulla terraferma.

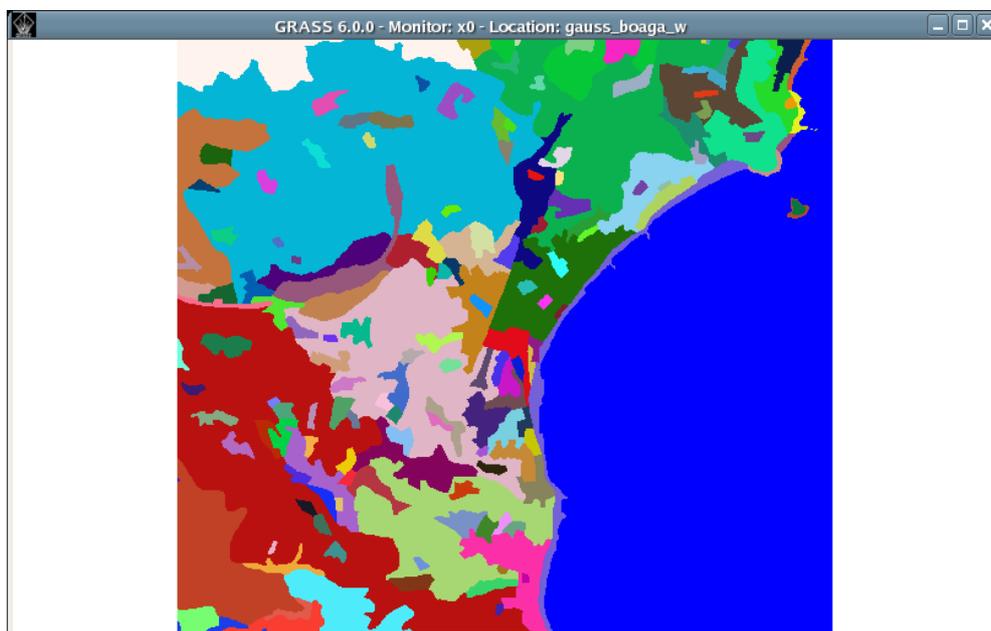


Figura 12. Carta Uso del Suolo in formato raster.

Attraverso il comando r.reclass, sono state perciò individuate 12 categorie principali e ad ognuna di queste è stato attribuito un valore di scabrezza ε caratteristico: per esempio, alla vegetazione alta è stato assegnato il valore 0.2 per l'elevata propensione a smorzare l'impetuosità dello *tsunami*, mentre alle spiagge si è conferito il valore 1 per la scarsa efficacia nel contrastare l'onda in arrivo.

In figura 13 è riportata la mappa della scabrezza così ottenuta, mentre in tabella 2 è riportata la legenda di tale mappa con indicati i coefficienti di scabrezza che sono stati assegnati a ciascuna classe.

Un analogo risultato può essere ottenuto, nel caso non si disponga della Carta Uso del Suolo, attraverso la classificazione di immagini aeree o da satellite della zona in studio.

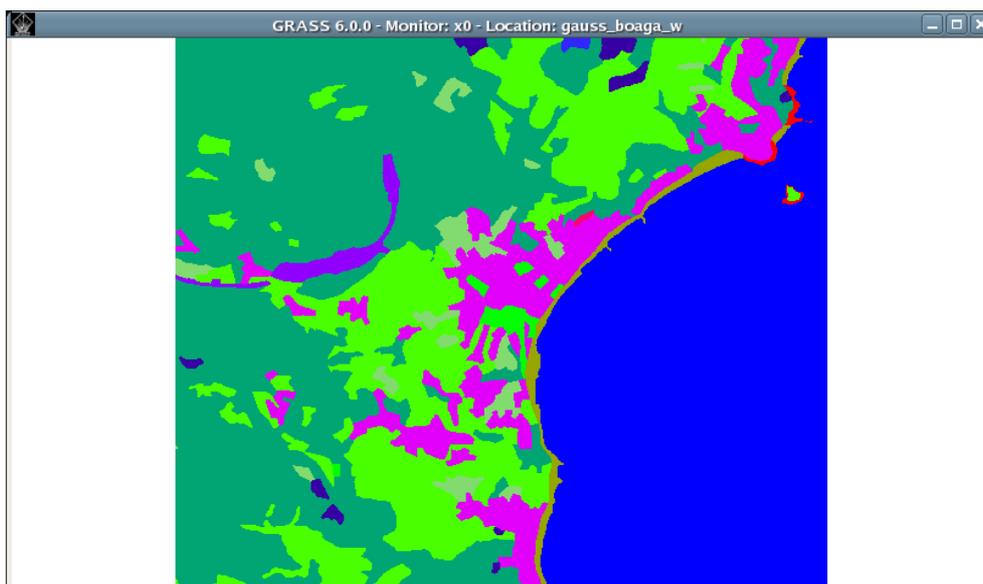


Figura 13. Carta Uso del Suolo riclassificata.

Classe	Colore	ε
Vegetazione alta		0.2
Vegetazione media		0.5
Vegetazione bassa		1
Aree insediate		0.8
Aree verdi urbane		0.9
Aree industriali e/o commerciali		0.8
Coste rocciose		1
Rocce		1
Spiagge		1
Discarica		0.9
Reti autostradali e ferroviarie		0.9
Mare		1

Tabella 2. Valori di scabrezza associati alle diverse classi riportate in figura 13.

3.5 Mappe di inondazione

Le mappe di inondazione sono state create confrontando, nel generico pixel considerato, la quota del run-up R_u dell'onda nel punto della linea di costa più prossimo a tale pixel, con la quota z dello stesso fornita dal Modello Digitale del Terreno, mediante la relazione:

$$W = \varepsilon * R_u - z \quad (11)$$

dove ε è il coefficiente di scabrezza, desunta dalla mappa di Uso del Suolo riclassificata.

Se W risulta positivo, il pixel viene considerato inondato e gli viene assegnato il valore 1, mentre ai pixel caratterizzati da $W < 0$ viene assegnato il valore 0 (non inondato).

Non si è pertanto adottata l'espressione (9) descritta nel paragrafo 2.2, secondo la quale si valutava l'estensione dell'inondazione nell'ipotesi di pendenza e scabrezza uniformi sul territorio.

Per eseguire tale calcolo è stato necessario assegnare al generico pixel considerato il valore di *run-up* del punto della linea di costa più prossimo ad esso, ipotizzando che da tale punto sia proseguita la propagazione dell'onda sino al pixel considerato, trascurando così l'effettivo percorso dell'onda nella sua propagazione sulla terraferma. La mappa di tali associazioni è stata ottenuta attraverso un codice di calcolo appositamente implementato, applicato ad una fascia di rispetto della profondità di 500 m a partire dalla linea di costa. Un esempio per il caso di altezza d'onda a riva pari a 1.5 m è riportato in figura 14.

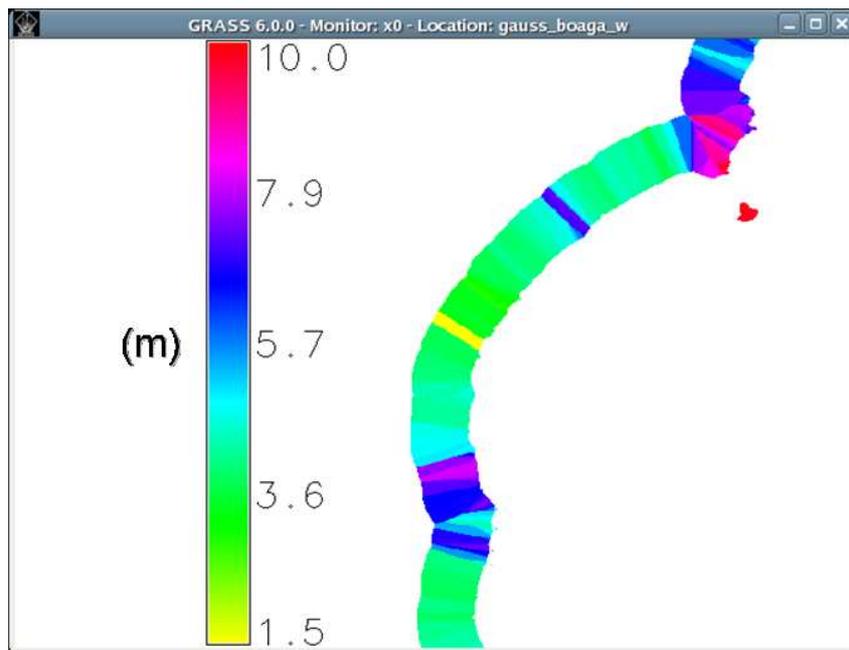


Figura 14. Valore del run-up assegnato ad ogni pixel appartenente al buffer di 500 m; caso per altezze d'onda a riva di 1.5 m.

Le mappe di inondazione sono state quindi ottenute applicando la (11) per diverse altezze d'onda a riva (pertanto per differenti mappe di R_u), attraverso il comando `r.mapcalc` utilizzando la seguente sintassi:

$$Inond_H = if(((scabrezza)*Ru_H - DTM) >= 0, 1) + if(((scabrezza)*Ru_H - DTM) < 0, 0)$$

In figura 15 sono riportati i risultati per l'intero tratto in esame relativi ai tre valori di altezza d'onda a riva analizzati. Ovviamente la superficie inondata aumenta al crescere dei valori di H ipotizzati. Si noti inoltre che le zone più scoscese (scogliere) non sono interessate dal fenomeno se non in minima parte, mentre in corrispondenza delle spiagge a debole pendenza l'inondazione si propaga verso l'interno, fino a 400m dalla linea di costa.

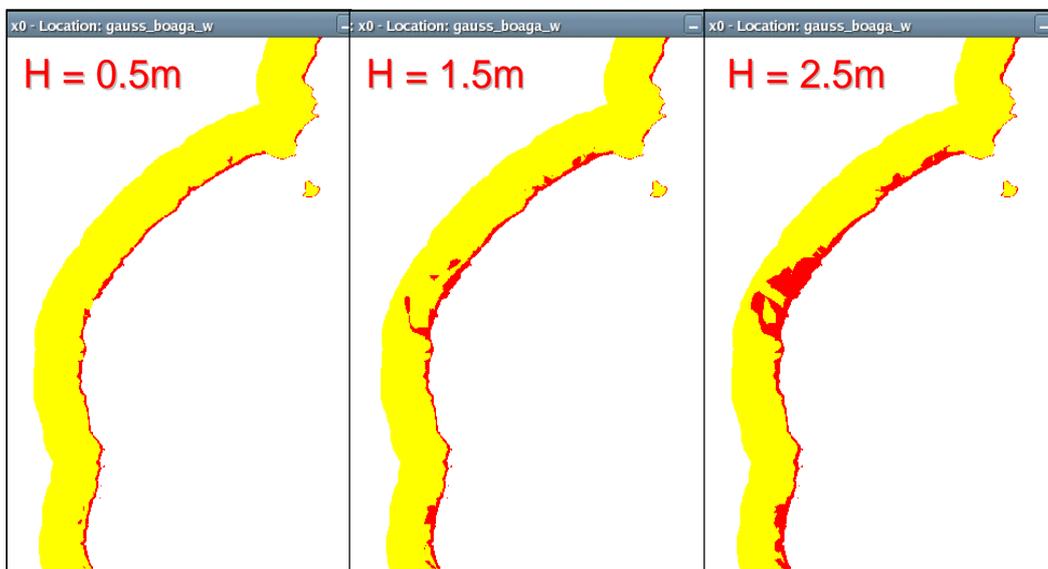


Figura 15. Mappa di Inondazione per $H = 0.5\text{ m}$, 1.5 m , 2.5 m .

4. Analisi dei danni

E' stata infine eseguita una prima analisi dei principali danni che un ipotetico *tsunami* potrebbe causare, secondo quanto esposto nei paragrafi precedenti, focalizzando l'attenzione sul territorio del comune di Spotorno.

Una prima valutazione delle aree interessate da un'eventuale inondazione è fornita dalle figure 16, 17 e 18 relative alle tre altezze d'onda a riva analizzate. Si noti come un'onda di *tsunami* di altezza a riva limitata ($H=0.5\text{ m}$) interessi quasi unicamente le spiagge, mentre inondazioni derivanti da altezze d'onda a riva più importanti interessano sensibilmente il centro abitato.

Ciò si può quantificare calcolando attraverso il comando `r.report` i metri quadrati di superficie inondata corrispondente a spiagge, strade ed edifici, per ognuna delle tre altezze d'onda a riva considerate (tabella 3).

Sup. Inondata (m^2)	Spiagge	Strade	Edifici
$H=0.5\text{m}$	78,000	22,000	10,000
$H=1.5\text{m}$	100,000	61,000	36,000
$H=2.5\text{m}$	111,000	135,000	109,000

Tabella 3. Superficie inondata per uso del suolo.

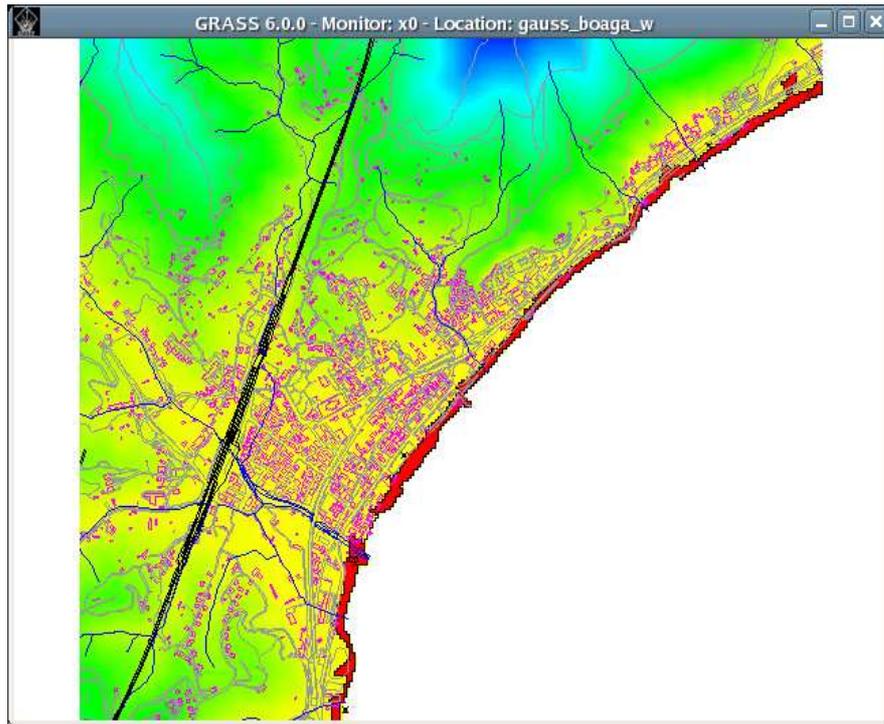


Figura 16. Area del comune di Spotorno inondata per $H = 0.5$ m.

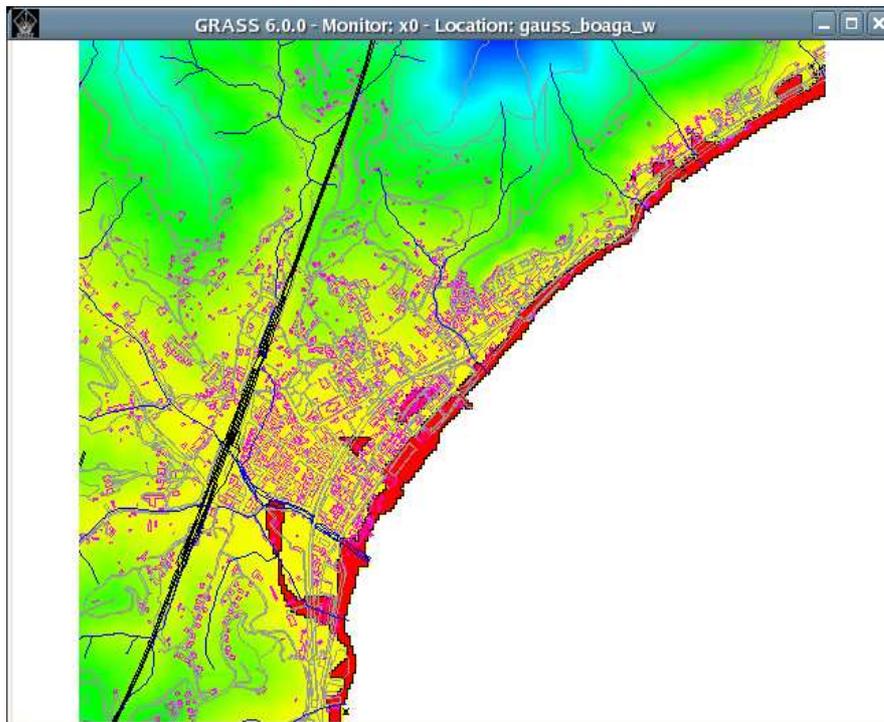


Figura 17. Area del comune di Spotorno inondata per $H = 1.5$ m.

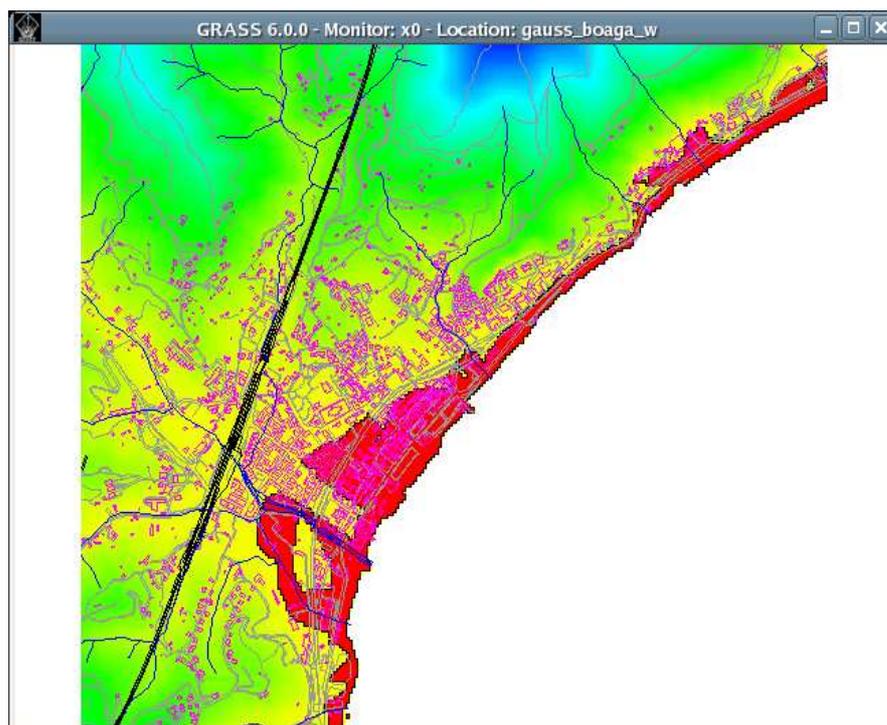


Figura 18. Area del comune di Spotorno inondata per $H = 2.5$ m.

Poiché la superficie inondata interessa soprattutto le spiagge, è stata effettuata un'analisi dei possibili danni in tali aree.

Da una ricerca sul territorio del comune in esame, si è valutato come:

- il 25% della superficie totale delle aree demaniali marittime è occupata nella stagione estiva da attrezzature “fisse”, quali cabine e bar-ristoranti (quasi tutte le strutture vengono poi rimosse nella stagione invernale);
- per tali aree si è stimata in media la presenza di una cabina ogni 7 m²;
- per le superfici non occupate da attrezzature “fisse” si è stimato mediamente un set di attrezzatura “mobile” (ombrellone+sdraio+lettino) in numero pari al numero di cabine più il 10%;
- i clienti presenti in uno stabilimento balneare nel periodo più affollato, si è stimato essere pari a 4-5 volte il numero delle cabine.

La tabella 4 mostra il risultato di tale analisi valutando i possibili danni arrecati alle spiagge, in termini di strutture e di persone coinvolte.

	N° cabine	N° set attrezzatura “mobile”	Max n° clienti coinvolti
<i>H=0.5m</i>	2,800	3,000	12,500
<i>H=1.5m</i>	3,550	3,900	16,000
<i>H=2.5m</i>	3,950	4,350	18,000

Tabella 4. Strutture e persone coinvolte sulle spiagge, per differenti altezze d'onda a riva.

Una quantificazione economica di massima del possibile danno arrecato agli stabilimenti balneari è riportata in tabella 5, ipotizzando un costo orientativo di 1000 € per cabina e 380 € per un set “ombrellone+sdraio+lettino”; nella valutazione economica non si sono considerati i danni alle strutture fisse quali bar e ristoranti e tanto meno quelli alle persone.

	Cabine [€]	Set attrezzatura “mobile” [€]
<i>H=0.5m</i>	2,800,000	1,150,000
<i>H=1.5m</i>	3,550,000	1,500,000
<i>H=2.5m</i>	3,950,000	1,650,000

Tabella 5. Quantificazione economica del possibile danno a cabine e strutture mobili degli stabilimenti balneari.

Si fa presente infine, come l'impatto dell'onda *tsunami* potrebbe avere conseguenze notevolmente differenti in funzione del periodo temporale dell'ipotetico evento, potendo interessare sino a diverse migliaia di persone nei periodi estivi con forte affluenza di turisti, comportando un pericolo non trascurabile per le vite umane per cause dirette o indotte dall'evento stesso.

5. Conclusioni

Nel presente lavoro è stata costruita una procedura per valutare la massima risalita verticale dell'onda *tsunami* incidente sulla costa (*run-up*) e la sua successiva propagazione sulla terraferma, in funzione della morfologia del territorio e dell'uso del suolo delle coste. Essa è stata applicata tramite il GIS *open-source* e *free software* GRASS 6.0 al tratto costiero del ponente ligure relativo al comune di Spotorno, compreso tra il comune di Bergeggi e quello di Noli, in provincia di Savona, come primo approccio a tale analisi.

Nonostante siano state introdotte diverse semplificazioni sia a causa della complessità del fenomeno sia al fine di applicare tale procedura ad aree anche molto estese per un'analisi preliminare dei possibili danni, i risultati ottenuti sembrano essere realistici. Nell'area in esame, l'inondazione potrebbe interessare fasce costiere di estensione compresa tra i 50 e i 400 m, a seconda dell'entità del fenomeno, debole, intenso o di estrema intensità.

Poiché, a causa delle dimensioni ridotte del bacino del Mar Mediterraneo, il tempo trascorso tra la generazione dello tsunami e l'arrivo dell'onda a riva potrebbe essere molto limitato, le Mappe d'Inondazione prodotte potrebbero avere una funzione informativa e preventiva, sia per migliorare la sensibilità della popolazione circa questo particolare rischio, sia indicando alle pubbliche amministrazioni le strutture strategiche potenzialmente interessate (quali porti, depuratori, ospedali, scuole, strade, ferrovie, etc.), fornendo stime delle aree inondate e una valutazione di massima degli eventuali danni. Tali mappe potrebbero infine essere utilizzate per identificare aree di raccolta sicure dove convogliare la popolazione durante l'evento.

La procedura può essere applicata a qualsiasi tratto costiero (Mare Mediterraneo od Oceano) note le caratteristiche dell'onda *tsunami* che può interessare tali aree e le caratteristiche morfologiche e di uso del suolo del territorio in esame.

Ringraziamenti

I dati cartografici impiegati nell'applicazione riportata sono stati gentilmente forniti dalla Regione Liguria, che qui si ringrazia, nell'ambito della Convenzione Quadro tra Regione Liguria e Università degli Studi di Genova.

Si ringrazia inoltre il Comune di Spotorno per la gentile collaborazione dimostrata nella fornitura dei dati relativi alle aree demaniali marittime per il territorio di propria competenza.

Bibliografia

- D'Agostino G., Ortolani F., Pagliuca S. (2004), Tsunami made in Italy, *Geologi - Bollettino trimestrale dei Geologi della Campania*, No 3-4, pp 20-37.
- Keller J.B., Keller H.B. (1964), Water wave run-up on a beach, *Service bureau corporation*, New York, Contract NONR-3828(00).
- Ortolani F., Pagliuca S., Serva L. (2004), Geological Causes of last millennium tsunamis affecting the Italian coast, *32nd IGC Congress*, Florence.
- Pelinovsky E., Kharif C., Riabov I., Francius M. (2001), Study of tsunami propagation in the Ligurian Sea, *Natural Hazards and Earth System Science*, No 1, pp 195-201.
- Sito ufficiale di GRASS: <http://grass.itc.it/>
- Tinti S., Maramai A., (1996), Catalogue of tsunamis generated in Italy and in Cote d'Azur, France: a step towards a unified catalogue of tsunamis in Europe, *Annali di Geofisica*, Vol 36, No 6, pp 1253-1299.
- Tinti S., Maramai A., (1998), Large Tsunamis and Tsunami Hazard from the New Italian Tsunami Catalog, *Phys. Chem. Earth (A)*. Vol. 24, No 2, pp 151-156.