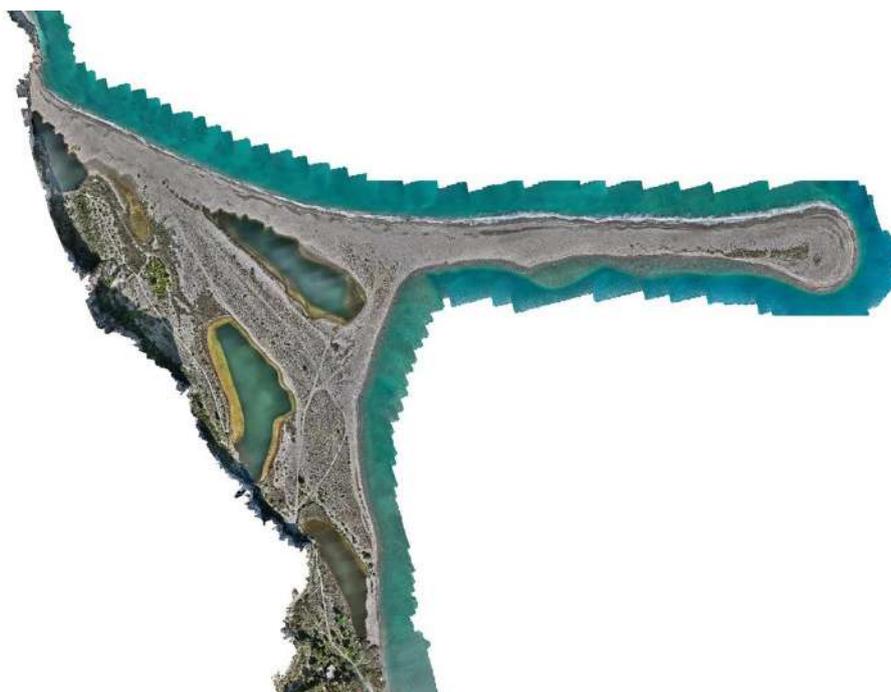


**Sistema di monitoraggio multidisciplinare per una gestione resiliente delle aree  
costiere**  
**Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas**



**Activity 4.1 Rilievo delle caratteristiche geomorfologiche e  
sedimentologiche dell'Unità Fisiografica. Deliverable 4.1.1**

Partner responsabile  
Università degli Studi di Messina  
Prof. G. Randazzo

Dicembre 2023

## INDICE

### Indice

<b>PREMESSA .....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>6</b>
<b>1 RILIEVO TOPOGRAFICO – MORFOLOGICO DELLA SPIAGGIA .....</b>	<b>9</b>
<b>Strumentazione utilizzata .....</b>	<b>9</b>
Sistema GNSS per il rilievo dei punti a terra.....	11
<b>Rilievo aerofotogrammetrico .....</b>	<b>12</b>
<b>Programmazione delle operazioni .....</b>	<b>13</b>
<b>Rilievo.....</b>	<b>14</b>
<b>Trasformazione delle coordinate .....</b>	<b>15</b>
<b>Elaborazione, orientamento e restituzione dei risultati .....</b>	<b>16</b>
<b>Analisi del rilievo morfologico della spiaggia emersa .....</b>	<b>18</b>
<b>2 RILIEVO BATIMETRICO .....</b>	<b>20</b>
<b>Strumentazione.....</b>	<b>20</b>
Mezzo nautico .....	20
Software di navigazione.....	21
<b>Sistema di posizionamento e Datum geodetico.....</b>	<b>21</b>
<b>Rilievo batimetrico Sigle Beam.....</b>	<b>22</b>
<b>Procedura di elaborazione dati.....</b>	<b>24</b>
Trattamento e pulizia dati .....	25
Calibrazione.....	26
Riduzione di marea .....	26
Modello Digitale del Terreno.....	26
<b>Risultati e discussione.....</b>	<b>27</b>
<b>3 SEDIMENTI .....</b>	<b>28</b>
<b>Campionamento.....</b>	<b>28</b>
<b>Metodologia di laboratorio Analisi sedimentologiche .....</b>	<b>30</b>
<b>Risultati e discussione.....</b>	<b>33</b>
Spiaggia emersa .....	34
Spiaggia sommersa .....	34
<b>4 USO DEL SUOLO.....</b>	<b>36</b>

<b>5 ANALISI SISMICA IN OTTICA TSUNAMI (Unità Fisiografica di Capo Milazzo e Capo Tindari)</b>	
<b>Contributo Dott. Franco Italiano .....</b>	<b>37</b>
<b>Velocità GPS, tettonica e sismicità in Italia: il golfo di Patti nel quadro generale .....</b>	<b>41</b>
<b>SINTESI.....</b>	<b>50</b>

## **Report**

**A DTM e ortofoto**

**B transetti e analisi morfologica**

**C batimetria**

**D sedimenti e parametri**

**E uso del suolo**

## PREMESSA

Nell'ambito del progetto REMACO, Sistema di monitoraggio multidisciplinare per una gestione resiliente delle aree costiere - Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas, finanziato nell'ambito della III call del Programma Interreg Italia – Malta, il Work Package 4 presenta un'Attività 4.1 che ha l'obiettivo (deliverable 4.1.1) di effettuare una caratterizzazione morfologica e sedimentologica dell'Unità Fisiografica oggetto dello scaling up progettuale (Capo Tindari – Capo Milazzo) e delle spiagge di Ramla e San Blas (Gozo).

Di seguito vengono riportati gli OBIETTIVI, l'OUTPUT PRINCIPALE e l'INDICATORE dell'Attività 4.1 e del relativo deliverable 4.1.1.

### Obiettivi

*omissis*

*La prima attività attiene alla caratterizzazione morfologica e sedimentologica dell'unità fisiografica oggetto dello scaling up progettuale. In particolare, UNIME si occuperà di effettuare un rilievo topo-batimetrico dell'area di studio. I rilievi della spiaggia emersa saranno condotti con tecnica aerofotogrammetrica utilizzando droni, mentre i rilievi batimetrici verranno condotti per transetti con tecnologia single-beam. Tutti i dati raccolti verranno utilizzati per realizzare un modello digitale del terreno che comprenda sia la spiaggia emersa che quella sommersa. Inoltre, UNIME e UNIKORE provvederanno alla raccolta di sedimenti sulla spiaggia al fine di condurre la caratterizzazione sedimentologica della stessa.*

### Output principale

*Il primo attiene alla "Superficie di costa emersa e sommersa interessata dal sistema di monitoraggio". In particolare, si prevede di sottoporre a controllo e monitoraggio un tratto di costa pari a 70 km<sup>2</sup>. Tale output progettuale fa riferimento all'indicatore di output del programma 3.2. In tale area si provvederà a valutare le caratteristiche ambientali che possono influire sui rischi omissis.*

*omissis*

### Indicatore

*La base del Sistema di monitoraggio è il rilievo aerofotogrammetrico su cui verrà successivamente modellato il rilievo sedimentologico (90 campioni), geomorfologico (30 transetti), omissis.*



## INTRODUZIONE

La finalità del progetto REMACO è mirata alla definizione di tecniche di monitoraggio finalizzate all'analisi di aree costiere in funzione di un potenziale studio ambientale e comunque legate a potenziali rischi costieri.

Per ragioni diverse e per poter valorizzare al meglio i progetti BESS e NEWS, di cui REMACO è uno spin off di capitalizzazione, le aree selezionate sono state diverse anche in funzione delle infrastrutture e dalle curiosità derivanti dai precedenti progetti.

Con il deliverable 4.1.1 che si associa con il 4.2.1 (dedicato alla mappatura della Posidonia o.) lo studio è stato mirato all'analisi geomorfologico – sedimentologica del tratto di mare compreso tra i capi Milazzo e Tindari definiti impropriamente Unità Fisiografica e nelle baie di Ramla e San Blas nell'Isola di Gozo a Malta.

L'unità fisiografica (U.F.) è quell'area di litorale all'interno della quale la dinamica dei sedimenti è confinata da promontori o strutture antropiche che condizionano le caratteristiche meteorologiche interne e impediscono scambi con l'esterno; Nel Piano Regionale Contro l'Erosione Costiera (PRCEC) l'area ricade nell'Unità Fisiografica di I livello (ex UF PAI n. 9) compresa tra Capo Milazzo e Capo d'Orlando; con il PRCEC vengono introdotte le Unità Fisiografiche di II ordine che permettono di definire meglio gli ambiti degli studi ambientali, in questo contesto il tratto di costa considerato ricade nell'UF di II ordine compresa tra Capo Calavà e Capo Milazzo; tale definizione viene confermata anche dal III livello di UF costituita dal PRCEC, e comprende la Spiaggia di San Giorgio e di Saliceto, la Spiaggia di Patti e di c.da Praia, la Foce del Torrente Timeto, Spiaggia di Mongiove, le pocket beaches di Capo Tindari e Lingua di Sabbia di Marinello, la Spiaggia di Oliveri, la Spiaggia di Falcone, la Spiaggia di Furnari, l'area di Porto Rosa, la Spiaggia di Acquitta, la Foce del Torrente Mazzarrà, il Lido Marchesana, la Foce del Torrente Termini, la Spiaggia di c.da Battifoglia e di Calderà, la Spiaggia di Torretta, Sla spiaggia S. Papino, la Spiaggia dell'Agonia, e le pocket beaches della Penisola di Milazzo Ovest; queste spiagge sono comprese nei comuni di Gioiosa Marea, Patti, Oliveri, Falcone, Furnari, Terme Vigliatore, Barcellona Pozzo di Gotto e Milazzo.

La scelta dell'ambito territoriale compreso tra i capi Tindari e Milazzo è stata dettata dal fatto che comunque l'aggettanza della lingua di sabbia di Marinello, ai piedi di Capo

Tindari, costituiva una barriera nei confronti della deriva dei sedimenti verso Ovest e comunque individuava un corridoio ecologico sedimentologico a se stante.

Lo studio del deliverable 4.1.1. è finalizzato a definire le migliori tecniche per raggiungere lo scopo di analizzare le caratteristiche topografico – sedimentologiche, in funzione di un eventuale rischio costiero. E' utile ricordare che al di là della necessità dei risultati da ricercare è utile definire delle tecniche che siano sostenibili dal punto di vista economico e operativo.

Per quanto riguarda questa specifica area, oltre al rischio erosione costiera, per cui sono stati eseguiti il rilievo aerofotogrammetrico da drone della spiaggia emersa, il rilievo batimetrico della spiaggia sommersa e la caratterizzazione tessiturale delle spiagge emersa e sommersa, alla luce dell'analisi sismica, mirata all'area del Golfo di Patti, si è individuato un rischio tsunami, non trascurabile.

Da una rapida ricerca, ci si è resi conto che in base alle analisi pubblicate dall'ISPRA il rischio viene considerato come importante, ma il livello di dettaglio della valutazione del rischio non risulta approfondita.

In considerazione di ciò, avendo a disposizione delle immagini satellitari di buona definizione, derivanti dal progetto BESS e avendo le competenze GIS necessarie, abbiamo utilizzato lo studio dell'analisi del suolo che comunque avremmo dovuto fare per verificare la potenzialità di questo impatto sull'erosione costiera, per approfondire la dinamica indotta sul tessuto urbano da un eventuale tsunami. Questa analisi è stata concentrata a un limitato tratto di litorale, ma è stato sviluppato il know how e la conseguente automatizzazione utili per esportarli in altri tratti di litorale e in altre aree del Mare Mediterraneo.

Per valutare il rischio costiero è stato eseguito mediante indagine satellitare l'analisi del land use/land cover. Questo è un parametro generalmente ignorato, conferendo a tutte le spiagge un identico, massimo valore.

Il rilievo dell'uso del suolo, capitalizzando le immagini satellitari di BESS, in Sicilia, è stato esteso a un buffer di 1.800 m dalla battigia, per una superficie di 49,39 kmq, mentre per le spiagge di Rambla e San Blas è stata effettuata una mappatura di 1,3 kmq.

Il rilievo topografico è stato eseguito mediante droni adeguatamente equipaggiati, che permettono un'elevatissima qualità su tutte le spiagge coinvolte dal progetto, sulle due falesie dell'Unità Fisiografica e sul tratto roccioso tra le due spiagge di Gozo.

Le superfici coperte da volo aerofotogrammetrico da drone, e restituite come ortofoto prima e Data Terrestrial Model (DTM) dopo, sono rispettivamente di 5,16 kmq in Sicilia e 2,42 kmq a Gozo.

Sulla base dei rilievi ottenuti, è stato realizzato un sistema di estrazione automatica dei parametri geomorfologici, seguendo le indicazioni di un classico della geomorfologia (Carobene, L. and Brambati, A. (1975) Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge. Bollettino Società Geologica Italiana, 94, 479-493), curando di riportare le misure su 45 transetti (43 in Sicilia e 3 a Gozo).

Per l'inquadramento sedimentologico, funzionale alla valutazione del rischio erosione, sono stati prelevati 121 campioni di spiaggia emersa e di spiaggia sommersa in Sicilia e 8 di sola spiaggia emersa a Gozo. I campioni sono stati prelevati lungo 49 transetti: 35 lungo la spiaggia presente tra Milazzo e Oliveri, 11 sullo spit di Marinello – Tindari e 3 a Gozo (Ramla).

Il rilievo batimetrico è stato modulato in funzione delle reali necessità di scala. Sono stati quindi eseguiti 45 profili batimetrici (43 in Sicilia e 2 a Gozo), lungo il prolungamento a mare dei transetti precedentemente individuati per descrivere i parametri geomorfologici della spiaggia emersa, utilizzando un ecoscandaglio single beam che ci ha permesso di raggiungere e rilevare fino alla battigia. Spesso si preferisce l'uso del multi beam che però non permette, se non in rari casi, l'accostamento a riva (il futuro sarà la batimetria da droni con lidar dedicati).

La superficie coperta dal rilievo single beam è di 14,7 kmq in Sicilia e di 0,38 kmq a Gozo.

I 46 transetti utilizzati per i profili topo – batimetrici e quelli usati per la caratterizzazione sedimentologica non coincidono perché sono stati eseguiti da operatori contrattualizzati con tempistiche differenti.

Il multi beam è stato utilizzato nelle due aree di approfondimento che si prestavano a questo uso. Per una superficie 0,58 kmq a Furnari – Porto Rosa e di 1,45 kmq dell'area di Tindari. A Gozo non sono stati eseguiti rilievi con multi beam in quanto la morfologia non lo consentiva. Il multi beam non è stato utilizzato a Ramla (Gozo).

Questi parametri permettono di *valutare le caratteristiche ambientali che possono influire sui rischi.*

## 1 RILIEVO TOPOGRAFICO – MORFOLOGICO DELLA SPIAGGIA

Per il progetto è stato eseguito il rilievo topografico, mediante drone, della spiaggia compresa tra Capo Milazzo – Capo Tindari e quello delle spiagge di Ramla e San Blas entrambe nel periodo autunnale (ottobre - novembre)

I rilievi sono stati realizzati con il Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) e con sistema di acquisizione della posizione mediante sistema satellitare Topcon Hyper HR Base Rover.

Dall'elaborazione delle foto scattate durante i voli mediante processing si sono ottenute le ortofoto e i DEM.

Per i rilievi sono stati effettuati voli da una quota di acquisizione di 65 metri, sono stati scattati fotogrammi, con una sovrapposizione pari al 80% sia sull'orizzontale sia sulla verticale.

Per la georeferenziazione dei fotogrammi sono stati definiti dei punti a terra, denominati Ground Control Point (GCP), e materializzati con target amovibili ad alta visibilità e contrasto, per rendere più semplice l'individuazione all'interno delle fotografie scattate in fase di elaborazione dei dati acquisiti. La loro posizione è stata definita mediante il sistema topografico satellitare, in fase di elaborazione dei rilievi aerofotogrammetrici saranno utilizzati per l'orientamento e la scalatura del modello.

### Strumentazione utilizzata

Per lo svolgimento delle attività è stata impiegata la seguente strumentazione:

- Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto;
- Stazione RTK per drone;
- Ricevitore satellitare geodetico GNSS.

[Sistema aeromobile a pilotaggio remoto SAPR](#)

Il rilievo aerofotogrammetrico è stato realizzato con un drone multi-rotore a quattro eliche DJI Mavic 3 Enterprise RTK con ottica dalle seguenti caratteristiche:



- CMOS da 4/3; pixel effettivi: 20 MP
- FOV: 84°
- Lunghezza focale equivalente: 24 mm
- Apertura: f/2.8 – f/11
- Messa a fuoco: da 1 m a  $\infty$



### Sistema GNSS per il rilievo dei punti a terra

L'acquisizione di coordinate di punti noti, da impiegare nel riferimento e nell'appoggio a terra, è necessaria affinché il modello finale elaborato sia correttamente orientato, scalato e georeferenziato.

Il rilievo topografico di appoggio è stato effettuato con strumentazione satellitare GNSS a doppia frequenza (L1+L2).

E' stato utilizzato un ricevitore rover in modalità nRTK (network Real Time Kinematic) con correzione in tempo reale della posizione sulla base delle informazioni provenienti dalla rete di stazioni fisse sul territorio nazionale (Rete SmartNet Leica Geosystems).

La connessione e la trasmissione di informazioni al fine del posizionamento è avvenuta in modalità GSM/GPRS. I ricevitori hanno sfruttato le costellazioni di satelliti GPS, GLONASS e BEIDOU.

Le coordinate dei punti battuti sono state acquisite nel sistema di riferimento ellissoidico ETRF2000 RDN2008 (EPSG 6708) e successivamente convertite nel sistema di riferimento cartografico di destinazione.

## **Rilievo aerofotogrammetrico**

L'APR è una piattaforma fotogrammetrica che opera in maniera autonoma, semi-autonoma o attraverso un controllo di tipo remoto. Il volo è governato da diverse tipologie di flight control system, gestite in remoto da piloti a terra. È possibile montare a bordo dei droni (capacità del payload) sensori differenti come camere digitali ad altissima definizione o sensori termici ed iperspettrali. Il vantaggio principale di questa strumentazione è insito sostanzialmente nel poter ottenere dati di estremo dettaglio (ortofoto e modelli digitale di elevazione con risoluzione geometriche dell'ordine dei cm/pixel) in tempi notevolmente ridotti rispetto alle tecniche di rilievo tradizionali.

I sistemi APR rappresentano la naturale evoluzione dell'aerofotogrammetria, con una risposta qualitativa superiore alla topografia classica. Le tecniche di rilievo sono le stesse adottate nel rilievo da aereo, anche se le superfici catturabili in una singola missione sono minori e le quote più basse.

La fotogrammetria consente l'acquisizione di informazioni metriche di oggetti a partire dall'elaborazione di immagini fotografiche, scattate da punti di vista differenti.

L'aerofotogrammetria impiega immagini scattate da mezzo aereo, nel caso specifico da drone. Le fotografie riprese dalle fotocamere impiegate sono immagini digitali, pertanto è più corretto riferirsi a tecniche di fotogrammetria digitale.

Si tratta di elaborazioni digitali condotte con algoritmi denominati Structure from Motion che, grazie alle potenze di calcolo disponibili nelle workstation "comuni" ed a tecnologia di computer vision, riescono a creare modelli tridimensionali a partire da immagini riprese da fotocamere non calibrate e prive del certificato di calibrazione metrica, quasi imprescindibile nella fotogrammetria classica.

Si fa tuttavia presente che le equazioni risolte nella fase computazionale (descritta in seguito) sono le medesime equazioni della fotogrammetria classica: le equazioni di collinearità, fornendo al metodo robustezza e validità nella qualità e nell'affidabilità degli output prodotti.

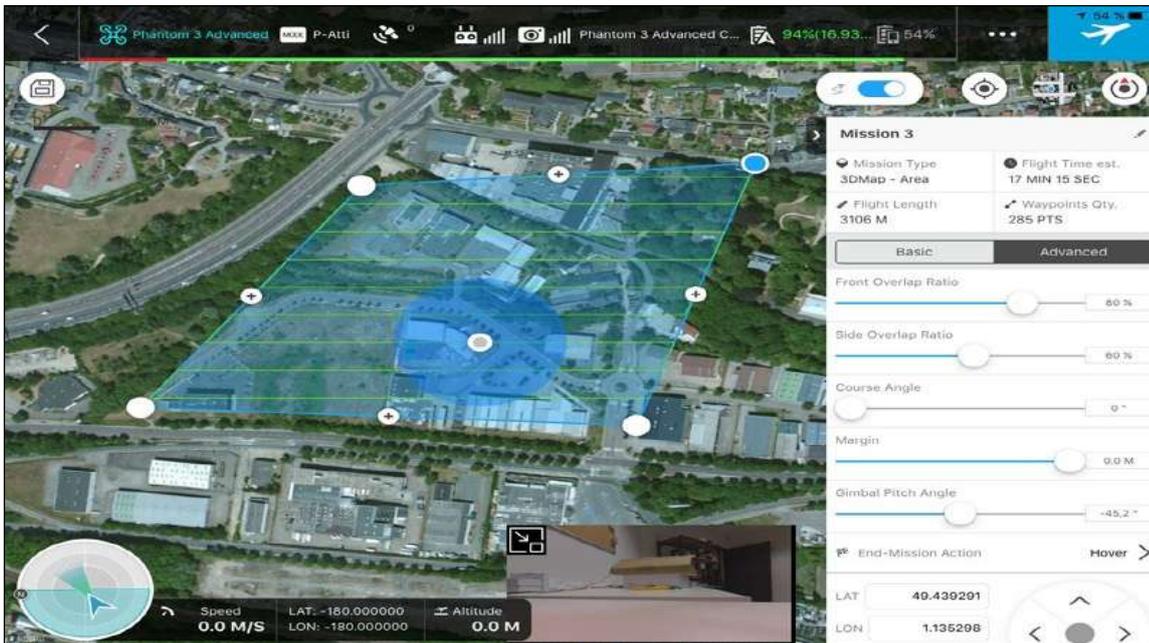
## **Programmazione delle operazioni**

Il sorvolo dell'APR all'interno dell'area del rilievo è stato condotto in modalità automatica, secondo missioni di volo programmato, precedentemente definite sulla base di modelli digitali disponibili (Google).

Per le necessità e gli scopi del presente studio si è ritenuto sufficiente programmare e condurre un'acquisizione di immagini fotografiche di tipo nadirale, ossia con camera orientata verso il basso ed asse ottico diretto verticalmente verso il terreno.

Al fine di effettuare una robusta acquisizione aerofotogrammetrica e in considerazione dell'importante estensione dell'area da sorvolare e da coprire con la presa fotogrammetrica, si è condotto il volo dell'APR in modo che:

- l'altezza di volo non fosse superiore a 120 m AGL (Above Ground Level);
- la velocità di crociera non fosse superiore a 12 km/h, sufficientemente ridotta per evitare sfocature nelle immagini dovute al possibile effetto mosso per velocità elevate;
- l'intervallo di scatto delle fotografie nadirali fosse pari a 5 secondi per avere una sovrapposizione tra fotogrammi adiacenti dell'80%.



Inoltre considerazione nel rispetto delle normative vigenti che impongono il contatto visivo tra pilota e APR in volo (modalità di volo VLOS - Visual Line of Sight) si è reso necessario suddividere la zona in molteplici sotto-porzioni a cui corrisponde una distinta missione di volo aerofotogrammetrico per ciascuna di esse.

## Rilievo

La programmazione delle missioni automatiche è stata fatta tramite il software di mission planning UGCS Pro e le informazioni sono state poi caricate a bordo del drone per l'esecuzione automatica in campo.

Al fine di mantenere il più possibile costante la distanza drone-terreno, la programmazione dei piani di volo ha tenuto in considerazione il modello digitale del terreno affinché l'altitudine di volo si adattasse ad eventuali variazioni di quota a terra.

Come detto precedentemente, l'elaborazione fotogrammetrica necessita di punti di controllo a terra di coordinate note per effettuare le operazioni di orientamento e scalatura del modello ricostruito.

La posizione dei punti deve essere rilevata a terra con strumenti topografici ad alta precisione e nel caso in esame è stato impiegato un ricevitore GPS.

Nonostante una stazione totale permetta ovunque precisioni sulle misure maggiori, si è scelto di rilevare con un'antenna GPS per i seguenti motivi:

- Velocità di utilizzo: le operazioni di messa in stazione di una stazione totale sono più lunghe e rigorose rispetto alla “messa in bolla” di un GPS, quasi immediata;
- Praticità di utilizzo: la stazione totale necessita di punti di coordinate note per conoscere la propria posizione assoluta e trasformare conseguentemente le coordinate dei punti battuti che, inoltre, devono essere visibili dal cannocchiale dello strumento, rendendo necessario un elevato numero di stazioni di misura;
- Un ricevitore GPS in modalità RTK necessita esclusivamente di avere una buona copertura satellitare visibile nella porzione di volta celeste al di sopra dello stesso;
- Accessibilità dei luoghi: la stazione totale, con il treppiede per lo stazionamento, è uno strumento più pesante rispetto ad un ricevitore satellitare montato su palina in carbonio;
- Personale all'opera: la stazione totale necessita di un operatore allo strumento ed un secondo operatore, il canneggiatore, incaricato di posizionare il prisma riflettente montato su palina sul punto da battere. Il rilievo con GPS RTK necessita di un solo operatore che stazione direttamente sul punto.

## Trasformazione delle coordinate

Le coordinate rilevate dal ricevitore satellitare a terra sono riferite all'ellissoide GRS80.

Il sistema è identificato dal codice EPSG 6706 (i codici EPSG fanno riferimento alla banca dati European Petroleum Survey Group - Geodetic Parameter Dataset - e sono considerati standard a livello globale) ed è legato alla rete di stazioni permanenti a cui ci si è appoggiati durante il rilievo di campo con modalità nRTK.

Sono pertanto così forniti valori di latitudine, longitudine e quota in tal senso.

Latitudine e longitudine individuano la posizione di un punto sulla superficie dell'ellissoide mentre la quota rilevata rappresenta la distanza del punto battuto dalla superficie dell'ellissoide. Considerare tale valore come quota reale comporterebbe un errore grossolano. Infatti la quota nota come tale è quella ortometrica (o geoidica), ossia la distanza

del punto battuto dalla superficie del geoide. Nel territorio italiano il geoide e l'ellissoide hanno uno scostamento relativo variabile tra 40 e 50 m.

Al fine di georeferenziare il risultato del rilievo all'interno di sistemi di riferimento cartografici concordati (Roma40 - Gauss Boaga - EPSG 3003) e determinare precisamente ed univocamente la quota ortometrica dei punti della nuvola di punti e, conseguentemente, delle celle del DTM, si sono condotte opportune trasformazioni delle coordinate mediante l'impiego del software Verto3K (IGM), unitamente alla griglia di trasformazione emanata dall'IGM - 295.gk2 - valida per un intero foglio della cartografia nazionale IGM della serie 50L (1:50.000), che fornisce puntualmente i valori di scostamento tra geoide ed ellissoide, noto come ondulazione del geoide (N), oltre che i parametri di conversione da applicare agli algoritmi di trasformazione delle coordinate.

## **Elaborazione, orientamento e restituzione dei risultati**

Terminate le operazioni di campo i dati acquisiti sono stati elaborati per restituire i relativi risultati topografici sotto forma di modelli digitali di elevazione - DEM, DSM, DTM.

Per il rilievo topografico della spiaggia mobile tra i due promontori Capo Milazzo Capo Tindari sono stati effettuati 79 voli e 18504 fotografie, per una superficie di 5,16 kmq.

Per il rilievo topografico delle spiagge di Ramla e San Blas è stato effettuato 1 volo e 1410 fotografie, per una superficie di 2,42 kmq. La falesia è stata interessata da un volo planare di 3,45 km lineari, da cui vanno tolti i 400 m della spiaggia di Ramla, mentre San Blas non ha spiaggia.

Per il rilievo topografico della Falesia di Capo Tindari sono stati effettuati 6 voli ortogonali alla parete con 3257 fotografie, per una superficie di 0,46 kmq.

Per il rilievo topografico della Falesia di Capo Milazzo sono stati effettuati 9 voli ortogonali alla parete con 2330 fotografie,

Per tutti e quattro i rilievi sono stati prodotti l'Ortofoto, il DSM e la nuvola di punti.

Al termine dell'elaborazione è stata prodotta una ortofoto georeferita ed un DSM (Digital Surface Model), si tratta di un tipo di rappresentazione digitale di un'area geografica

che rappresenta la superficie della Terra e tutti gli oggetti sopra di essa, come edifici, alberi, montagne, ecc. In sostanza, è una rappresentazione tridimensionale della superficie terrestre e degli oggetti presenti su di essa.

Tutte le immagini sono riportate nell'**Allegato A DTM e ortofoto**.

## Analisi del rilievo morfologico della spiaggia emersa

Come detto la nuvola di punti è stata utilizzata per descrivere la spiaggia in modo automatico seguendo le indicazioni di un classico della geomorfologia (Carobene, L. and Brambati, A. (1975) Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge. Bollettino Società Geologica Italiana, 94, 479-493), curando di riportare le misure su 46 transetti (43 in Sicilia e 3 a Gozo).

Per l'elaborazione delle informazioni di input e output, il lavoro ha richiesto un'intensa elaborazione di dati spaziali. Le varie fasi operative sono state sviluppate sfruttando la tecnologia GIS attraverso l'utilizzo di strumenti di *geoprocessing* che hanno permesso l'elaborazione automatica o semi automatica dei compiti da svolgere, elaborando i dati spaziali, combinandoli in sistemi più ampi (ESRI, 2000). Il lavoro è stato svolto attraverso il software ArcGIS Pro nella versione 3.2.2 prodotto da ESRI, uno dei maggiori produttori di sistemi software GIS e applicazioni per la gestione di basi di dati geolocalizzate.

Ai fini dell'organizzazione del lavoro di analisi della dinamica costiera, il Golfo di Patti è stato suddiviso nei suoi territori comunali costieri sfruttando i dati Istat delle Basi Territoriali (BT) per i censimenti e i confini amministrativi aggiornati al 1° Gennaio 2023 [Istat, 2023]. Il formato dati utilizzato dei confini amministrativi comunali è stato di tipo ESRI shapefile nel sistema di riferimento WGS84 e codificati in UTF-8. L'intero flusso di lavoro è stato eseguito nel sistema di riferimento EPSG:32633 - WGS 84 / UTM zone 33N basato sul metodo Universal Transverse Mercator (UTM).

Per definire caratteri morfometrici e morfodinamici delle spiagge ricadenti nel Golfo di Patti e la distribuzione spaziale di tali caratteri lungo l'area oggetto di studio sono stati elaborati mediante tool di geoprocessing un numero di 43 transetti avanti spaziatura di 500 metri. Il limite verso terra è stato fissato individuando il limite rigido o il piede duna per ogni transetto, in quanto tali caratteri vincolano il sistema spiaggia emersa. Verso mare invece è stato prolungato il transetto fino all'isobata -1 estrapolata dal DSM di riferimento. Per ogni transetto sono stati individuati i seguenti parametri:

- Quota punto di fine spiaggia
- Quota berma ordinaria
- Contrassegno punto di battigia
- Contrassegno Isobata -1

- Lunghezza fine spiaggia – battigia
- Pendenza fine spiaggia – battigia
- Lunghezza fine spiaggia – berma
- Pendenza fine spiaggia – berma
- Lunghezza berma – battigia
- Pendenza berma – battigia
- Lunghezza battigia – isobata -1
- Pendenza battigia – isobata -1
- Lunghezza fine spiaggia – isobata -1
- Pendenza fine spiaggia – isobata -1

I dati ottenuti sono stati utilizzati per ricostruire un nuovo schema per lo studio della morfologia della spiaggia emersa ed intertidale. Ad oggi il più conosciuto è quello elaborato da Carobene & Brambati, 1975. Nel presente lavoro è stato sviluppato un nuovo schema che possa essere adattato per le spiagge del bacino Mediterraneo, con particolare riferimento all'area del Tirreno. Dai transetti inoltre sono stati ricavati i rispettivi profili di elevazione sia in scala naturale che in una scala verticale esagerata 2x. Quest'ultimo passaggio è stato necessario al fine di rendere più visibile le forme delle spiagge. I dati complessivi sui transetti sono stati tutti restituiti in formato ESRI shapefile, leggibili quindi in qualsiasi sistema GIS ed elaborati come MultiLineString e i parametri morfometrici sono stati tabellati suddividendoli per ogni transetto.

I risultati dell'analisi sono riportati nell'**Allegato B – Transetti e analisi morfologica**.

## 2 RILIEVO BATIMETRICO

Il rilievo batimetrico ha interessato l'Unità Fisiografica Capo Milazzo Capo Tindari.

Il rilievo dell'intera area è stato effettuato usando un multi beam associato a un sistema di posizionamento satellitare GPS in RTK, eseguendo 43 transetti dalla battigia fino all'isobata di -25 m (superficie di poco inferiore a 15 kmq).

In due specifiche aree, intorno allo Spit di Marinello Tindari e a Ovest del porto di Porto Rosa, selezionate la prima perché naturale e la seconda perché interessata dalla più importante opera antropica del golfo, sono stati realizzati dei rilievi batimetrici utilizzando il multi beam (superficie di poco superiore a 2 kmq).

### Strumentazione

I rilievi sono stati eseguiti con una imbarcazione di lunghezza 10 m, sulla quale sono state installate un trasduttore del Multibeam e una coppia di antenne GPS, un software di navigazione. Per il rilievo con il single beam è stato utilizzato il barchino di supporto, con strumentazione allocata per ogni transetto.

### Mezzo nautico

L'imbarcazione utilizzata è il cabinato doppio entroborde denominato "Valerio", avente una lunghezza di 10 m e pescaggio ridotto (1m circa) adatto quindi per operazioni portuali e sotto costa. L'unità possiede inoltre ampi spazi per la strumentazione ed una gru per la movimentazione ed il varo di attrezzature pesanti. Essa è iscritta al registro delle navi minori e galleggianti della Capitaneria di Porto di Messina con destinazione d'uso "Servizi speciali oceanografici".



Foto della Motobarca “Valerio”

Sull'imbarcazione sono state installate le varie strumentazioni. In particolare, il trasduttore del Multibeam è stato montato a palo sulla murata sinistra, la coppia di antenne GPS (con funzione di posizionamento) sono state installate direttamente sul palo. Mentre il sensore di moto è integrato all'interno del Norbit IWBMS.

### Software di navigazione

Per la navigazione e l'acquisizione dati batimetrici è stato usato il software TELEDYNE-RESON® PDS2000. Il programma consente di effettuare la navigazione con guida in linea e segnalazione del fuori rotta, permette di disegnare linee di navigazione, rotte, poligoni oltre che utilizzare cartografia di sfondo. Consente la trasformazione di coordinate in tempo reale, il calcolo di tutti i parametri di navigazione e prevede una serie di visualizzazioni grafiche complesse di tutti i parametri di acquisizione e il controllo di qualità in tempo reale.

### **Sistema di posizionamento e Datum geodetico**

Il posizionamento dell'imbarcazione è stato eseguito mediante un sistema di navigazione inerziale (INS) dotato doppio ricevitore GNSS e sensore di moto inerziale (IMU) per la misura simultanea di: Posizione, Assetto e Angolo di rotta con tecnica IARTK – Inertial

Aided Real Time Kinematic. Le correzioni differenziali RTK sono state ottenute dalla rete di Stazioni Permanenti ITALPOS (certificata dall'ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE) operata da LEICA GEOSYSTEM, il cui collegamento col ricevitore di bordo è stato attuato tramite Internet e protocollo NTRIP.

Tale sistema ha una accuratezza finale effettiva subdecimetrica in modalità cinematica (RTK) sia in planimetria che in quota, mentre in modalità DGPS l'accuratezza è dell'ordine di 50cm.

Le due antenne GPS sono state installate sul tetto dell'imbarcazione in senso parallelo rispetto all'allineamento poppa-prua su apposita barra fissa con interasse predeterminato di 2m, mentre il sensore di moto (IMU) è integrato all'interno del sistema NORBIT, in prossimità del centro di gravità della barca. Il sistema viene configurato con apposito software iWBMS GUI che si occupa anche di registrare i dati grezzi dell'intero rilievo, mentre l'uscita dati (su interfaccia LAN) è stata interfacciata con il software di navigazione PDS 2000.

Tutti i dati sono stati georiferiti quindi nel sistema di coordinate WGS84 Datum ETRF89 con proiezione cartografica UTM (Universal Transverse Mercator) fuso 33.

La sincronia (Time stamping) del flusso dati dai vari sensori è stata eseguita attraverso l'uso del segnale di tempo 1PPS generato dal sistema di posizionamento GPS, che viene inviato al computer di acquisizione dati (tramite interfaccia seriale RS323) dove è in esecuzione il software di navigazione PDS 2000 che si associa ad ogni dato in entrata la corretta marca temporale (time stamping).

## **Rilievo batimetrico Sigle Beam**

La procedura eseguita per il rilievo Single beam è piuttosto semplice, ma di assoluta efficacia dal momento che l'oggetto del nostro interesse è la dinamica costiera.

Il rilievo è stato eseguito mediante un mezzo navale di piccole dimensioni, dotato di un ecoscandaglio single beam.

Si è effettuata la navigazione con la bussola, acquisendo la profondità e la posizione ogni 10 secondi, fino alla profondità di 25 m.

Mediante questo sistema, in un ambito regolare quale quello del golfo di Patti è stato possibile realizzare una batimetria speditiva che confrontata con i sistemi che si trovano in rete, ha mostrato un eccellente grado di precisione.

Di seguito sono riportate le tavole con i transetti e le isobate ricavate dal rilievo. Le tavole coincidono con i diversi territori comunali interessati.

## Procedura di elaborazione dati

L'elaborazione dei dati è stata eseguita con il modulo di processing del software PDS2000. La procedura prevede una serie di step che sono esemplificati nel diagramma che segue. In particolare, dopo una serie di controlli sulla qualità dei dati (es. navigazione), si è passati alla verifica della calibrazione degli offset e quindi alla pulizia dei dati che è avvenuta esclusivamente in modalità manuale, cioè con l'eliminazione (dot killing) dei beams ritenuti spuri. Quindi è stata effettuata la correzione di marea, successivamente è stato generato il modello digitale del terreno da cui sono stati estratte le curve di livello e le immagini 3D.

Il seguente diagramma esemplifica il processo di elaborazione dati:

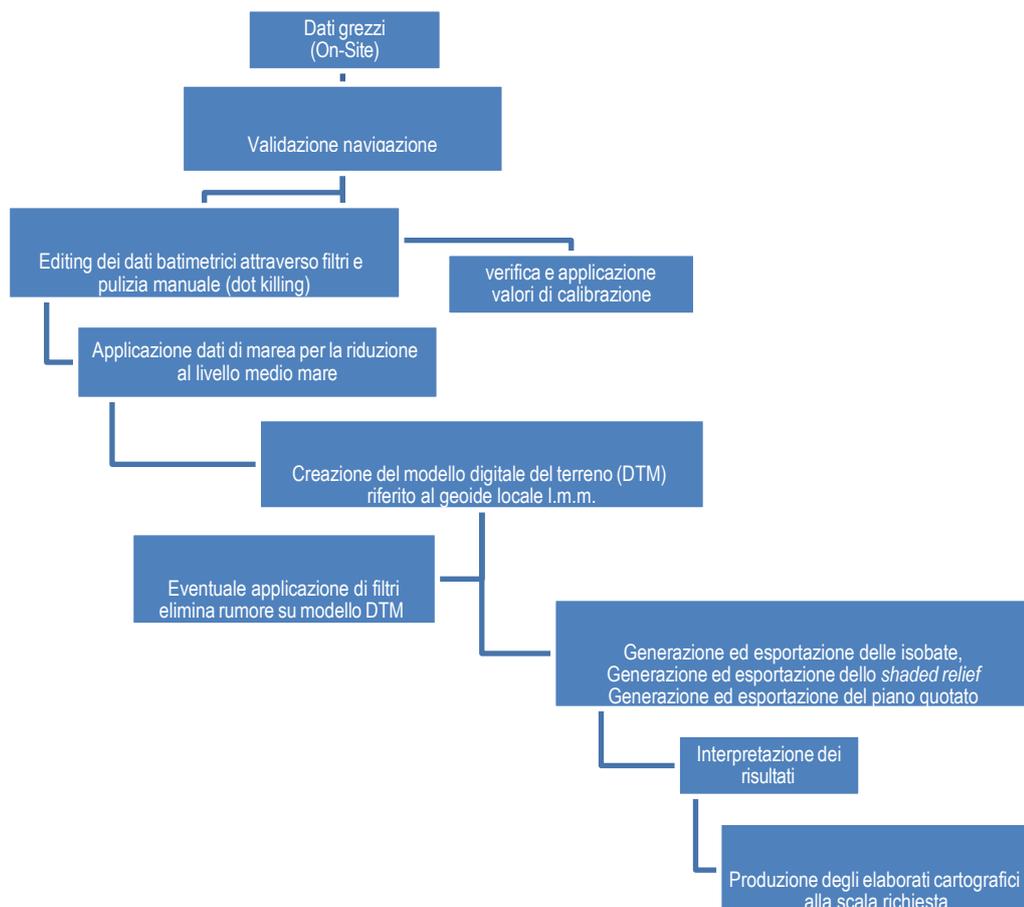


Figura con diagramma di flusso relativo a procedura di elaborazione dati

## Trattamento e pulizia dati

La fase di pulizia dei dati è quella che richiede maggiore attenzione poiché è in questa fase che occorre individuare anche le più piccole evidenze nei dati che in fase di generazione del modello digitale possono non essere più visibili.

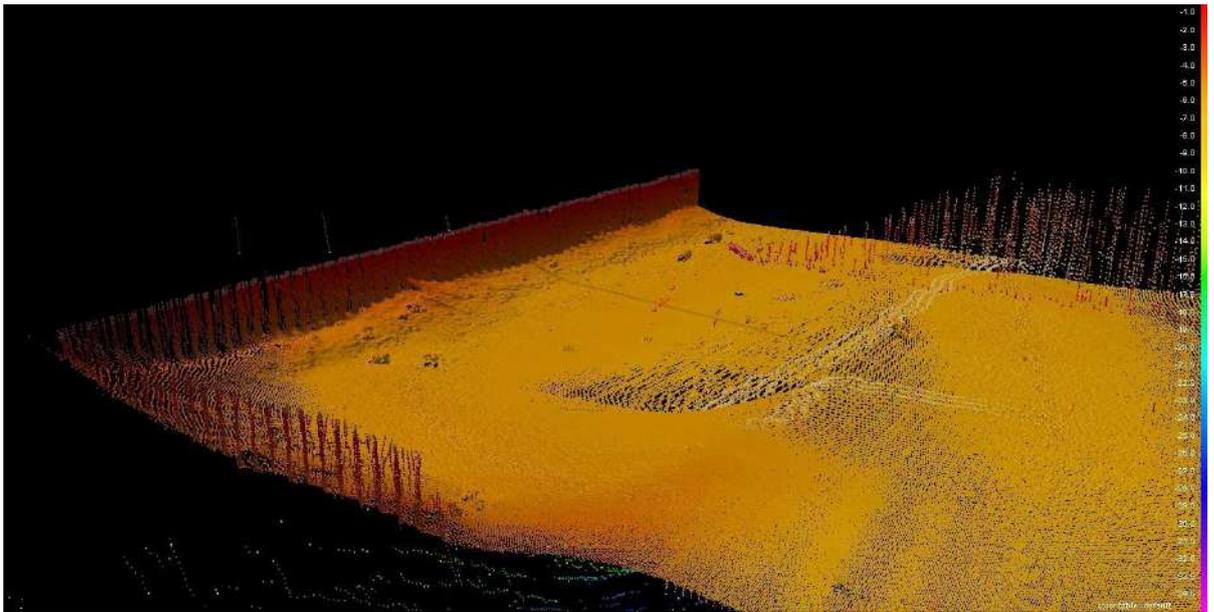


Figura relativa, a esempio, di fase di pulizia dei dati batimetrici: dati grezzi.

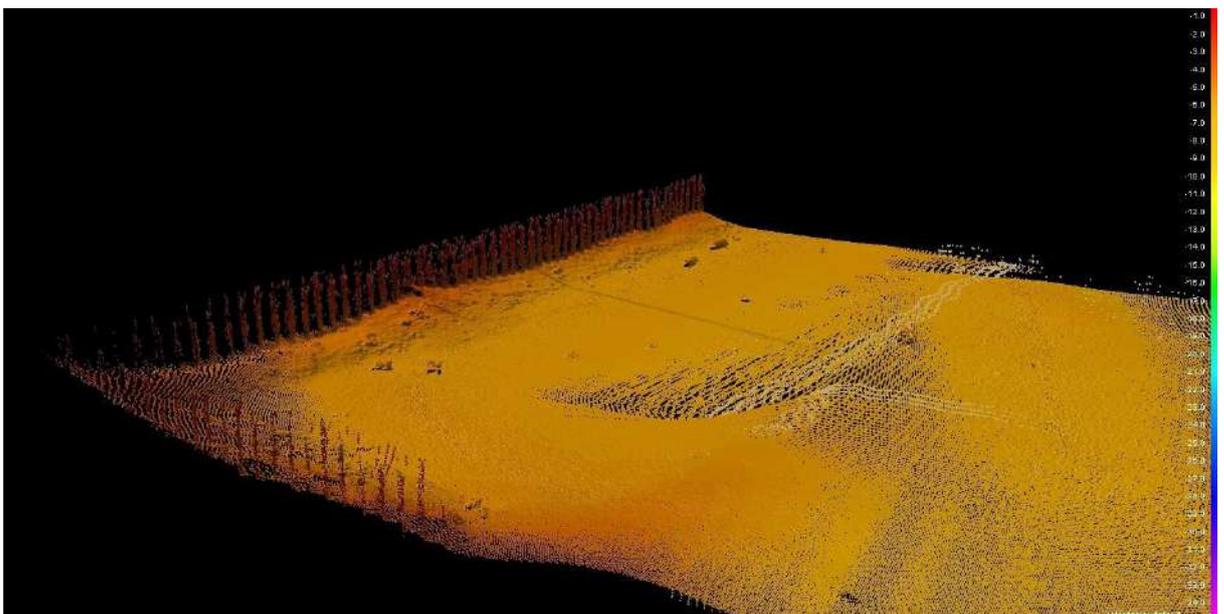


Figura relativa a esempio di fase di pulizia dei dati batimetrici: dati ripuliti dagli spikes.

## Calibrazione

La calibrazione serve a determinare con la massima accuratezza possibile gli offset angolari di installazione. Essa viene effettuata attraverso il confronto di alcune linee di navigazione, che rispondono ad un determinato schema di acquisizione, al fine di calcolare i valori di Heading, Pitch e Roll 'statici' che meglio di tutti fanno corrispondere i dati acquisiti dalle varie linee di navigazione.

## Riduzione di marea

Per la riduzione delle misure di profondità al livello medio mare è stata applicata la correzione di marea con i dati registrati dalla stazione mareografica più vicina, situata nel porto di Messina ed appartenente alla Rete Mareografica Nazionale.

## Modello Digitale del Terreno

A conclusione della fase di elaborazione sono stati generati i modelli DTM con una cella di  $0,5\text{m}^2$  che ulteriormente elaborati hanno permesso di generare le relative isobate e piani quotati, sono stati inoltre generati file xyz in formato \*.csv.

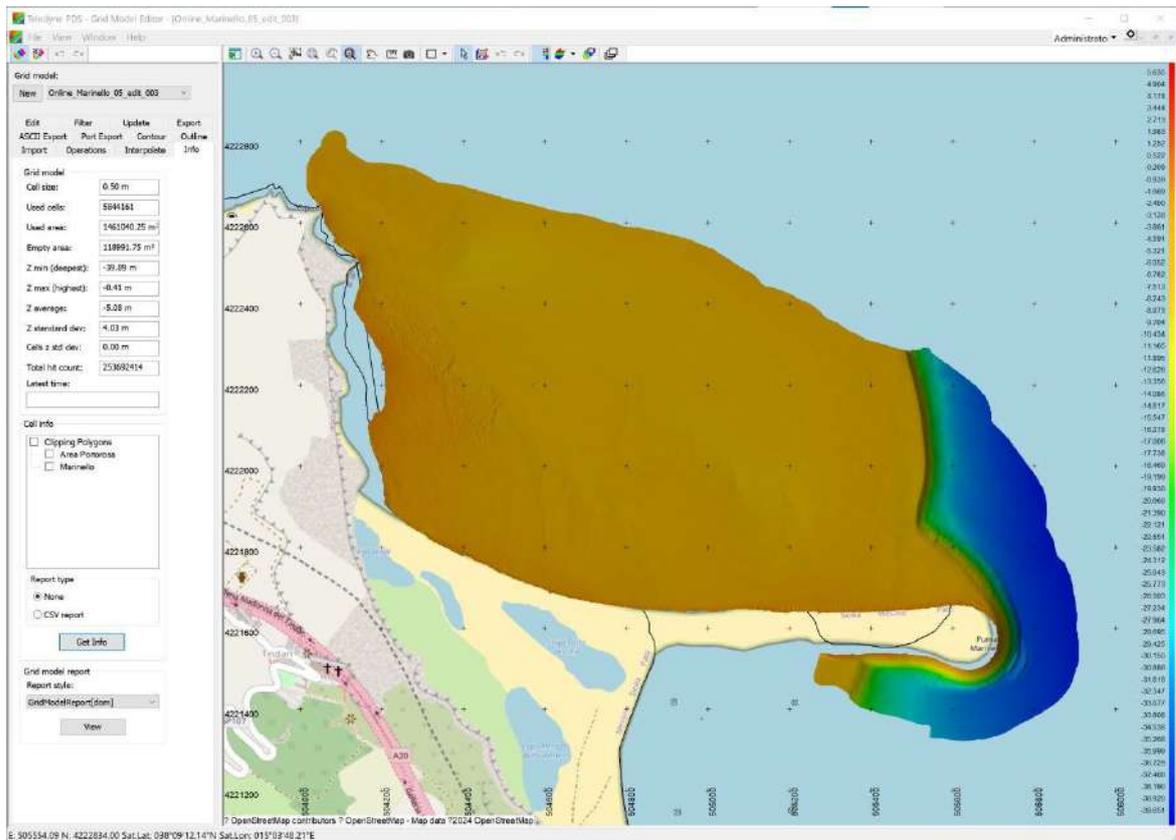


Figura con esempio di carta batimetrica in scala di colori relativi al modello digitale del terreno (DTM) ottenuta nel

## Risultati e discussione

Il rilievo morfo-batimetrico ha fornito una visione dettagliata delle condizioni del fondale.

Sulla base del rilievo single beam è stato estrapolato il dato dell'isobata di -1, utilizzata nell'indagine morfologica ed è stata realizzata la base per l'analisi della Posidonia O.

Con l'analisi multi beam è stato evidenziato un enorme accumulo di sedimenti nella zona subito a nord dello Spit di Marinello, mentre è possibile individuare a est dello Spit una morfologia che sembrerebbe essere riconducibile a una piccola frana sottomarina, dovuta sicuramente alle elevate pendenze presenti in quella zona, con relativo accumulo ai piedi della scarpata.

Tutti i risultati dell'indagine sono riportati nell'**Allegato C batimetria**.

## 3 SEDIMENTI

### Campionamento

Il progetto prevedeva il prelievo e l'analisi di 90 campioni di sedimento delle spiagge emersa e della spiaggia sommersa, sia nell'Unità Fisiografica Capo Milazzo – Capo Tindari sia nelle spiagge di Ramla e San Blas (Gozo). Il campionamento è stato differenziato sia per specifiche aree naturali (Riserva Naturale Orientata RNO Laghetti di Marinello e Comune di Oliveri) e antropizzate (comuni di Falcone e Furnari, fino al porto di Porto Rosa), a terra e a mare con campionamento concentrato; sia in zone costiere libere con campioni prelevati sulla spiaggia emersa e in transetti più distanziati.

Per quanto riguarda le spiagge emersa e sommersa, lungo il tratto Capo Milazzo Capo Tindari fino a Oliveri, sono stati effettuati 26 transetti e per ogni transetto sono stati prelevati campioni in due zone, corrispondenti alla spiaggia e alla battigia, per complessivi 52 campioni.

Inoltre, lungo la spiaggia emersa della Riserva Naturale Orientata RNO Laghetti di Marinello sono stati campionati 27 campioni prelevati lungo 9 transetti. Nello specifico sono stati prelevati 12 campioni di battigia, 9 campioni di spiaggia, 6 campioni di duna.

Per quanto riguarda la spiaggia sommersa della zona di Ngonia (Milazzo) sono stati prelevati 3 campioni lungo un transetto alle profondità compresa tra -3 e -12 m.

Nella spiaggia sommersa della zona di Spinesante (Barcellona Pozzo di Gotto) sono stati prelevati 3 campioni lungo un transetto alle profondità compresa tra -3 e -12 m..

Nella spiaggia sommersa dell'area di Portorosa sono stati prelevati 18 campioni lungo 3 transetti. Nello specifico 6 campioni per transetto, alle profondità comprese tra -3, e -18 m.

Nella spiaggia sommersa della zona foce dell'Elicona sono stati campionati 3 campioni lungo un transetto alle profondità compresa tra -3 e -12 m.

Nella spiaggia sommersa della RNO Laghetti di Marinello sono stati campionati 16 campioni, a nord e a sud dello SPIT alle profondità comprese tra -3 e -12 m.

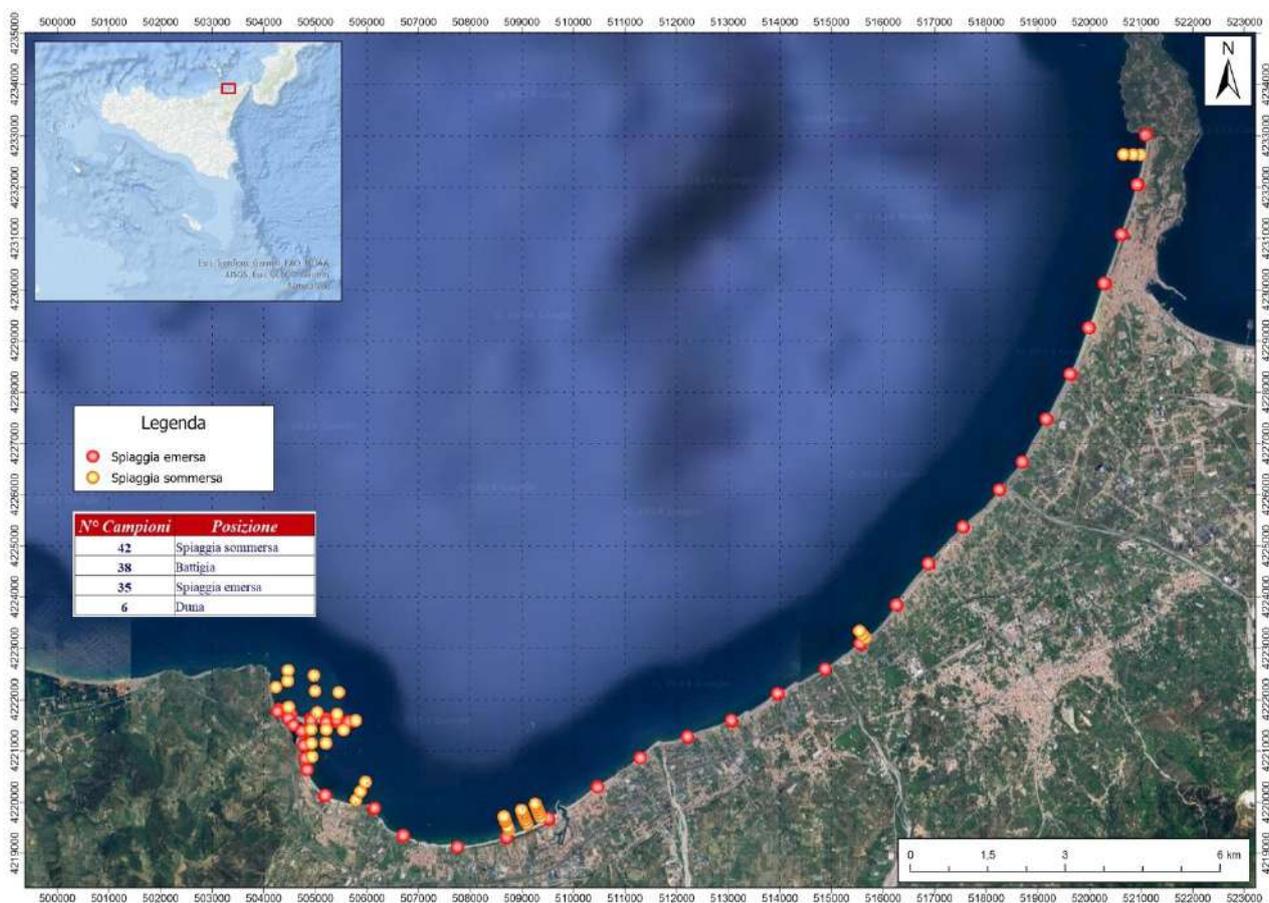


Figura 1 Ubicazione campioni Capo Milazzo Capo Tindari

A Malta, nella spiaggia emersa di Rambla sono stati campionati 8 campioni lungo 3 transetti. Nello specifico sono stati prelevati 3 campioni di battigia, 4 campioni di spiaggia emersa e un campione di duna. La spiaggia di San Blas non è campionabile in quanto caratterizzata da massi.

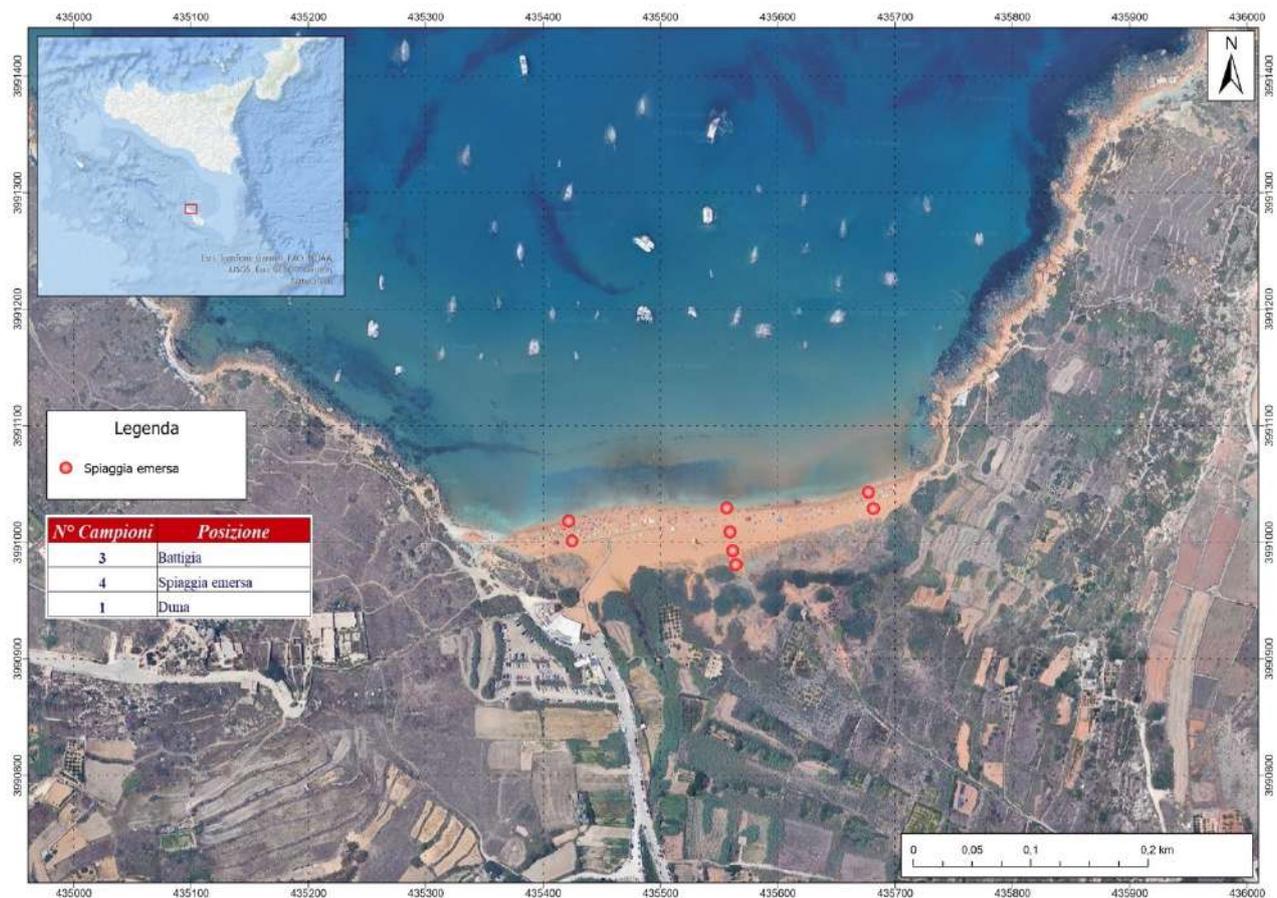


Figura 2 Ubicazione campioni Rambla Gozo Malta

Complessivamente sono stati quindi campionati 130 campioni di spiaggia emersa e sommersa (87 campioni spiaggia emersa e 43 spiaggia sommersa).

### Metodologia di laboratorio Analisi sedimentologiche

Il campione giunto in busta chiusa in laboratorio, è stato identificato mediante il numero sopra scritto con il pennarello e la sigla è stata riportata sulla scheda di analisi che lo accompagnerà nel corso delle analisi.

Per quanto riguarda il campione di sedimento è stato pesato nella capsula, di cui si conosce la tara, e messo in stufa a 90° e ivi lasciato fino al suo completo asciugamento. Il campione ancora nella capsula viene lasciato raffreddare e pesato e successivamente quartato per prelevare un campione statisticamente rappresentativo

Il campione a questo punto è stato nuovamente lavato, cioè privato della possibile presenza di cloruri e quindi rimesso in stufa a 120°C.

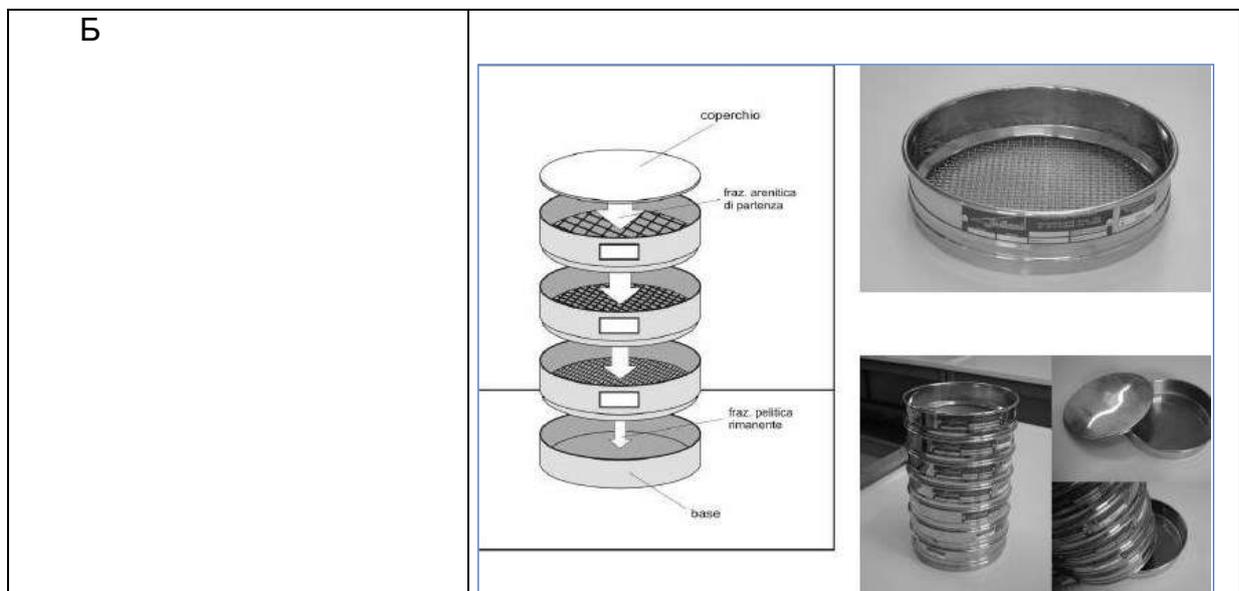
Il campione asciugato è stato setacciato in umido (lavaggio) con una rete di nylon da 62,5 micron (4 f - phi - ossia 1/16 mm), in modo da separare la frazione ciottoloso sabbiosa (trattenuta) da quella pelitica/passante limosa argillosa che viene raccolta in un imbuto foderato da un coppo di carta filtro e poggiato su un treppiedi.

La frazione più grossolana è stata nuovamente posta in una capsula e messa in stufa a 120°C.

L'analisi della frazione grossolana è stata eseguita col metodo diretto, cioè per setacciamento su una pila (o batteria) di setacci in cui l'apertura della maglia (lato del quadrato formato da una maglia) diminuisce in ragione di 1/2 phi. Vengono usati setacci della serie ASTM del diametro di 200 mm ed altezza utile del bossolo di 50 mm.

La tecnica seguita per il setacciamento è la seguente:

- si introduce nella batteria di setacci il campione, ottenuto dalla quartazione, pesato al centesimo di grammo (il peso dipende dalle dimensioni delle particelle); si fa attenzione che non vi siano aggregati, riducendo il sedimento nelle sue singole particelle con le dita;
- la batteria di setacci viene posta per 20 minuti in una setacciatrice in modo da ottenere una completa vagliatura del materiale;



Setacci e scuotitore

- i movimenti orizzontali di essa sono preferibili ai verticali sia perché si è trovato sperimentalmente che sono più efficienti sia perché in tal modo una minore quantità

di particelle si perde dalla batteria durante la setacciatura. I risultati del setacciamento sono influenzati dalla forma e dal numero delle particelle. La durata necessaria per un efficace setacciamento aumenta con l'aumentare del numero delle particelle; e poiché un dato peso di sedimento a grana fine contiene più particelle di un uguale peso di sedimento grossolano, una durata maggiore di setacciamento è richiesta per i sedimenti a grana fine;

- si pesa al centesimo di grammo il materiale trattenuto da ogni setaccio; la somma dei trattenuti dovrà corrispondere al peso iniziale di tutto il campione;
- ottenuti così i pesi corretti corrispondenti alle diverse classi granulometriche si ricavano le percentuali rispetto al peso totale corretto; le percentuali così ottenute vengono sommate l'una all'altra per avere le percentuali cumulative.

Nella fase successiva, le frazioni trattenute in ogni setaccio sono state pesate; da queste, utilizzando un foglio di calcolo elettronico precedentemente programmato, sono state ricavate le percentuali corrette del trattenuto più quelle cumulative, le frazioni granulometriche secondo la scala WENTWORTH (1922) ed i diversi parametri statistici con una rapida visualizzazione del risultato delle analisi mediante istogrammi di frequenza a barre.

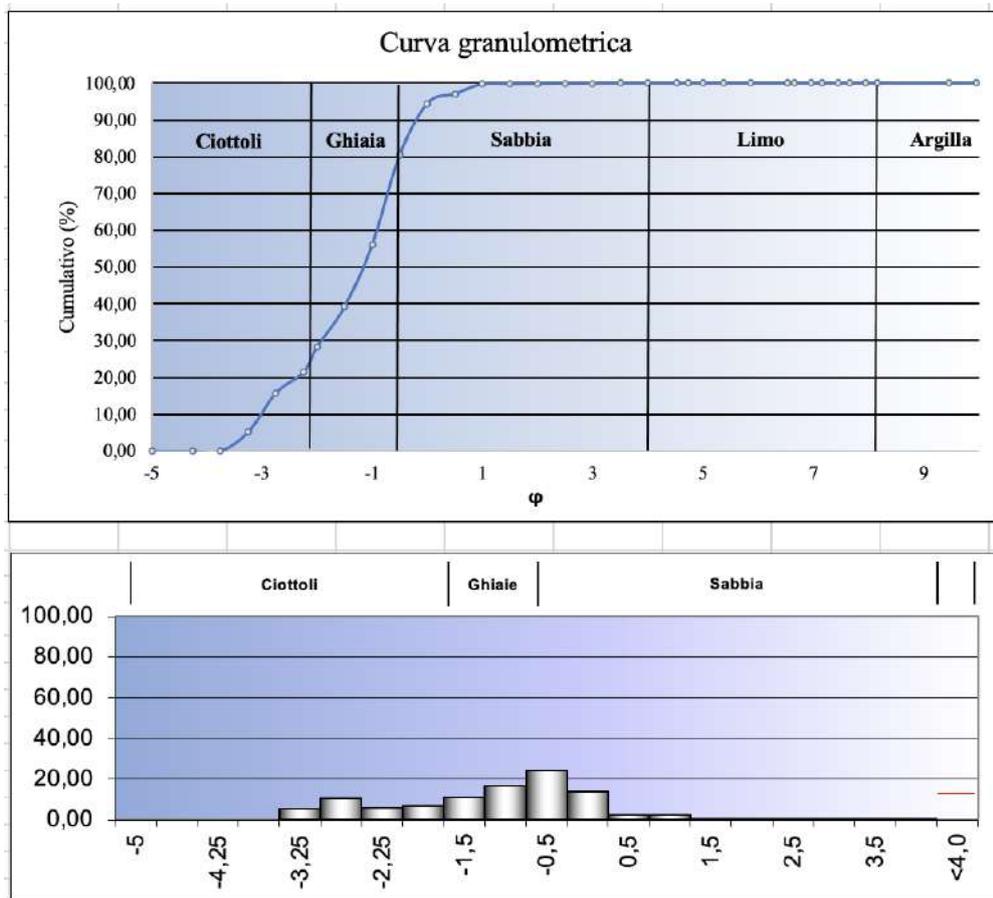
Gli indici statistici normalmente usati per l'esame tessiturale sono quelli calcolati secondo il metodo grafico di FOLK & WARD (1957) e tra questi quelli che danno una immediata possibilità di interpretazione correlata, su un'area di limitate dimensioni, sono il diametro medio, la classazione e la simmetria che, associati alle frazioni granulometriche di WENTWORTH (1922), rappresenteranno i dati di base per le successive elaborazioni ed interpretazioni.

Per semplificare la lettura e il trattamento statistico dei diagrammi granulometrici, KRUMBEIN nel 1934 propose l'uso della scala  $\emptyset$  (phi) che è la trasposizione in logaritmi della scala UDDEN - WENTWORTH. La nomenclatura utilizzata per la definizione delle diverse classi granulometriche è quella di SHEPARD (1954).

La scala  $\emptyset$  ha dei vantaggi: ha valori interi per tutti i limiti di classe; essendo lineare non richiede diagrammi particolari; nei diagrammi rende più rapida e precisa la determinazione dei parametri statistici.

Inoltre, per certi tipi di sedimenti le classi di questa scala possono risultare troppo ampie e quindi vengono dimezzate portando a radice di due la ragione della progressione geometrica.

Dalle pesate ottenute, utilizzando un foglio di calcolo elettronico precedentemente programmato, sono state ricavate le percentuali corrette del trattenuto più quelle cumulative, le frazioni granulometriche secondo la scala WENTWORTH (1922) ed i diversi parametri statistici con una rapida visualizzazione del risultato delle analisi mediante istogrammi di frequenza a barre.



Curve granulometriche: logaritmica e a barre

I dati sono stati caricati nel database GIS insieme alle coordinate GPS e ai parametri statistici derivati dalle analisi di laboratorio.

## Risultati e discussione

### Capo Milazzo Capo Tindari

## Spiaggia emersa

Nell'Unità Fisiografica l'ambiente di spiaggia è caratterizzato da sedimenti che rientrano nelle classi granulometriche comprese tra i ciottoli fini e le sabbie medie, da molto ben

classati a poco classati. I sedimenti di spiaggia presentano prevalentemente valori del diametro medio che indicano la classe granulometrica delle sabbie molto grossolane,

La distribuzione areale della classazione presenta un netto dominio dei sedimenti moderatamente classati, mentre i valori di asimmetria variano da distribuzioni granulometriche simmetriche ad asimmetriche caratterizzate prevalentemente da code dei grossi (asimmetria negativa).

L'ambiente di battigia è caratterizzato da sedimenti leggermente più grossolani che variano dai ciottoli medio fini a sabbia grossolana, da pochissimo classati a molto ben classati. I sedimenti di battigia presentano prevalentemente valori del diametro medio che indicano la classe granulometrica delle sabbie molto grossolane e delle ghiaie.

La distribuzione areale della classazione presenta un netto dominio dei sedimenti poco classati, mentre i valori di asimmetria variano da distribuzioni granulometriche simmetriche ad asimmetriche caratterizzate da code dei grossi (asimmetria negativa).

## Spiaggia sommersa

L'ambiente di spiaggia sommersa è caratterizzato da sedimenti che variano dai ciottoli fini a sabbia fine, da pochissimo classati a molto ben classati, con un dominio dei sedimenti moderatamente classati.

I valori di asimmetria variano da distribuzioni granulometriche simmetriche ad asimmetriche caratterizzate da code dei grossi (asimmetria negativa) e asimmetrie caratterizzate da code dei fini (asimmetria positiva).

## **Spiaggia di Ramla**

Per quanto riguarda la spiaggia di Ramla l'ambiente di battigia, l'ambiente di spiaggia e l'ambiente di duna sono caratterizzati prevalentemente da sabbie medie da ben classate.

I valori di asimmetria nei diversi ambienti variano: i sedimenti di battigia variano da distribuzioni granulometriche simmetriche ad asimmetriche caratterizzate da code dei grossi (asimmetria negativa); i sedimenti di spiaggia e di duna presentano distribuzioni granulometriche prevalentemente simmetriche.

Tabelle, ubicazione e parametri statistici dei singoli campioni sono riportate nell'**Allegato D sedimenti e parametri**.

## 4 USO DEL SUOLO

L'Elaborazione dell'uso del suolo è avvenuta su scala comunale. A partire dalla fotointerpretazione dell'ortofoto di riferimento, le fasi di lavoro sono state eseguite utilizzando un approccio semi automatico basato sulla *Supervised Classification* o classificazione supervisionata. Tale procedimento consiste nell'assegnazione di un valore a un insieme di celle della griglia in un database *raster* GIS basato sui valori di celle simili che sono stati precedentemente classificati come rappresentativi di una classe o gruppo (Abburu e Golla, 2015). Questo processo è chiamato classificazione supervisionata perché richiede a un operatore di interpretare manualmente un'immagine satellitare o aerea e definire gruppi di celle della griglia, chiamati set di addestramento, che condividono valori di riflettanza spettrale simili. Questo processo viene usato comunemente, per ottenere delle classi che siano rappresentative dei tipi di copertura del suolo e che rientrano in un'area di interesse. L'output è stato poi rivisto e corretto manualmente ove necessario. Infine, la legenda proposta è stata realizzata partendo dalla classificazione di terzo livello usata dal sistema europeo di mappatura dell'uso e copertura del suolo "*CORINE Land Cover*".

La classificazione dell'uso del suolo è stata effettuata quindi, utilizzando la legenda di Corine Land Cover (2018), con un buffer di 1,8 km per l'Unità Fisiografica Capo Milazzo Capo Tindari e 500 m per le spiagge di Ramla e San Blas.

Per l'Unità Fisiografica Capo Milazzo Capo Tindari è stata effettuata una mappatura per una superficie complessiva di 54,5 kmq, mentre per le spiagge di Ramla e San Blas è stata effettuata una mappatura di 1,3 kmq.

Nello specifico, nell'Unità Fisiografica Capo Milazzo Capo Tindari sono stati classificati: 0,6 kmq di Corpi idrici, 28,2 kmq di Superfici agricole utilizzate, 13,3 kmq di Territori boscati e ambienti seminaturali e 12,4 kmq di Territori modellati artificialmente.

Nella zona di Ramla e San Blas sono stati classificati: 0,35 kmq di Superfici agricole utilizzate, 0,99 kmq di Territori boscati e ambienti seminaturali e 0,05 kmq Territori modellati artificialmente.

I risultati sono riportati nell'**Allegato E uso del suolo**.

## 5 ANALISI SISMICA IN OTTICA TSUNAMI (Unità Fisiografica di Capo Milazzo e Capo Tindari) Contributo Dott. Franco Italiano

L'area del golfo di Patti è insenatura naturale compresa tra capo Milazzo (a est) e capo Calavà (a ovest), nella costa nord-orientale della Sicilia. I 50 km della sua linea di costa comprendono 8 comuni (Fig. 1). Lungo la linea di costa sono sviluppate le principali infrastrutture dei trasporti della Sicilia Settentrionale che includono la linea ferroviaria e l'autostrada Messina-Palermo e la SS113 Messina-Trapani. Sono presenti importanti aree industriali come la Raffineria di Milazzo, l'Impianto di coproduzione di idrogeno, la Centrale termoelettrica di Pace del Mela) e l'Area industriale di Giammoro che include tra le altre le acciaierie Duferco). Lungo la costa sono presenti numerosi cantieri nautici per la produzione di imbarcazioni sia da diporto che da lavoro.

Il Golfo ha una batimetria caratterizzata da un fondale che allontanandosi dall'area marino costiera degrada rapidamente verso profondità molto elevate (Fig. 4) fino alle prospicenti isole Eolie. Capo Calavà in particolare è la zona più vicina alle Isole Eolie, a solo 12 miglia dall'Isola di Vulcano. Da notare che all'interno del Golfo non esistano infrastrutture portuali di rilievo.



Figura 1 - Il golfo di Patti con gli epicentri dei terremoti della sequenza sismica del Giugno 2021 e le Municipalità ricadenti nell'area

Come parzialmente riportato sulla carta nautica di fig. 4, nei fondali del golfo sono stati deposti numerosi cavi sia per telecomunicazione che per trasporto di energia collegando sia il Golfo con le isole Eolie che diverse municipalità che si affacciano sulla costa, tra loro

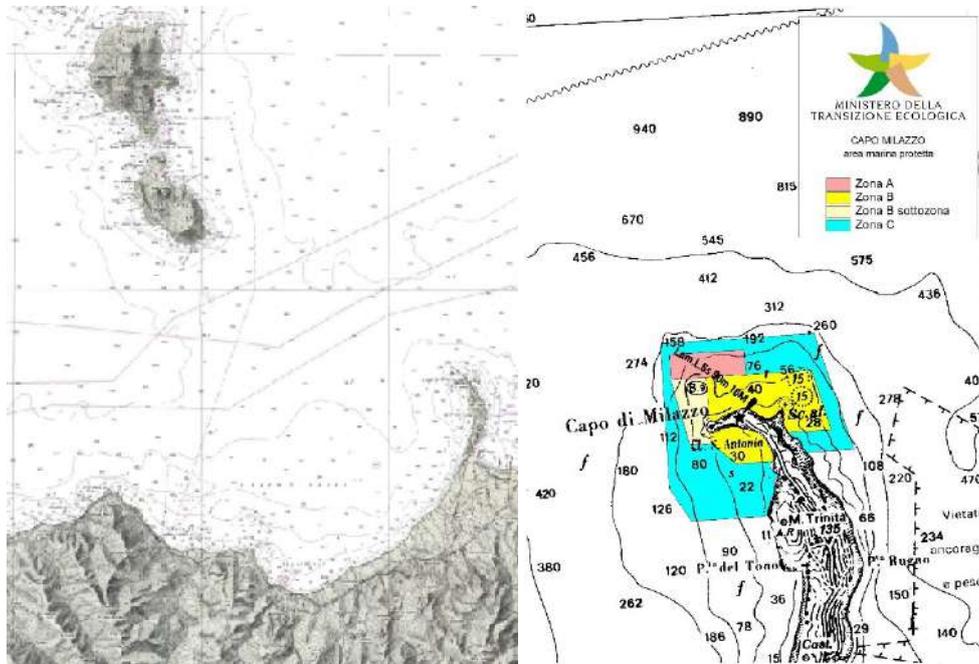


Fig. 2 - Batimetria del Golfo di Patti. A sinistra stralcio della carta batimetrica che mostra come i fondali di fronte al Golfo raggiungano la profondità fino a 2500 metri. A sinistra particolare della batimetria dell'area marina protetta di Capo Milazzo con la batimetria dei 100 metri prossima alla linea di costa che rapidamente degrada fino a 100 metri ai metri.

Tutta l'area è ben nota per la sua sismicità legata al particolare assetto tettonico della porzione nord-orientale della Sicilia e del Basso Tirreno. Il Golfo, caratterizzato dalla presenza di strutture di faglia attive e, a Nord, dal vulcanismo attivo delle isole Eolie, risulta essere un'area esposti a numerosi rischi naturali che includono il rischio sismico, rischio vulcanico e il rischio tsunami.



Figura 3 – Vista da capo Tindari dell'area lagunare di Marinello

All'interno del Golfo di Patti l'area lagunare di Marinello, rappresenta uno dei siti che hanno maggiormente risposto alle sollecitazioni dei sistemi sia naturali che antropici. L'area (fig. 3) è stata sottoposta ad imponenti variazioni morfologiche che ne hanno modificato la linea di spiaggia, creando laghetti litoranei salmastri semipermanenti e temporanei, rappresenta un vistoso sistema di frecce litorali, unico luogo nella costa tirrenica siciliana, la cui origine risale a circa 150 anni fa, come riportato da una cartografia dell'Istituto Geografico Militare datata 1865. L'area è oggi una Riserva Naturale Orientata, nata 1998 che si estende su una superficie di circa 378 ettari, la cui peculiarità è quella di contenere in una così ristretta porzione di territorio una notevole quantità di ambienti. Si passa infatti dalle sabbie marine costiere agli ambienti lacustri salmastri, ai ripidi pendii ed alle rupi a strapiombo sul mare. I laghetti salmastri costituiscono insieme ai laghi di Ganzirri gli ultimi esempi di ambiente salmastro costiero tuttora presenti nella Sicilia nord-orientale. Anche la fascia costiera ha un aspetto affascinante e selvaggio, con un succedersi di insenature, piccole spiagge sabbiose e pareti a precipizio. In queste rocce, che sprofondano nel mare, si apre una suggestiva cavità naturale: la Grotta di Donna Villa, all'interno della quale si trovano imponenti formazioni di stalattiti e stalagmiti, nonché i solchi di battente marino e depositi con faune di vertebrati fossili del Pleistocene, di grande interesse paleontologico. Tali strutture sono tracce evidenti dell'attività tettonica recente che caratterizza l'intero golfo di Patti

Dal punto di vista geologico l'area ricade nel sistema dell'Arco Calabro-Peloritano generato dalla convergenza N-S Africa-Eurasia durante il Neogene-Quaternario ad una velocità di 1–2 cm/anno durante gli ultimi 5–6Ma. Nonostante ciò, un rapido movimento da E a SE ha influenzato l'Arco Calabro-Peloritano ad una velocità di 5-6 cm/anno, con un sollevamento tra 0,5 e 1,2 mm/anno, principalmente negli ultimi 1–0,7 milioni accomodato da faglie normali. L'angolo NE della

catena mostra un sollevamento con il tasso più alto in prossimità dello Stretto di Messina (lungo la costa ionica) e tassi di sollevamento inferiori lungo la costa tirrenica.

L'attuale quadro strutturale della Sicilia settentrionale è il risultato dell'attivazione di una rete complessa di fratture con andamento W-E che si estende dal Rift di Pantelleria alle Isole Eolie. Alcune di queste strutture sono ancora attive e responsabili della sismicità superficiale che si verifica sia nell'entroterra siciliano che nell'offshore settentrionale nel Tirreno. I dati sismologici e geodetici ne delineano due principali domini crostali segnati da diversi regimi di stress: uno compressivo nell'offshore siciliano settentrionale e un dominio estensionale nella Sicilia nord-orientale e Calabria meridionale. La transizione tra i due domini avviene lungo la faglia Eolie-Tindari-Letojanni (ETLF, fig. 4) che è stata interpretata come una Faglia litosferica che delimita il bordo occidentale della subduzione della placca ionica. Inquadrate nell'attuale geodinamica del Mediterraneo centrale, il sistema di faglie Eolie-Tindari-Letojanni è parte di una più ampia zona di faglia transtensiva laterale destra orientata NW-SE responsabile dei movimenti divergenti tra settori situati al margine meridionale dell'Arco Calabro.

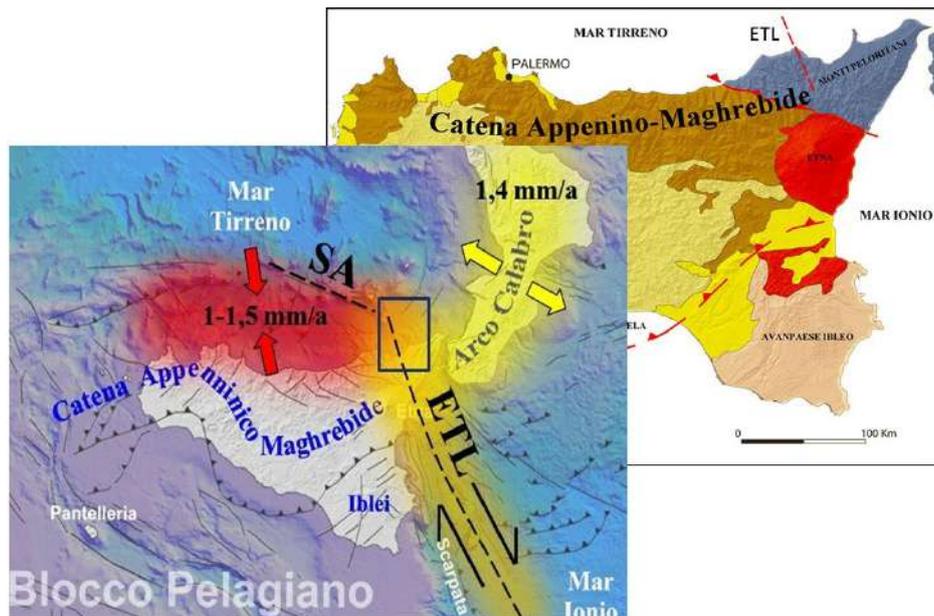


Figura 4 – Inquadramento (semplificato) geo-tettonico dell'area del golfo di Patti all'interno dello Schema neotettonico della Sicilia orientale. ETL = Faglia Eolie Tindari Letojanni

La deformazione attiva dell'area del Golfo di Patti è attualmente dovuta a segmenti di faglia a scaglioni transtensionali destri con andamento NW-SE, la cui sovrapposizione dà origine a varie strutture di rilascio. Questo assetto strutturale ha favorito la risalita del magma e dei fluidi e il modellamento del complesso vulcanico Lipari-Vulcano. In particolare, i più grandi terremoti storici (1786, Mw=6.2; 1978, Mw=6.1) sono localizzati lungo i principali segmenti di faglia.

La parte sommersa del golfo (fig. 8) mostra la prosecuzione a mare delle strutture tettoniche attive che ne hanno determinato la morfologia dei fondali.

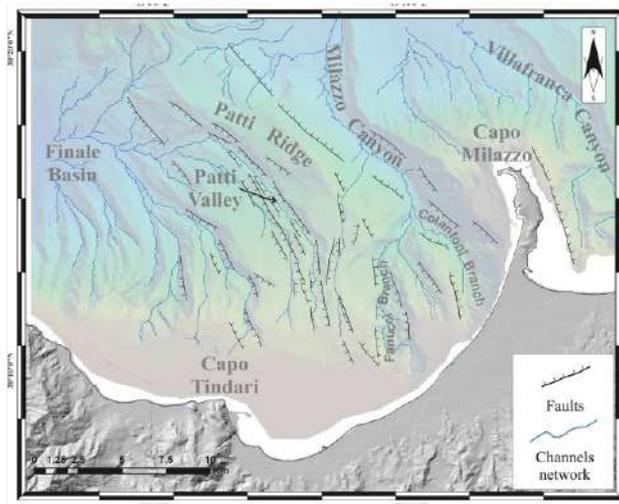


Figura 5 - Carta strutturale del Golfo di Patti ottenuta selezionando segmenti di faglia sull'intero dataset sismico. Le faglie sono costituite principalmente da strutture estensionali (o transtensive) disposte lungo le direttrici NW-SE e N-S

### Velocità GPS, tettonica e sismicità in Italia: il golfo di Patti nel quadro generale

Gli spostamenti del territorio dovuti ai movimenti delle faglie vengono misurati tramite le stazioni GPS. In Italia esiste una estesa rete di stazioni fisse in continuo che acquisiscono un dato ogni 30 secondi. Tutte le stazioni hanno si spostano lentamente e in diverse direzioni con una velocità data dallo spostamento della superficie terrestre, ma viene misurata anche una differenza nella velocità fra le diverse stazioni, la velocità residuale, che è la differenza fra la velocità di una stazione e quella media presa come riferimento.

Se prendiamo lo scenario di riferimento dell'Europa Stabile (la parte continentale a nord del sistema Alpi - Carpazi e dei Pirenei), la velocità residuale è la differenza fra la velocità della stazione che si sta esaminando e quella della parte stabile del continente europeo. Le stazioni dell'area mediterranea mostrano delle velocità residuali rispetto all'Europa Stabile diverse a seconda della zona in cui si trovano, evidenziando la presenza di deformazioni in atto.

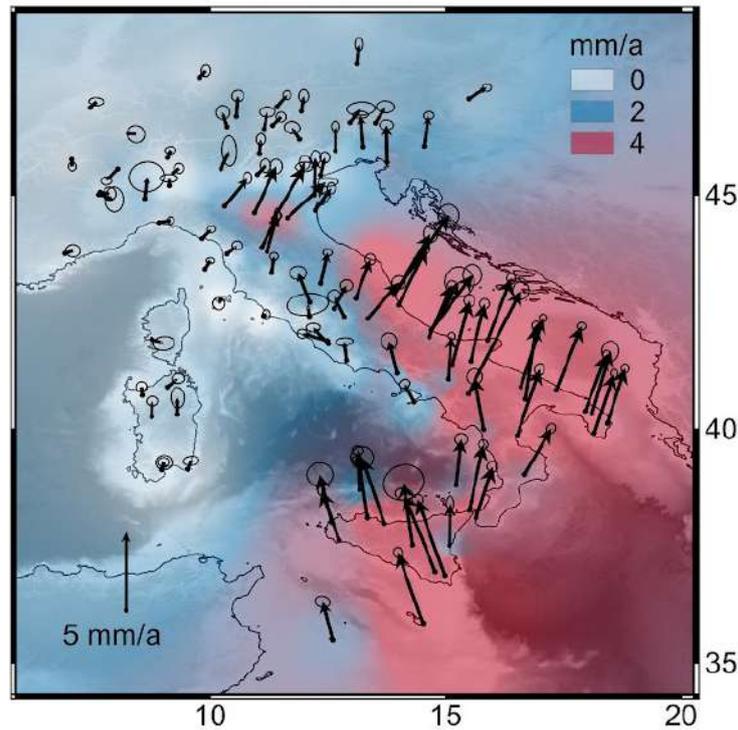


Figura 6 - Velocità GPS con riferimento allo scenario Mediterraneo. Le frecce indicano direzione e verso del movimento in questo scenario di riferimento e la scala di colori indica la velocità in mm/anno

La figura 6 riassume il quadro delle velocità residuali per la penisola italiana rispetto a quella dell'Europa Stabile. È facile notare come la catena appenninica costituisca un confine fra una zona lungo il Tirreno piuttosto stabile nei confronti dell'Europa e un settore orientale che invece presenta una decisa componente verso NE di 3–5 mm/a. Le differenze di velocità aumentano progressivamente andando verso sud fino alla Calabria, Ma dove le velocità sono più forti è in Sicilia che si muove verso NNW a circa 5 mm/anno rispetto all'Europa Stabile, ad eccezione della zona più nordorientale che invece si muove verso NE a circa 3.5 mm/anno come il settore tirrenico calabrese. La separazione è lungo la Faglia Eolie Tindari Letojanni, che dalla cittadina jonica arriva al Golfo di Patti e rappresenta il limite fra Arco Calabro - Peloritano e la Catena Siculo - Maghrebide. Pertanto la maggior parte della Sicilia e l'insieme Calabria - Sicilia di NE si allontanano fra loro ad oltre 2 millimetri/anno in direzione EW. I movimenti avvengono lungo le linee di faglia e sono responsabili della sismicità dell'area

E' rilevante quindi come tra le velocità residuali e la sismicità dell'Italia meridionale ci sia un sostanziale accordo. In figura 7 a sinistra sono mostrati:

- i terremoti di tipo distensivo lungo la costa tirrenica (in nero)
- i terremoti di tipo compressivo nella piattaforma continentale settentrionale sicula (in blu)

- i terremoti di tipo trascorrente nella Sicilia centrale e un po' più a sud (in rosso)

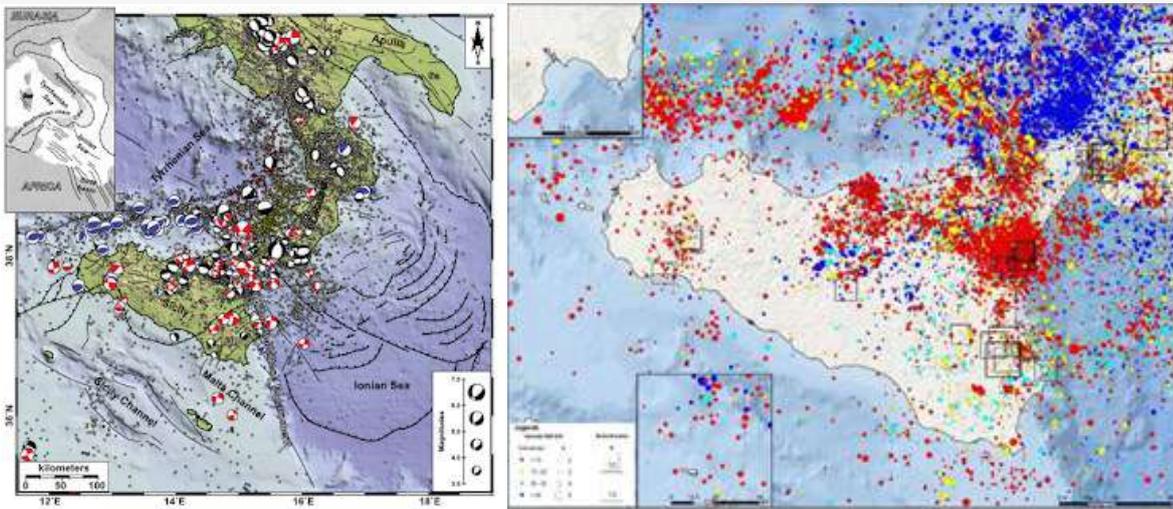


Figura 7 – A sinistra i meccanismi focali dei terremoti dell'Italia meridionale e del basso Tirreno. A destra la sismicità strumentale dal 1985 al 2018, rappresentata per classi di profondità (colore) e magnitudo (dimensioni cerchi). I quadrati mostrano gli epicentri dei principali eventi storici.

Nella parte a destra è mostrata la distribuzione della sismicità strumentale del Basso Tirreno fino al canale di Sicilia. In figura 8 gli eventi sismici recenti sono divisi in classi di profondità. Il golfo di Patti è sede di eventi localizzati a bassa profondità (entro 20km).

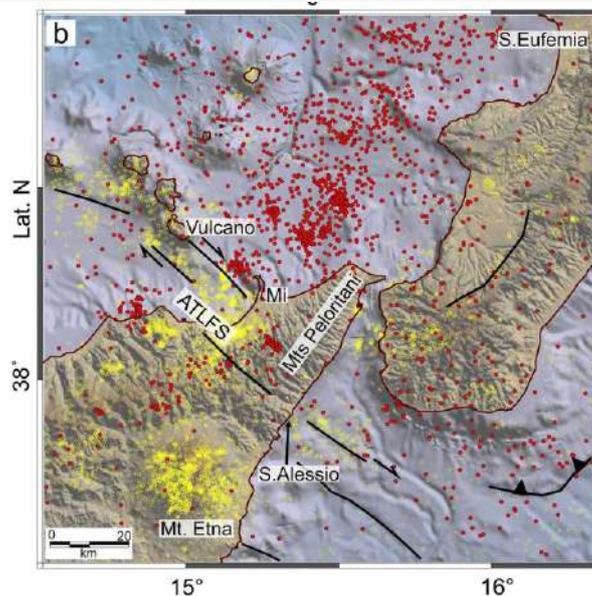


Figura 8 – Distribuzione degli eventi sismici recenti divisi in due classi di profondità: in giallo epicentri superficiali, in rosso eventi con ipocentro profondo

**La sismicità recente del Golfo di Patti**

In figura 9 sono riportati gli epicentri della sequenza sismica del Giugno 2021 che rappresenta solo uno degli innumerevoli episodi di sismicità anche intensa registrata nel Golfo.

La crisi sismica più nota e distruttiva è quella del 16 aprile 1978, quando nella notte tra sabato 16 e domenica 17 aprile 1978 ben 50 scosse terrorizzano due terzi della Sicilia. L'epicentro è nel Golfo di Patti a non molta distanza dall'arcipelago delle Eolie.

Nei comuni della fascia tirrenica della Sicilia, cioè lungo la costa settentrionale, si segnalano centinaia di senzatetto e migliaia di abitazioni lesionate più o meno gravemente.

I danni maggiori li subisce Patti, dove rimangono ferite nove persone ed il cinquanta per cento degli edifici crollarono o presentavano profonde crepe. La sede del Municipio era inagibile.

Cinque le vittime indirette del terrore. Due, un donna ed un uomo a Palermo, la donna colpita da infarto, l'uomo investito da un'automobile in corsa mentre cercava di raggiungere una piazza. Due morti (un uomo ed una donna) anche a Messina, deceduti in ospedale dove erano stati ricoverati perchè colti da collasso.

La prima scossa del quinto grado della scala Mercalli era durata dieci secondi, e i sismografi dell'Istituto di geofisica all'Università di Messina l'avevano registrata alle 00,29 tra sabato e domenica. La più forte era seguita alle 00,33; ed aveva avuto una magnitudo 5,1 Richter causando danni relativi a un'intensità tra il settimo e l'ottavo grado della scala Mercalli.

Le scosse principali tutte ubicate nel Golfo di Patti, fanno parte di una sequenza sismica di circa 50 scosse che interessarono la provincia di Messina e l'arcipelago delle Isole Eolie. In particolar modo il sisma principale con una magnitudo tra il 5° ed il 6° grado della scala Richter fu avvertito in buona parte dell'Italia meridionale, più significativamente fin verso la Calabria, dal palermitano alla Sicilia orientale.

I centri più danneggiati, oltre a Patti, furono Piraino, Castell'Umberto, Naso, Sinagra, Librizzi, Castoreale.

Il comune di Patti risultò tra i più colpiti, poiché più vicino all'epicentro, dove il 50% degli edifici crollò o presentò profonde crepe. Tra questi il Municipio che risultò inagibile. Danni anche lungo buona parte del versante tirrenico dove diversi edifici si lesionarono più o meno gravemente.

A Castoreale si registrarono ingenti danni che determinarono la demolizione parziale della chiesa di San Vito, rilevanti crepe nella chiesa del Santissimo Salvatore, la chiusura prolungata per interventi di restauro di molti luoghi di culto.

A Barcellona Pozzo di Gotto danni nella chiesa di San Giovanni Battista e chiesa del Carmine.



Figura 9 – Epicentri delle sequenze sismiche del TERREMOTI M. 4,1 E M. 4,2 IN SICILIA IL 16 AGOSTO 2006, a sinistra e del 6 Novembre 2016, a destra

I dati sismologici, geologici e geodetici mostrano come la faglia Eolie-Tindari-Letojanni è molto attiva con più di 1500 terremoti di magnitudo massima 4.5, verificatisi nella sua porzione settentrionale negli ultimi 30 anni.

### L'esposizione agli tsunami del Golfo di Patti

Il termine giapponese “tsunami” significa “onde sul porto” e si riferisce a un fenomeno che colpisce le zone costiere, causando inondazioni e gravi danni. Questo evento, conosciuto anche come “maremoto” in italiano, rappresenta una minaccia catastrofica per le comunità costiere. Secondo le Nazioni Unite, durante gli ultimi 100 anni, i 58 tsunami più distruttivi hanno causato la morte di 260.000 persone, il più letale dei quali è stato quello che ha colpito l'Oceano Indiano il 26 dicembre 2004. Uno tsunami è costituito da un insieme di onde spesso causate da un terremoto che provoca un'oscillazione del fondo del mare e della colonna d'acqua al di sopra. Gli tsunami possono essere causati non solo dai terremoti, ma anche da altri fenomeni come le frane e l'attività vulcanica.

In mare aperto, le onde si propagano rapidamente, ma quando si avvicinano alla costa, la ridotta profondità del fondale le costringe a rallentare, aumentando l'altezza delle onde che possono raggiungere decine di metri rispetto al livello del mare. Gli tsunami possono causare gravi danni poiché il loro movimento non è solo superficiale come le onde del vento. Durante un'onda di maremoto, il mare si ritira inizialmente (cosiddetto “cavo”) ma successivamente arriva la cresta dell'onda, che può essere molto alta e può verificarsi anche 20 minuti dopo.

Tutte le coste del Mediterraneo sono a rischio maremoto a causa dell'elevata sismicità e della presenza di numerosi vulcani attivi, emersi e sommersi. Negli ultimi mille anni, lungo le coste italiane, sono state documentate varie decine di maremoti, solo alcuni dei quali distruttivi. Le aree costiere

più colpite sono state quelle della Sicilia orientale, della Calabria, della Puglia e dell'arcipelago delle Eolie.

La sismicità del Golfo di Patti raramente si è manifestata con eventi a elevata magnitudo, in grado di provocare spostamenti improvvisi del fondale marino con la conseguente produzione di onde di tsunami. Il Golfo tuttavia è aperto a possibili tsunami provenienti da zone limitrofe (isole Eolie, Golfo di Milazzo, Stretto di Messina etc) ben note per aver prodotto onde di maremoto anche distruttive.

Un'onda di tsunami, infatti, può viaggiare a grandi velocità e propagarsi anche per migliaia di chilometri e ciò rende il Golfo di Patti sensibile anche a questo rischio.

A partire dal 1600 a.C. ad oggi, infatti, nel mar Mediterraneo si sono verificati almeno 290 maremoti, alcuni dei quali distruttivi. Le coste greche e italiane sono le più esposte al fenomeno e, nel corso della storia, hanno subito i maggiori effetti di tsunami avvenuti nel mar Mediterraneo. La pericolosità di un evento catastrofico come il verificarsi di un maremoto nel bacino del Mediterraneo può essere ben compresa ricordando che intorno al 1600 a.C., con l'esplosione del vulcano Santorini, nel Mar Egeo, il collasso della caldera causò uno tsunami devastante, con onde alte circa 50 metri, che si propagò in gran parte del Mediterraneo orientale, investendo anche la Turchia, la Siria, l'Egitto e la Palestina che furono devastati dalle onde. Secondo alcune teorie proprio questo tsunami fu la causa dell'improvvisa fine della civiltà Minoica a Creta.

Oltre al noto maremoto di Messina del 1908, nel 1956, a seguito di un forte terremoto (magnitudo 7.5) a largo dell'isola di Amorgos (Mar Egeo) si generò uno tsunami con onde che raggiunsero 25 metri ad Amorgos e 20 ad Astipalea, causando forti impatti in tutte le isole dell'Egeo centro-meridionale. Lo tsunami del 1956 raggiunse anche Creta, con onde di circa 2 metri.

Due tra gli eventi più significativi degli ultimi cento anni che hanno colpito il territorio italiano e interessato il Golfo di Patti sono il maremoto di Messina del 28 dicembre 1908 e l'evento di Stromboli del 30 dicembre 2002. Il maremoto di Messina è stato causato dal terremoto più forte e distruttivo della storia italiana, con una magnitudo di 7.1 e più di 60.000 morti, che ha colpito le coste della Sicilia orientale e della Calabria. Il maremoto ha colpito Messina pochi minuti dopo la scossa distruttiva e si è abbattuto sulle coste della Sicilia orientale e della Calabria, aggiungendo distruzione e morte in un'area già devastata. Nonostante i numerosi tentativi non è stato possibile stimare il numero delle vittime causate dallo tsunami rispetto a quelle causate dal terremoto. In molte località il maremoto si è manifestato con un iniziale ritiro del mare (in alcuni punti fino a circa 200 m) che è durato per alcuni minuti. Poi il mare si è abbattuto sulla costa con almeno tre grandi onde. In alcune località l'onda più grande è stata la prima, mentre in altre la seconda. Sulla costa orientale della Sicilia lo tsunami è stato molto violento, soprattutto tra Messina e Catania: a S. Alessio l'acqua ha raggiunto la quota massima (runup) di 11,90 metri rispetto al livello del mare. Effetti dello tsunami

sono stati osservati anche nelle coste nord della Sicilia, nel golfo di Milazzo, nel golfo di Patti, fino a Termini Imerese.

Una situazione analoga si è avuta sulla costa calabrese: a Pellaro, a sud di Reggio Calabria, è stato misurato un runup di 13 m. e gli effetti sono stati osservati anche nella Calabria tirrenica fino a Porto S. Venere. Le onde di tsunami si sono propagate verso sud fino alle coste di Malta causando l'inondazione di strade e negozi e, verso nord, sono state registrate dagli strumenti collocati a Napoli e a Civitavecchia, rispettivamente a oltre 300 e 500km di distanza.

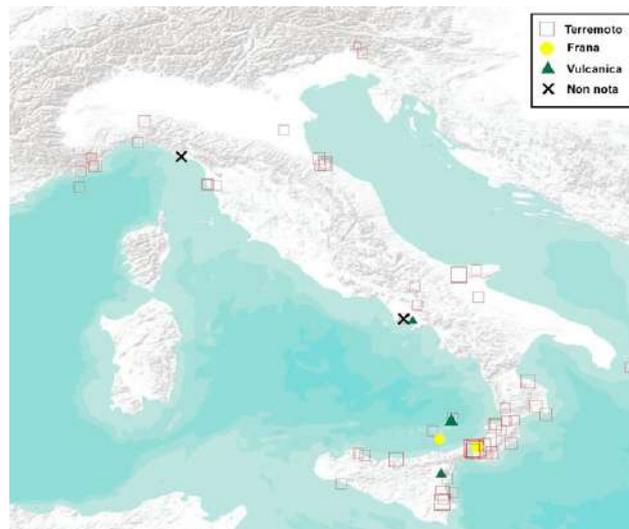


Figura 10 – Mappa dei maremoti documentati che hanno colpito le coste italiane. I simboli la causa. E' evidente la maggiore densità di accadimenti tra le coste calabresi e della Sicilia settentrionale

Il secondo evento di rilievo che ha interessato il golfo di Patti, quello di Stromboli, è stato causato indirettamente dall'attività vulcanica. L'eruzione in sé non ha prodotto un maremoto, ma ha causato un accumulo di materiale eruttivo sulla Sciara del Fuoco, il pendio che dal cratere dello Stromboli arriva al mare.

È stata la caduta di due frane di questo materiale, una subacquea e una sopra il livello del mare, a causare due tsunami distinti, a distanza di circa 7-8 minuti l'uno dall'altro. Nel caso dell'evento di Stromboli, le coste dell'isola sono state le più colpite, in particolare a Piscità, dove l'altezza del run-up è stata di 10,7 metri e a Scari, dove si è verificata l'inondazione più profonda dell'entroterra, pari a 146 metri dalla costa. Tuttavia, gli effetti dell'evento si sono estesi anche ad altre isole Eolie entro 20 minuti dall'inizio dello tsunami, e hanno raggiunto il porto di Milazzo in Sicilia e le coste della Campania.

Anche se non è possibile prevedere con certezza se un terremoto causerà uno tsunami, ma sulla base delle sue caratteristiche come la posizione, la magnitudo, la profondità, ecc., è possibile determinare la probabilità che generi un maremoto.

Sebbene eventi così devastanti siano fortunatamente rari (fig. 10), il maremoto del 1908 documenta che anche le coste italiane, specialmente quelle della Calabria e della Sicilia, sono esposte al rischio di grandi maremoti. Più probabili invece, sono gli eventi con minore intensità, ma pur sempre pericolosi per chi si trova vicino alla costa.

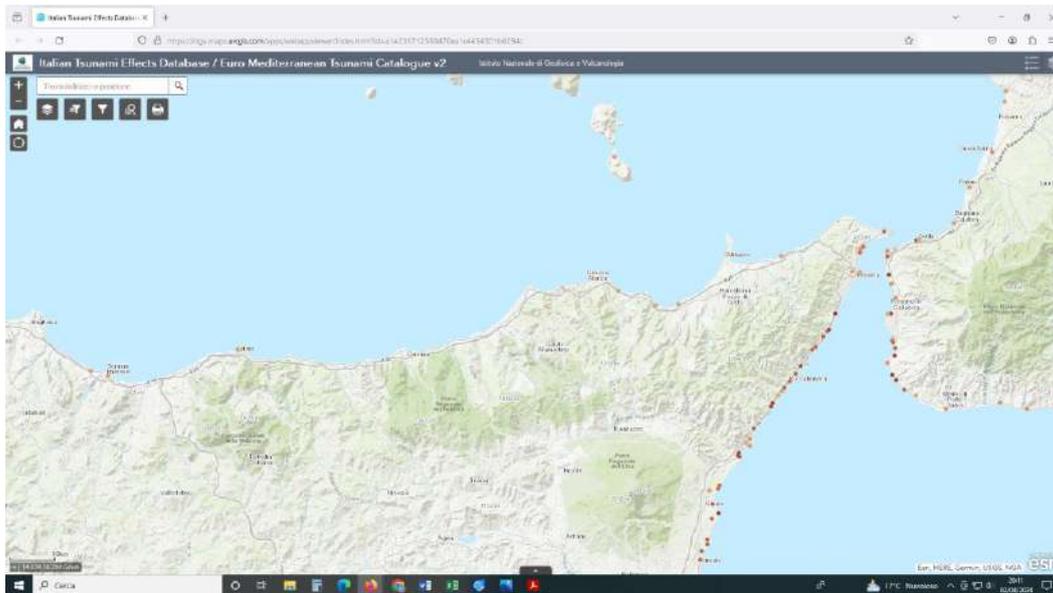


Figura 11 – Immagine di una schermata del database dei maremoti italiani. I punti indicano le aree colpite da onde di maremoto

Dal 2005 l'Italia partecipa al sistema di allertamento internazionale per il rischio maremoto nel Nord Est Atlantico, Mediterraneo e Mari collegati NEAMTWS, sotto il coordinamento dell' IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission dell'Unesco. Si tratta di un sistema analogo a quello già operante nell'area del Pacifico, dei Caraibi e dell'Oceano Indiano, dove sono già attivi sistemi di allertamento rapido (Early Warning), con la differenza che in un mare poco ampio, come il Mar Mediterraneo, i tempi di arrivo delle onde sono molto brevi e questo riduce i tempi utili per allertare la popolazione.

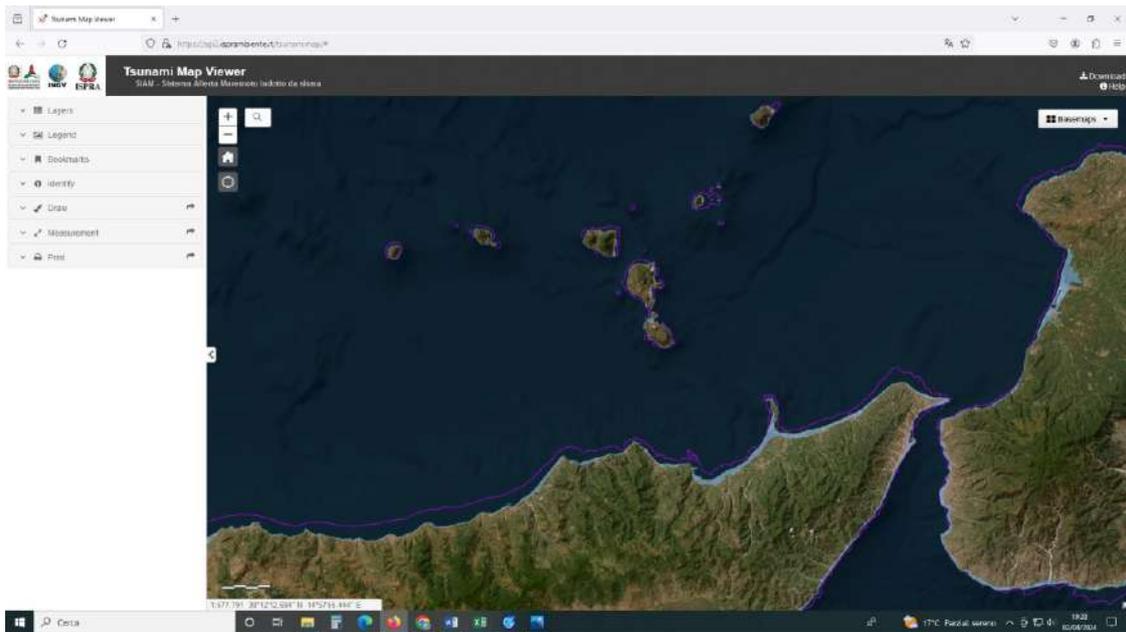


Figura 12 – schermata del Sistema Allerta Maremoto - SiAM. L'immagine mostra la in viola la batimetria dei 50 metri che, come si nota nel golfo di Patti, è estremamente vicina alla linea di costa. Questa conformazione del fondale permetterebbe a un'onda di tsunami di innalzarsi e accelerare immediatamente a ridosso dei luoghi abitati

Nel 2017 è stato istituito, con una Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, il SiAM – Sistema di Allertamento nazionale per i Maremoti generati da sisma, di cui fanno parte tre istituzioni: l'Ingv – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia che opera attraverso il Cat – Centro Allerta Tsunami, l'Ispra – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale e il Dipartimento della Protezione Civile.

Il 15 novembre 2018 sono uscite in Gazzetta Ufficiale le Indicazioni che il Capo Dipartimento della protezione civile rivolge a Componenti e Strutture Operative per l'aggiornamento delle rispettive pianificazioni di protezione civile per il rischio maremoto.

Quando si parla di tsunami spesso si pensa a onde marine di grande altezza ed estensione, in grado di spostarsi a gran velocità e di crescere anche decine di metri fino ad assumere le sembianze di un vero e proprio muro d'acqua. In realtà non è sempre così, anche tsunami di dimensioni ridotte, infatti, sono carichi di energia e potenzialmente dannosi. Eventi di questo genere possono essere molto pericolosi, specialmente se non si sa cosa fare.

Nei prossimi 30 anni la probabilità di tsunami con onde di oltre un metro, capaci di inondare le coste bagnate dal Mediterraneo è del 100%. È certo, infatti, che la risalita del livello dei mari, provocata dallo scioglimento delle calotte polari e dei ghiacciai alpini, si tradurrà in gravi problemi per le zone costiere di numerose nazioni. Italia inclusa.

## SINTESI

Il progetto era mirato a definire e illustrare tutte le indagini utili e necessarie per la corretta gestione dell'area costiera e la progettazione di opere di difesa.

Sembrerebbe un'attività superflua, ma sono diversi i progetti che riportano in modo acritico le analisi dei sedimenti o della morfologia sommersa ed emersa senza un approfondimento del significato dei dati.

In questo documento e nei relativi allegati sono riportati i risultati che nel nostro caso serviranno a fornire dati per future pubblicazioni scientifiche.

Proprio in relazioni a queste, è stato preparato un poster per partecipare all'EGU a Vienna (risulta incredibile che il programma paghi una pubblicazione, ma non la partecipazione a un congresso).

Nel poster sono state illustrate tutte i risultati del progetto, inclusa la mappatura della Posidonia O.

A questo punto abbiamo voluto incrociare i dati geomorfologico sedimentologici con le osservazioni sismiche del precedente capitolo in ottica tsunami.

Innanzitutto è stata considerata la mappatura ufficiale, prodotta dall'ISPRA, relativa al rischio tsunami nell'area.



La carta, in modo acritico, considera un allegamento senza soluzione di continuità fino all'isoipsa di 10 m, limite stimato per un potenziale tsunami.

Nel presente lavoro sono state sviluppate le mappe di inondazione del Golfo di Patti per fenomeni di innalzamento del livello del mare dovuti a maremoto. Il carattere innovativo di questo lavoro non è solo chiarire la vulnerabilità dei comuni costieri coinvolti nel presente progetto ma si distingue notevolmente dai dati e dalle mappe già presenti in letteratura.

I dati già presenti, infatti, si basano sull'elaborazione di *tsunamimap* che considerano delle altezze d'onda di 5 e 10 metri e tengono conto quindi solo delle rispettive isoipse di 5 e 10 metri. Il limite di queste mappe è presupporre che l'acqua raggiunga tali quote ovunque e in modo omogeneo. Un modello più realistico in realtà dovrebbe considerare che non tutte le celle del *raster* sono percorribili e quindi non tutte le aree aventi stessa quota risulterebbero allagabili. Ciò avviene perché l'acqua proveniente dal mare, inevitabilmente incontra delle barriere aventi quote maggiori, quali palazzi, case e infrastrutture che fermerebbero l'onda evitando la sua estensione oltre tale barriera.

Seguendo questo approccio è stato quindi realizzato per la prima volta un modello più realistico, elaborando il Digital Surface Model (DSM) del Golfo di Patti a partire da dati di tipo Lidar. Mediante tool di riclassificazione è stato interrogato il DSM contrassegnando con la quota dell'altezza dell'onda di riferimento, esempio 5 metri, le celle potenzialmente inondabili, a tali celle è stato assegnato il valore 1, mentre le barriere non superabili, ovvero le costruzioni e le infrastrutture aventi altezza superiori ai 5 metri sono state contrassegnate come NoData (ND).

Successivamente ogni cella inondabile è stata moltiplicata per 5 per ottenere il dato delle aree inondabili legate ad un'onda che si infrange sulla costa avente altezza di 5 metri. Infine, è stata calcolata l'altezza dell'acqua in ogni zona sottraendo il *Digital Terrain Model* (DTM) al DSM attraverso il calcolatore dei campi *raster*. Il risultato ottenuto è una mappa che tiene conto delle strutture e infrastrutture nella simulazione delle aree inondabili, modellizzando in modo più realistico i potenziali percorsi che l'acqua seguirebbe. Il presente flusso di lavoro risulta importante anche nell'ottica di fornire una panoramica sugli impatti da inondazioni ai fini anche di considerare azioni di mitigazione personalizzate sulla base del tessuto urbano del comune di riferimento (Balstrøm, 2022).

Il risultato grafico rispettivamente per i 5 e i 10 m è il seguente.



Chiaramente le due immagini riportate sono solo un esempio di come si possono utilizzare, incrociandole le informazioni derivate dalle analisi batimetriche, dal rilievo aerofotogrammetrico da drone della spiaggia e l'analisi dell'uso del suolo eseguita su immagini satellitari.

Il risultato sembra estremamente promettente e comunque con un minimo sforzo, di gran lunga superiore a quello dell'ISPRA.

E' evidente che questo esempio è assolutamente indicativo, ma può essere affinato, approfondito ed esteso.