



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

## **Tesi di tirocinio di formazione e orientamento**

(Convenzione stipulata tra ISPRA e l'Università degli Studi "Roma Tre" )

### **STUDIO DI FATTIBILITÀ PER LO SVILUPPO DELLE RETI DI MONITORAGGIO DEL MARE**

***Ing. Alessio Di Felice***

**Tutor ISPRA: Ing. Giovanni Arena**

**ANNO ACCADEMICO 2007-2008**

Data	Firma Tirocinante	Firma dei Tutor	Firma Responsabile Servizio

# **ABSTRACT**

*In questa tesi effettuata durante lo stage formativo abbiamo condotto uno studio di fattibilità sulla realizzazione di un Warning System per tsunami nel mediterraneo con la quale si è cercato di delimitare le zone di interesse, ossia le zone a rischio, e di poter definire una o più scelte implementative per la realizzazione del sistema ed i costi ad esso associati.*

*Gli obiettivi che ci eravamo preposti sono stati raggiunti, riuscendo a delimitare tre zone maggiormente a rischio all'interno del bacino del Mar Mediterraneo ed evidenziando due scelte implementative diverse (soprattutto in termini di tecnologia utilizzata): la scelta è ricaduta sia dal punto di vista tecnologico sia economico sulla tecnica maggiormente innovativa che oltre a sfruttare le maggiori innovazioni tecnologiche è caratterizzata anche da tempi di elaborazione brevi (fondamentali per un sistema di allerta); inoltre tale sistema avrà la funzione di start-up per ulteriori sviluppi e studi.*

## INDICE DEL CONTENUTO

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>CENSIMENTO RETI IN ITALIA .....</b>	<b>8</b>
2.1	CENTRO PREVISIONI E SEGNALAZIONE MAREE (CPSM) .....	8
2.2	ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA (IIM) .....	14
2.3	AUTORITÀ PORTUALE DI CIVITAVECCHIA, FIUMICINO E GAETA .....	15
2.4	ESEMPIO DI SERVIZIO .....	16
<b>3.</b>	<b>STATO ATTUALE DELLA RETE IN ISPRA.....</b>	<b>18</b>
3.1	LA RETE RMN .....	19
3.2	LA RETE RON .....	32
3.3	SVILUPPI INNOVATIVI A BREVE TERMINE.....	36
<b>4.</b>	<b>LE CARATTERISTICHE DELLO TSUNAMI NEL MEDITERRANEO.....</b>	<b>39</b>
4.1	INTRODUZIONE.....	39
4.2	DESCRIZIONE DEL FENOMENO .....	39
4.3	TSUNAMI (MAREMOTO).....	43
4.4	PARAMETRI GEOFISICI DEL TERREMOTO.....	47
4.5	MAREMOTI NEL MARE DEL MEDITERRANEO .....	50
4.6	DELIMITAZIONE DELLE AREE DI INTERESSE .....	52
<b>5.</b>	<b>TECNOLOGIE PER UN SISTEMA DI ALLERTA DAL RISCHIO TSUNAMI.....</b>	<b>59</b>
5.1	INTRODUZIONE.....	59
5.2	I SISTEMI GPS E GLONASS .....	59
5.3	TECNICA “RAPID DETERMINATION” .....	68
5.4	TECNICA “GPS SHIELD-ARRAYS” .....	70
<b>6.</b>	<b>PROGETTO DI UN WARNING SYSTEM PER IL RILEVAMENTO DI TSUNAMI NEL MEDITERRANEO .....</b>	<b>80</b>
6.1	INTRODUZIONE.....	80
6.2	COMPONENTI NECESSARIE PER UN WARNING SYSTEM .....	80
6.3	VALUTAZIONE ECONOMICA DEL SISTEMA .....	89
6.4	STRUTTURA GENERALE E SUE APPLICAZIONI.....	97
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>100</b>
<b>8.</b>	<b>LISTA ACRONIMI.....</b>	<b>102</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>104</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1: Struttura della rete del CPSM.....	9
Figura 2.2: Flusso dati della rete del CPSM.....	11
Figura 2.3: Metodo up-crossing .....	13
Figura 2.4: Immagine del servizio visibile da internet.....	17
Figura 3.1: Stazione Mareografica di Civitavecchia.....	20
Figura 3.2: Componenti della Stazione Mareografica.....	21
Figura 3.3: Copertura GSM di TI.....	32
Figura 3.4: Componenti di una boa Triaxys.....	35
Figura 4.1: Illustrazione del fenomeno dello tsunami.....	43
Figura 4.2: Variazione dell'onda dello tsunami .....	45
Figura 4.3: Faglie nel Mar Mediterraneo .....	46
Figura 4.4: Parametri di un terremoto .....	48
Figura 4.5: Magnitudo calcolata con diversi metodi.....	50
Figura 4.6: Delimitazione delle aree di interesse .....	52
Figura 4.7: Caratteristiche di uno tsunami nella SZ Algeria-Tunisia.....	55
Figura 4.8: Caratteristiche di uno tsunami nella SZ Sud Tirreno.....	56
Figura 4.9: Caratteristiche di uno tsunami nella SZ Arco ellenico .....	56
Figura 5.1: Zone del Mediterraneo idonee al GPS-Shield .....	70
Figura 5.2: Differenze fra i due modelli.....	71
Figura 5.3: Caratteristiche dello tsunami derivante dai due modelli.....	74
Figura 5.4:Variazione dell'accuratezza in funzione della distanza dal trench (1 stazione) .....	75
Figura 5.5:Variazione dell'accuratezza in funzione della distanza dal trench (2 stazioni) .....	76
Figura 5.6: Variazione dell'accuratezza.....	77
Figura 5.7: Timeline delle principali scadenze .....	79
Figura 6.1: Componenti di una stazione GPS-Shield.....	84
Figura 6.2: Recupero di uno tsunameter .....	86
Figura 6.3: Componenti interne della boa di superficie .....	87
Figura 6.4: Componenti interne della stazione GPS permanente.....	88
Figura 6.5: Schema generale del Warning System.....	98

Figura 6.6: Schema generale di un efficace Warning System.....	99
--	----

---

**INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 4.1: La magnitudo non determina lo tsunami.....	45
Tabella 6.1: Strumentazione e tecnologia da implementare in funzione dell'obiettivo .....	81
Tabella 6.2: Specifiche del sistema .....	84
Tabella 6.3: Schema economico delle due tecnologie a confronto .....	90
Tabella 6.4: VAN della tecnica GPS-Shield Arrays .....	91
Tabella 6.5: VAN della tecnica RD .....	92
Tabella 6.6: Schema economico delle due tecnologie a confronto (GPS-Shield con 6 stazioni e RD con 114 stazioni permanenti) .....	94
Tabella 6.7: VAN della tecnica GPS-Shield Arrays con 6 stazioni .....	95
Tabella 6.8: VAN della tecnica RD con 114 stazioni .....	96

# 1. INTRODUZIONE

Il monitoraggio del mare permette di acquisire ed elaborare in maniera efficiente i parametri meteo marini e meteorologici ed è di fondamentale importanza per un duplice aspetto; infatti se da un lato archiviare tutti i dati può offrire una base consistente per studi climatici e per la qualità delle acque dal passato ad oggi, dall'altro lato possono essere gli elementi indispensabili per la creazione di sistemi di forecasting (“previsione”). Studiare ed elaborare questi dati fornisce ulteriori informazioni anche per alcuni campi applicativi, quali la costruzione di nuove banchine o di piattaforme petrolifere (che utilizzeranno ad esempio l'altezza significativa d'onda), in cui possono far evitare investimenti sbagliati (“pianificazione” delle infrastrutture).

In quasi ogni nazione della terra, tali dati vengono raccolti ed archiviati per essere oggetto di studi statistici, cercando di realizzare modelli di previsione da cui poter ottenere importanti servizi di salvaguardia e sicurezza delle popolazioni; il problema può essere molto complesso qualora la previsione debba essere realizzata su fenomeni naturali altamente rari e complessi, quale lo tsunami (o maremoto), ed utilizzata per un sistema di previsione e di allertamento. Per tali studi è indispensabile investire sull'innovazione tecnologica da poter implementare al fine di aumentare il più possibile l'efficienza, in quanto l'accuratezza richiesta in sistemi di previsione di tsunami è molto elevata e difficilmente raggiungibile con la tecnologia più comune; inoltre qualora queste specifiche siano già state raggiunte è molto importante lavorare sui tempi di elaborazione, necessari ad esempio alla trasmissione dell'eventuale allarme al centro di controllo, in modo tale da poter aumentare il tempo a disposizione per attuare ipotetiche evacuazioni.

In tale ambito si colloca la mia tesi di master, realizzata durante lo stage presso l'ente I.S.P.R.A. (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), in cui abbiamo affrontato la tematica riguardante il monitoraggio con particolare attenzione alla realizzazione di un Warning System per tsunami nel Mediterraneo; infatti come vedremo nel capitolo 4 il bacino del Mar Mediterraneo è stato e può essere di nuovo sede di tsunami, tanto da evidenziare la necessità di un sistema di previsione per cercare di minimizzare i danni (“protezione”) e/o di evitarli qualora sia possibile (“prevenzione”). Oltre ai dettagli tecnici abbiamo introdotto anche il calcolo dei costi che dovrebbero essere sostenuti, cercando di identificare una best choice, integrando le specifiche tecniche con i vincoli economici.

Dopo la breve introduzione fatta in questo primo capitolo, nel secondo abbiamo ritenuto importante studiare l'attuale situazione in Italia in termini di reti di monitoraggio ambientale già esistenti e le loro modalità implementative, per poterne ricavare eventuali spunti e/o idee; inoltre alla fine del capitolo abbiamo indicato un esempio di servizio che può essere erogato con i dati raccolti tramite queste reti, tra cui non è presente quella implementata presso l'ISPRA, perché abbiamo voluto dedicargli un capitolo a parte.

Quindi nel terzo capitolo abbiamo descritto in dettaglio la Rete dell'ISPRA, composta come vedremo dalla rete mareografica e dalla rete ondametria, dandone non solo le caratteristiche tecniche, ma anche fornendo un'idea di possibile innovazione da perseguire in ottica di futuri ammodernamenti, essendo in corso (presso l'ente) un bando di gara con oggetto proprio l'innovazione della rete.

La parte centrale della tesi inizia nel quarto capitolo, in cui tratteremo il fenomeno noto come tsunami nel bacino del Mediterraneo, ma comunemente chiamato maremoto in Italia; quindi affronteremo uno studio su questo fenomeno dedicandoci sia a considerare la probabilità di accadimento dell'evento (citando alcuni casi storici) sia individuando le zone che all'interno del bacino del mediterraneo potrebbero essere sede del maremoto, arrivando a delineare le zone più a rischio.

In seguito nel quinto capitolo tratteremo le tecnologie che possono essere utilizzate per realizzare il sistema sia quelle tecnologie che consentirebbero di ottenere le informazioni necessarie alla previsione che quelle tecniche di inversione e/o di stima che assunti i dati sono in grado di prevedere l'evento dello tsunami; infatti lo studio condotto in questo capitolo affronta entrambe le tematiche.

Una volta che avremo capito le tecniche che possono essere utilizzate, affronteremo nel sesto capitolo la questione della realizzazione del *Warning System* all'interno del Mediterraneo che consenta soprattutto il *forecasting*, poiché in tali zone qualora avvenisse un simile evento si avrebbero dei tempi disponibili, per eventuali azioni, molto ristretti data la vicinanza delle faglie alle coste (vedere paragrafo 4.5); quindi definiremo le componenti necessarie alla sua realizzazione (prevedendo le tecnologie e le tecniche precedentemente delineate) ed i costi ad essi associati. In chiusura di capitolo introdurremo anche la struttura (ad un livello di astrazione maggiore) del *Warning System* per renderlo efficace ed efficiente.



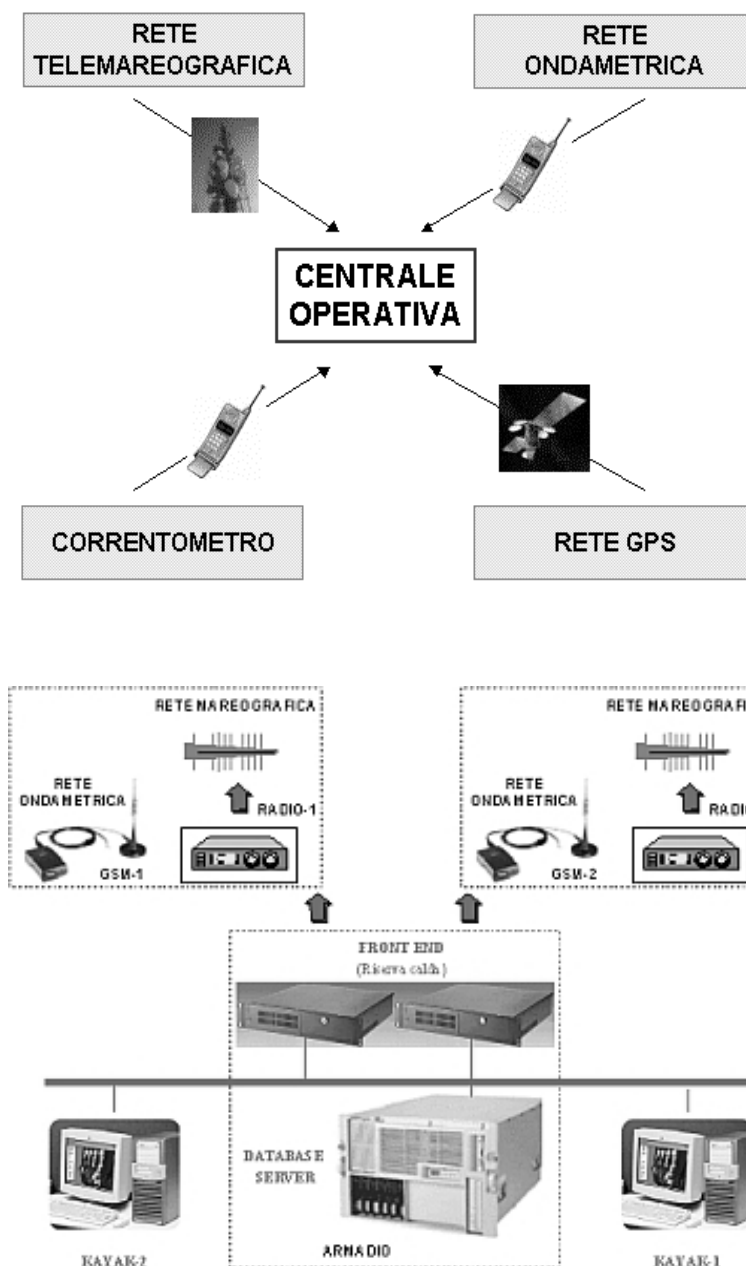
L'ultimo capitolo conterrà le conclusioni considerando le informazioni ottenute durante tutta la tesi, ma in particolare del capitolo precedente, poiché l'obiettivo ultimo di questa tesi è la progettazione del sistema di previsione, giungendo all'individuazione (qualora fosse possibile) di una best choice.

## 2. CENSIMENTO RETI IN ITALIA

All'interno di questo capitolo faremo un censimento di alcune delle reti di monitoraggio ambientale presenti in Italia evidenziandone, qualora sia possibile, le componenti implementative; abbiamo ritenuto importante dedicare un capitolo a tale argomento per dimostrare che in molti contesti le “problematiche” ambientali sono sentite tanto da indurre le autorità locali e/o privati a dotarsi di una propria rete. È importante sottolineare che esiste un unico servizio nazionale (Servizio Mareografico erogato dall'ISPRA, vedere paragrafo 3.1) che risulta essere responsabile della raccolta dei dati e per questo gli abbiamo dedicato il capitolo successivo; tutte le altre reti sono realizzate da autorità locali e/o privati che per necessità e/o interesse si sono voluti realizzare una propria rete a volte perché necessitavano di campionamenti più frequenti dei dati altre per gestire direttamente altre informazioni. Come vedremo, infatti, alcune di queste reti risultano essere molto simili alla rete nazionale ed in alcuni casi sono state realizzate proprio dall'ISPRA, quindi qualora anche fossero implementate con tecnologie compatibili l'unico archivio dati ufficiale è quello fornito dal Servizio Mareografico e saranno gli enti interessati che eventualmente faranno richiesta di avere i dati e non viceversa. In ultimo abbiamo ritenuto importante mostrare un esempio di servizio che può essere erogato con i dati raccolti.

### 2.1 CENTRO PREVISIONI E SEGNALAZIONE MAREE (CPSM)

L'Istituzione CPSM gestisce un'estesa rete di monitoraggio del livello del mare e dei parametri meteorologici nella laguna di Venezia e nella zona del Mar Adriatico prospiciente ad essa; a questa si è aggiunta, nel tempo, una rete ondametria e una rete di riferimento GPS.



**Figura 2.1: Struttura della rete del CPSM**

Descrizione della rete tele mareografica: la rete tele mareografica è costituita da 16 stazioni automatiche, collegate via radio ad una stazione centrale, attraverso una stazione addizionale che funge da ripetitore. Le stazioni periferiche acquisiscono e processano i dati registrati dai sensori, trasmettono le misure alla centrale, situata negli uffici dell'ICPSM, nel centro storico di Venezia, e le registrano in una memoria locale. La centrale archivia i dati in un database costruito in linguaggio SQL ed un'interfaccia grafica, installata presso la stazione centrale, permette di ottenere in tempo reale un'immagine sinottica del livello del mare e dei parametri meteorologici nella laguna di Venezia e in mare aperto: questo

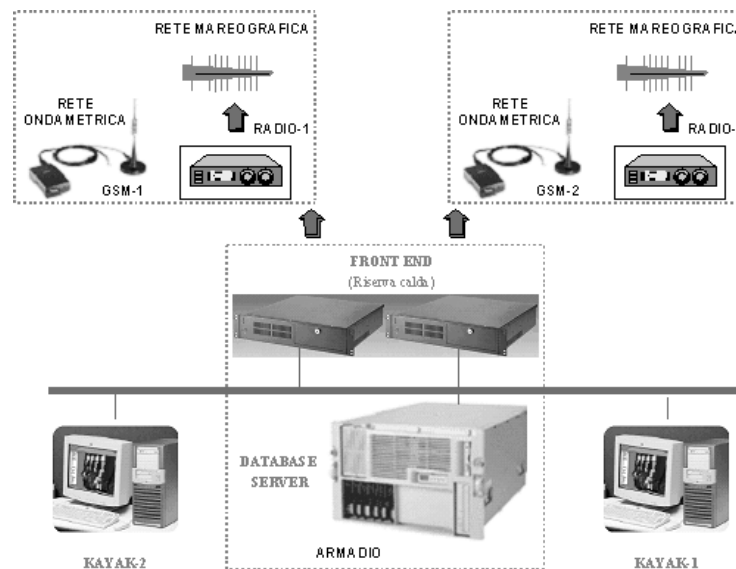
strumento si dimostra particolarmente utile per la gestione delle attività necessarie durante il verificarsi degli eventi di 'acqua alta'. Il parametro principale, misurato da quasi tutte le stazioni della rete tele mareografica, è il livello del mare, mentre alcune stazioni registrano anche parametri meteorologici, come vento, pressione e temperatura atmosferica, umidità relativa, precipitazione, radiazione solare, temperatura dell'acqua (la stazione di Piattaforma CNR, in particolare, è la più completa: essa misura infatti tutti i parametri elencati). L'Osservatorio dell'Ospedale al Mare, al Lido di Venezia, è costituito da due stazioni meteorologiche recentemente acquisite e aggiornate dall'ICPSM, ma funzionanti dal 1940: per queste stazioni è perciò disponibile un'estesa serie storica di dati tra cui pressione, vento, temperatura dell'aria, umidità relativa, insolazione, che fornirà utili informazioni climatologiche. Per assicurare la continuità della ricezione dei dati e la completezza del database, il personale dell'ICPSM, in collaborazione con una ditta specializzata, si occupa della manutenzione della rete di monitoraggio: i numerosi strumenti e le strutture sono ispezionati periodicamente garantendo una corretta operatività del sistema di monitoraggio e prevenendo i guasti alle sue varie componenti, come rottura dei sensori, danni alle strutture che li contengono o guasti al sistema di trasmissione. Tecnici specializzati si occupano della connessione radio fra le stazioni e la centrale; inoltre tutti i dati della rete tele mareografica sono automaticamente validati dal sistema, che segnala la registrazione di valori evidentemente errati. Un successivo controllo grafico, effettuato manualmente dai tecnici dell'ICPSM, permette di evidenziare ed eventualmente eliminare i dati anomali (l'archivio dei dati validati comprende i dati orari, registrati a partire dal 1983, nelle stazioni di Punta Salute, Piattaforma CNR e delle tre dighe Lido, Malamocco, Chioggia. Sono inoltre disponibili, con la frequenza di cinque minuti, i dati delle stesse stazioni a partire dal 1998, ed i dati delle altre stazioni a partire dalla data di installazione di ciascuna: Palazzo Cavalli (1998) Chioggia Città (1999); Saline (2000); Misericordia (2002); Burano (2002); Murano (2003); Chioggia Porto (2003); Malamocco Porto (2003); Ospedale al Mare (2004). I dati validati vengono utilizzati per calcolare le principali grandezze statistiche, tra cui le medie annuali del livello del mare e una lista dei valori estremali di livello registrati.

Descrizione della rete ondametria: la rete costituita dalle 10 stazioni sotto elencate rappresenta la realizzazione revisionata di parte del progetto che l'Amministrazione comunale, nel 1997, commissionò al Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Dinamica delle Grandi Masse e che prevedeva un contingente di 27 stazioni ondametriche.

Il sistema realizzato è un sistema aperto ed espandibile ad un numero elevato di altri siti di monitoraggio.

La rete di rilevamento è così composta:

- una stazione centrale (opportunamente ridondata) che gestisce le chiamate alle stazioni periferiche, provvede alla validazione dei dati ed effettua i controlli di funzionamento necessari per una corretta manutenzione della rete;
- n°10 stazioni periferiche per la rilevazione dei parametri utili alla rappresentazione del fenomeno moto ondoso;
- supporto di comunicazione su linea telefonica mobile GSM: questa soluzione, nelle modalità di colloquio giornaliero, risulta la più economica ed è dotata di un elevato grado di affidabilità.



**Figura 2.2: Flusso dati della rete del CPSM**

### *La stazione centrale*

E' provvista di software indipendente per la gestione delle periferiche, dell'archiviazione dell'elaborazione dei dati residente su hardware in comune con la rete telemareografica. L'hardware è composto dalle seguenti componenti principali:

- due computer industriali che costituiscono il sistema di acquisizione dati e di prima archiviazione (Front End), dotati del software di connessione alla rete mareografica ed a quella ondamentrica;

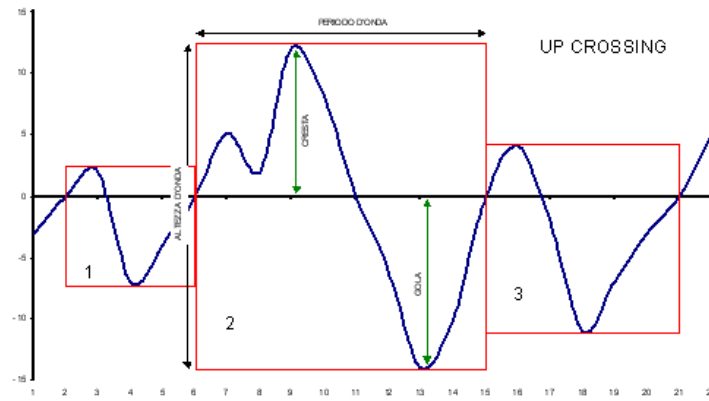
- un server sul quale vengono archiviati i dati ondametrici, mareografici, meteorologici e previsionali in modo definitivo. Il server è realizzato in modo da garantire totale ridondanza del sistema operativo e del data base.

### *Le postazioni periferiche*

Un particolare cenno meritano le postazioni periferiche per definire da quali elementi esse sono costituite:

- cabine per il ricovero delle strumentazioni della stazione, qualora esistente, o eventuale idonea struttura di supporto (palo);
- stazione di gestione, elaborazione, archiviazione e trasmissione dei dati rilevati;
- sensore di rilevamento ad ultrasuoni;
- struttura di supporto del sensore che permette di orientare il cono di rilevazione su un tratto di superficie non occupata da natanti e soggetta a libera propagazione del moto ondoso;
- sistema di alimentazione collegato alla rete ENEL con la dotazione di una batteria tampone per assicurare l'alimentazione anche in caso di brevi cadute di erogazione.

Il principio di misura: il principio di funzionamento del sensore ondametrico ad ultrasuoni si basa sulla misura del tempo di percorrenza di un impulso sonoro emesso da una opportuna sorgente di ultrasuoni e riflesso dall'interfaccia aria-acqua: nota la velocità di propagazione del suono in aria, si ricava la distanza tra il trasduttore e la superficie del mare. La misura viene ripetuta con una frequenza di 4 Hz (4 campioni al secondo). A ciascuna misura di livello viene sottratto il valore medio (mediomare del campione), ottenendo così le elevazioni e le depressioni del pelo libero rispetto al suo valore medio. I parametri d'onda vengono ricavati ogni 15 minuti con il metodo zero *up-crossing*.



**Figura 2.3: Metodo up-crossing**

L'elaborazione dei dati: per ognuna delle stazioni di monitoraggio il sistema rileva in continuo, con frequenza di 4 misure al secondo, la distanza del sensore dal pelo libero dell'acqua, ricavando così i dati grezzi necessari a valutare i movimenti della superficie dell'acqua e disegnare il profilo delle onde. I dati ricavati sono stati controllati da un apposito software che ha il compito di filtrare tutti i valori anomali dovuti ad errori di ricezione del segnale di ritorno o al passaggio o stazionamento di corpi estranei (tronchi, paline, imbarcazioni) nel cono di azione del sensore stesso. Dopo l'eliminazione delle interferenze, si ricavano, ogni 15 minuti, mediante il metodo "zero up-crossing", dei parametri d'onda dei quali quelli maggiormente significativi sono:

- altezza massima dell'onda ( $H_m$ ) che rappresenta il massimo valore di onda rilevato nel tempo considerato (15 minuti);
- altezza significativa dell'onda ( $H_s$ ) che rappresenta il valore medio del terzo delle onde più elevate calcolata nel tempo considerato (15 minuti).

Relativamente a questi parametri, dopo aver suddiviso le stazioni ondamiche in 4 gruppi (Canal Grande, Rii di attraversamento, Canali lagunari e Canale della Giudecca), omogenei per tipologia di traffico acqueo ed esposizione a fattori meteorologici, sono stati considerati i seguenti dati statistici rilevati nel periodo luglio 2003 - giugno 2006:

- valori massimi e medi di altezza d'onda massima ( $H_m$ ) e altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) relativi all'intero periodo di osservazione;
- valori massimi e medi mensili di  $H_m$  e  $H_s$  di tutto il periodo;

- distribuzione annuale delle frequenze percentuali di raggiungimento e superamento dei valori di 10, 20, 25, 30, 40, 50 cm di  $H_m$  relativi a ciascuna stazione di misura.
- giorno tipo calcolato sull'intero il periodo di rilevamento.

Il giorno tipo viene costruito eseguendo la media di tutti i valori registrati alla stessa ora di ciascun giorno del periodo considerato partendo dal "*data base*" d'origine, composto dai dati rilevati ogni 15 minuti; ciascun punto rappresenta la media dei valori registrati allo stesso orario. Successivamente, per arrotondare i picchi e rendere più evidente l'andamento è stata costruita la curva della media mobile sul periodo di un'ora. Si ricorda che la misura limite di 10 cm di onda prodotta è stata indicata, dalla Commissione per lo Studio del Moto Ondoso, nel 1994, come parametro di riferimento per stabilire i limiti di velocità delle varie categorie di natanti.

## 2.2 ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA (IIM)

Il servizio idrografico di Stato è affidato all'Istituto Idrografico della Marina, Ente della Marina Militare, legalmente costituito il 26 dicembre 1872, con il compito di eseguire il rilievo sistematico dei mari italiani, produrre la documentazione nautica ufficiale e diffondere in campo nazionale ed internazionale l'informazione nautica, allo scopo di garantire la sicurezza della navigazione e concorrere alla salvaguardia della vita umana in mare. L'attività dell'Istituto è rivolta fondamentalmente alla produzione di carte e pubblicazioni per la navigazione marittima oltre che ad una attività nel campo oceanografico, con lo studio della dinamica delle acque e delle loro caratteristiche, e la gestione di banche dati. L'Istituto ha sede a Genova, in Forte San Giorgio, dove operano circa 250 persone tra militari e civili che assicurano la produzione della documentazione nautica di competenza con una tiratura annuale di circa 100.000 carte e 40.000 pubblicazioni. Altre attività sono lo studio e la realizzazione di prototipi di strumenti nautici, meteorologici e talassografici la cui produzione in serie, per gli usi della Marina Militare, viene in genere affidata a ditte private.

L'Istituto Idrografico rappresenta l'Italia nella Organizzazione Idrografica Internazionale (IHO) che comprende 64 nazioni e ha il fine di coordinare le attività dei Servizi Idrografici, di curare la standardizzazione dei documenti nautici e di promuovere la cooperazione per il progresso delle tecniche dei rilievi idro-oceanografici. L'attività internazionale è svolta



principalmente nell'ambito del Gruppo Regionale del Mediterraneo (MBSHC), in seno all'IHO, concorrendo alla formazione degli "idrografi" di paesi esteri ai quali è offerta la partecipazione a corsi di specializzazione in idrografia svolti in sede ed a bordo delle Unità Idrografiche.

Per l'attività di campagna l'Istituto dispone di tre Unità idrografiche: Nave MAGNAGHI, Nave ARETUSA e Nave GALATEA. I rilievi delle Unità navali vengono integrati da quelli svolti dalle Spedizioni Geodetica ed Idrografica gestite in proprio dall'Istituto.

## **2.3 AUTORITÀ PORTUALE DI CIVITAVECCHIA, FIUMICINO E GAETA**

L'autorità portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta possiede per ogni sede una stazione meteorologica, che effettua un campionamento all'ora, e presso una banchina di Civitavecchia anche un sensore per la qualità dell'acqua, che effettua il campionamento in due possibili modalità o uno all'ora o ogni 60 minuti; infatti tale ente è interessato a monitorare i dati meteomarini per poter tenere sotto controllo tutti questi parametri un momento così cruciale, che vede il sedime portuale svilupparsi esponenzialmente.

La stazione meteorologica dell'Autorità portuale presente a Civitavecchia (a Fiumicino e Gaeta ve ne sono altre due identiche) è collocata sul tetto dell'edificio ed è composta da diverse strumentazioni per poter acquisire i dati, quali:

- il Datalogger CR10X, che acquisisce i segnali dai sensori per misure di livello idrometrico su attivazione del centro elaborazione dati al superamento delle soglie impostate per la velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria e pressione atmosferica;
- il sensore velocità e direzione vento Wind Sentry Set, che comprende sia il sensore di velocità che quello di direzione del vento montati su un supporto in alluminio anodizzato. Il sensore di velocità è costituito da un trasduttore a bobina fissa che fornisce in uscita un'onda sinusoidale, indotta dalla rotazione di un magnete, la cui frequenza è direttamente proporzionale alla velocità del vento. Il sensore di direzione è costituito da una banderuola solidale con un potenziometro di

precisione in materiale plastico conduttivo che, alimentato da una tensione costante, produce un segnale analogico direttamente proporzionale alla direzione del vento;

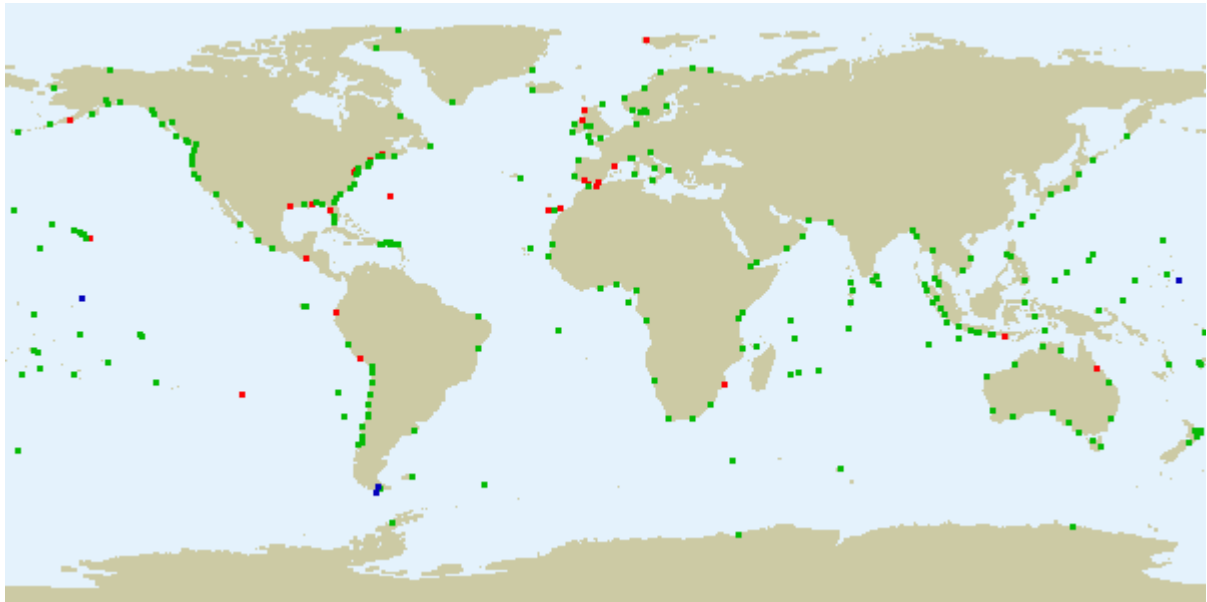
- il sensore temperatura ed umidità dell'aria HMP50, che è costituito da un sensore capacitivo per la misura dell'umidità e da un sensore resistivo al platino per la misura della temperatura;
- il sensore pressione atmosferica PTB101B, che è dotato di un elemento sensibile capacitivo al silicio;
- il sensore radiazione solare globale LI200X, che misura la radiazione solare globale con un sensore fotovoltaico al silicio montato in una testa miniaturizzata con completa correzione del coseno;
- il pluviometro TE525MM, che convoglia la pioggia verso un contenitore oscillante dotato di magnete e ad ogni oscillazione alternata del contenitore il magnete eccita un interruttore per 135 ms (ogni interruzione di corrente corrisponde a 0,1 mm di pioggia);
- il radiomodem Wireless Spread Spectrum RF416, che consentono di effettuare comunicazioni immuni da interferenze di tipo RF come quelle causate dalla telefonia mobile.

## 2.4 ESEMPIO DI SERVIZIO

In questo paragrafo mostriamo un esempio di servizio che può essere erogato con i dati raccolti anche da più reti di monitoraggio: l'obiettivo del servizio “*Sea Level Station Monitoring Facility*” è quello di offrire informazioni sullo stato operativo delle 271 stazioni *real-time* per la misura del livello del mare, appartenenti sia alle reti nazionali sia quelle mondiali; inoltre lo scopo è anche quello di realizzare un servizio grafico tramite display per il controllo e la consultazione istantanea delle singole stazioni. Questo *web-service* è nato da una collaborazione fra il VLIZ (*Flanders Marine Institute*) ed il progetto ODINAFRICA (*Ocean Data Information Network for Africa*) di IODE (*International Oceanographic Data and Information Exchange*) del comitato IOC (*Intergovernmental Oceanographic Commission*) dell'UNESCO ed era inizialmente focalizzato sul monitoraggio delle stazioni di misura del livello del mare posizionate in Africa. Il servizio

è stato in seguito esteso, per fornire un servizio *real-time*, alle stazioni della rete “*Global Sea Level Observing System Core Network*” e delle reti regionali per il rischio tsunami nell’oceano Pacifico, nell’oceano Atlantico zona Nord Est, nel Mediterraneo e nel mare dei caraibi. In questo servizio l’obiettivo non è quello di aumentare o di ricercare una data qualità delle informazioni, dato che è solo un servizio di accesso dati, tramite internet, di altre reti responsabili della qualità dei dati disponibili; infatti l’obiettivo è quello di offrire informazioni riguardo allo stato operativo delle stazioni che fanno parte di reti nazionali e/o internazionali e di offrire una visualizzazione grafica della situazione *real-time* per consentire un’immediata interpretazione.

La figura sottostante è la mappa mostrata sul sito del servizio, in cui possiamo notare non solo tutte le singole stazioni, ma è possibile dedurre il loro stato dal colore e cliccandoci sopra è possibile avere l’andamento temporale dei parametri osservati.



**Figura 2.4: Immagine del servizio visibile da internet**

### 3. STATO ATTUALE DELLA RETE IN ISPRA

Nel capitolo precedente sono state mostrate delle reti di monitoraggio presenti in Italia anche se, come abbiamo avuto già modo di dire, l'unico servizio nazionale è quello erogato dal Servizio Mareografico dell'ISPRA; infatti è per questo motivo che abbiamo utilizzato questo capitolo per descrivere in dettaglio la rete nazionale mostrandone le componenti tecniche ed infine fornendo un'idea di innovazione da poter realizzare per una delle due sottoreti che la costituiscono, dati i progressi tecnologici che ci sono stati in termini di protocolli di rete da poter utilizzare nella trasmissione dei dati.

Nel 1942 nasce il Servizio Mareografico con la Legge n°1460 del 18/10/1942 nell'ambito del Servizio Tecnico Centrale del Ministero dei Lavori Pubblici per dare sistematicità e continuità al rilevamento mareografico in Italia. Con la Legge 183/1989 sulla difesa del Suolo, il Servizio Mareografico Nazionale viene inserito nell'ambito dei Servizi Tecnici della Presidenza del Consiglio e con il Decreto Legislativo n°300 del 30/07/1999, di istituzione dell'APAT, il Servizio Mareografico viene a far parte della Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i Servizi Tecnici e tra le attività fondamentali del Servizio sono quelle di:

- progettare, realizzare e gestire le reti di rilevamento mareografico e ondametrico per il monitoraggio delle caratteristiche fisiche e di qualità dei mari italiani;
- raccogliere, validare, elaborare e pubblicare i dati raccolti;
- effettuare valutazioni sullo stato dei mari italiani.

L'attuale rete di rilevamento è composta da due sottoreti, la rete RMN (Rete Mareografica Nazionale) e la rete RON (Rete Ondametrica Nazionale): la Rete Mareografica Nazionale è composta da stazioni di misura uniformemente distribuite lungo le coste del territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all'interno delle strutture portuali, mentre la Rete Ondametrica Nazionale è composta da stazioni strumentate con boe ondamiche direzionali, da cui si ottengono i seguenti parametri sintetici (descrittivi dello stato del mare) e spettrali:  $H_s$  (metri) altezza d'onda significativa spettrale,  $T_p$  (secondi) periodo di picco,  $T_m$  (secondi) periodo medio,  $D_m$  (gradi N) direzione media di propagazione,  $T_{mp}$  (gradi C°) temperatura dell'acqua; densità di energia, direzione media di propagazione, dispersione direzionale (*spread*), asimmetria (*skewness*), curtosi. I dati rilevati dal Servizio Mareografico sono utilizzati dalle Amministrazioni dello Stato, dalle Amministrazioni

Regionali , da professionisti e da studiosi nazionali ed internazionali ognuno per le proprie finalità (come ad esempio controllo e propagazione di inquinanti in mare, stato del mare nel caso di piene fluviali e progettazione di opere di difesa costiera). Ora passiamo ad analizzare nel dettaglio le due sottoreti singolarmente.

### **3.1 LA RETE RMN**

La Rete Mareografica Nazionale è composta di 26 nuove stazioni di misura uniformemente distribuite sul territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all'interno delle strutture portuali: Trieste, Venezia Lido, Ancona, Ravenna, Pescara, Ortona, Isole Tremiti, Vieste, Bari, Otranto, Taranto, Crotone, Reggio Calabria, Messina, Catania, Porto Empedocle, Lampedusa, Palermo, Palinuro, Salerno, Napoli, Cagliari, Carloforte, Porto Torres, Civitavecchia, Livorno, Genova ed Imperia. Questa rete sostituisce integralmente il sistema di rilevazione mareografico preesistente. Una parte delle stazioni elencate erano state originariamente trasferite all'APAT dal Ministero dei Lavori Pubblici in occasione dell'inquadramento dell'APAT nel Dipartimento dei Servizi Tecnici Nazionali presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri. In tali stazioni hanno funzionato per molti anni mareografi meccanici a registrazione cartacea gestiti dalle sezioni periferiche del Genio Civile Opere Marittime. Nel 1986 sono stati installati dei mareografi elettronici a galleggiante con registrazione locale in memoria EPROM. Le nuove stazioni che compongono la RMN sono composte da due strumenti di misura della marea: uno (principale) ad ultrasuoni con guida tubolare del fascio e compensazione di temperatura, ed uno (secondario) a galleggiante e registrazione cartacea per la verifica puntuale delle misure, l'analisi di eventi o fenomeni particolari ed il recupero dei dati nei casi di mancato funzionamento dello strumento principale. I mareografi sono riferiti ad un caposaldo quotato con livellazione di alta precisione, opportunamente verificato, sulla base del più vicino caposaldo IGM. Le stazioni sono dotate anche di un sensore anemometrico (velocità e direzione del vento a 10 metri dal suolo), di un sensore barometrico, di un sensore di temperatura dell'aria e di un sensore di temperatura dell'acqua. Tutte le stazioni sono dotate di un sistema locale di gestione e memorizzazione dei dati e di un apparato di trasmissione in tempo reale alla sede centrale dell'APAT a Roma. Da quando la nuova Rete Mareografica Nazionale è pienamente operativa, l'APAT mette a disposizione degli utenti informazioni aggiornate relative a serie storiche, osservazioni in tempo reale, previsione

dei dati di marea astronomica, analisi dei dati a fini progettuali e scientifici. I dati mareografici e le costanti di marea locali aggiornate verranno pubblicati su un bollettino annuale. l'APAT ha inoltre provveduto ad effettuare un'operazione di recupero e riorganizzazione dei dati storici della rete preesistente, sia in forma cartacea sia in forma digitale, in modo da poter affiancare alle osservazioni storiche quelle rilevate dalla nuova rete nazionale. Nelle figure sottostanti illustriamo ad esempio la stazione mareografica presente nel sedime portuale di Civitavecchia.



**Figura 3.1: Stazione Mareografica di Civitavecchia**



**Figura 3.2: Componenti della Stazione Mareografica**

## **COMPONENTI DELLA RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE**

### **Stazioni Periferiche**

Le nuove stazioni periferiche acquisiscono le misure dai sensori installati, elaborano i dati rilevati e li memorizzano su memoria locale e su supporto magnetico estraibile. Per svolgere tale attività sono dotate di una stazione di rilevazione automatica e da un set di sensori di misura.

La Stazione Meteorologica Automatica acquisisce i dati dai sensori a intervalli predefinitibili nella fase di configurazione (tramite la tastiera della stazione o direttamente dal “Front-End” di acquisizione). Oltre alle grandezze meteorologiche viene acquisito anche il valore della tensione della batteria.

Conversione Analogico/Digitale: i dati provenienti dai sensori analogici vengono convertiti in grandezze digitali da un convertitore A/D da 14 bit. L’uso di questo tipo di convertitore in luogo dei comuni convertitori da 12 bit consente una maggiore precisione della misura, oltre che una maggiore risoluzione.

Validazione Dati: la validazione dei dati acquisiti viene effettuata dalla Stazione, utilizzando algoritmi dipendenti dalla misura effettuata e dal sensore utilizzato. I dati considerati non validi vengono marcati e viene generato un allarme.

Elaborazione: i dati validi vengono elaborati dalla stazione utilizzando i più comuni algoritmi statistici (valori medi, massimi e minimi giornalieri, etc.). L’intervallo di



elaborazione dei parametri statistici può essere predefinito nella configurazione della stazione, e può essere diverso da sensore a sensore e, per lo stesso sensore, da funzione a funzione.

Memorizzazione: i dati acquisiti ed elaborati vengono memorizzati sia nella memoria RAM che della stazione sia nella Memory Card estraibile; entrambe le memorizzazioni vengono gestite come archivi ciclici: in caso di esaurimento della memoria il dato più recente sostituisce quello più vecchio. La Memory Card garantisce la conservazione dei dati acquisiti dalla stazione in caso di problemi di comunicazione con il Front-End, per periodi molto lunghi, anche in caso di mancanza dell'alimentazione.

Comunicazione con il Front-End: la comunicazione con il Front-End bidirezionale, e può essere gestita dal centro con procedura di chiamata ciclica o estemporanea delle stazioni, oppure direttamente dalle stazioni nei casi in cui sia necessario segnalare condizioni di allarme tecnico (malfunzionamenti) o operativo (superamento di soglie etc.). In caso di problemi nella comunicazione con il Centro i dati vengono memorizzati dalla stazione. Quando viene ristabilita la comunicazione possono essere automaticamente trasmessi tutti i dati memorizzati dall'ultima chiamata andata a buon fine.

Caratteristiche tecniche e dimensionamento delle apparecchiature: tutte le apparecchiature utilizzate sono caratterizzate da input e output standard: tutti i sensori utilizzati sono dotati di uscite standard universalmente riconosciute (4...20 mA, 0...5Vcc, Pt100, RS-232 etc.), la stazione automatica è predisposta all'interfacciamento di numerosissimi sensori con uscita standard e l'interfacciamento di sensori con uscita analogica richiede la semplice riconfigurazione dei valori estremi (tramite tastiera locale), mentre i protocolli di sensori con uscita RS-232 o RS-485 possono essere configurati con semplicità aggiornando il firmware della stazione. Le caratteristiche citate consentono quindi l'intercambiabilità di ogni sensore con altri reperibili in commercio, nonché la completa sostituzione della stazione automatica con un'altra, purché provvista degli stessi ingressi standard. Tutti i sensori proposti sono pienamente conformi alle raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Meteorologia (OMM - WMO).

Stazione SM3840: la stazione è dotata di una porta seriale dedicata all'interfacciamento con dispositivi esterni (terminali di manutenzione o PC portatili), di un orologio-datario con calendario perpetuo e correzione automatica dell'anno bisestile (la precisione nel caso peggiore è dell'ordine di 10 minuti/anno), che può essere sincronizzato direttamente dal



Front-End. In caso di fermate accidentali del sistema la stazione è provvista di un dispositivo di ripristino automatico (*watch-dog*) della funzionalità del software. Ogni volta che il dispositivo entra in funzione la data e l'ora dell'intervento vengono registrate nella memoria della stazione e ritrasmesse al Front-End. La Stazione SM3840 è predisposta all'interfacciamento diretto dei più diffusi sensori meteorologici, indipendentemente dal tipo di uscita elettrica.

Alimentazione: l'unità di alimentazione della stazione è composta da un pannello solare da 50 W e da un regolatore/caricabatterie, che regola la tensione generata dal pannello solare e gestisce la carica della batteria (batteria da 63 Ah).

SENSORI-sensori di Livello: il sensore di livello installato è ad ultrasuoni ed al fine di eliminare eventuali perturbazioni, dovute alla presenza di altri apparati all'interno del pozzetto di calma, il sensore è provvisto di una "guida d'onda" in materiale plastico, che convoglia le onde ultrasonore in un fascio cilindrico. Il sensore è completamente controllato da un microprocessore che gestisce le principali funzioni dello strumento. Prima dell'adozione sull'intera Rete Mareografica Nazionale, la funzionalità del sensore nella specifica applicazione è stata verificata in un lungo periodo di prova effettuato presso la stazione mareografica di Marina di Ravenna, gestita dall'Ufficio Idrografico di Bologna.

Sensori di velocità e direzione vento: la caratteristica più importante di tali sensori è il trasduttore elettro-ottico, che elimina i contatti striscianti di dinamo e potenziometri comunemente utilizzati. Le parti in movimento si riducono quindi al solo elemento sensibile (coppe e banderuola). Il risultato è un notevole aumento dell'affidabilità dei sensori.

Sensore di Temperatura Aria: il sensore utilizza una termoresistenza Pt100 come elemento sensibile. Per evitare problemi legati alla caduta di tensione per effetto dei conduttori il collegamento è effettuato tramite 4 fili. Uno schermo in materiale plastico protegge l'elemento sensibile dalla radiazione solare.

Sensore di Temperatura Acqua: il sensore è di tipo Pt100, il materiale è acciaio inox AISI 316 con grado di protezione IP68. Il sensore è installato all'interno della cabina, calato tramite un cavo d'acciaio con un peso a un'estremità all'interno del pozzetto di calma.

Sensore di Pressione Atmosferica: è un sensore di classe molto elevata, utilizzato nelle applicazioni aeroportuali, che richiedono un'elevatissima precisione nella misura della pressione, necessaria per la taratura degli altimetri. Il sensore è dotato di un circuito di

compensazione che consente di limitare al massimo l'errore in temperatura (minore di 0,45 hPa tra 0 e 40 °C).

Resistenza Ambientale: tutte le parti che compongono la stazione sono in grado di funzionare nei campi di temperatura da -30 °C a +50 °C e di umidità dallo 0 al 100%.

Contenitore per la stazione: l'elettronica della stazione è installata, insieme al sensore di pressione atmosferica e al terminale telefonico, in una cabina in vetroresina con grado di protezione IP-65, munita di serratura a chiave.

Accessori di installazione: i sensori del vento sono installati su un palo anemometrico ribaltabile da 10m. Tale scelta ha i seguenti vantaggi: è un palo autoportante che non richiede controventatura, e quindi è installabile senza problemi nello spazio limitato normalmente disponibile in prossimità delle cabine mareografiche; grazie alla cerniera posta in prossimità della metà del palo la traiettoria di ribaltamento è un cerchio di 5 metri il cui centro posto a 5m di altezza: pertanto lo spazio libero richiesto a livello del terreno può essere molto limitato; la semplicità meccanica rende il palo compatibile con l'aggressività dell'ambiente marino: l'abbattimento richiede il movimento di una sola cerniera che può essere facilmente sbloccata anche in presenza di ossidazione, semplicemente grazie alla massa e al notevole braccio i leva della parte in movimento.

### **CENTRALE**

La Rete Mareografica Nazionale è dotata di una unità centrale per: la configurazione ed il monitoraggio delle stazioni mareografiche interconnesse, l'acquisizione ed la validazione dei dati rilevati, l'archiviazione, l'elaborazione e la rappresentazione dei dati meteomarini registrati.

Configurazione della rete: la configurazione della rete consente la modifica di tutti i parametri caratteristici delle stazioni senza intervento diretto in loco. Ogni modifica nella configurazione della rete o delle stazioni viene memorizzata in un'apposito archivio datato.

Acquisizione: l'acquisizione dei dati dalle stazioni automatiche può avvenire in due modi: tramite linea telefonica commutata e/o GSM oppure tramite la lettura della Memory Card estraibile che equipaggia le stazioni. La trasmissione dei dati può essere avviata come segue:

- tramite una procedura automatica di interrogazione delle stazioni, impostata nella configurazione del Front-End;
- in modo estemporaneo su richiesta dell'operatore che gestisce il Front-End;
- in modo estemporaneo su iniziativa della stazione SM3840, in caso di segnalazione di allarmi tecnici o operativi.

Vengono inoltre trasmessi dalla stazione eventuali messaggi di errore, l'indicazione della tensione delle batterie, l'orario. In ogni momento è possibile visualizzare la situazione del processo di acquisizione; in particolare è possibile per ogni stazione visualizzare la data e l'ora dell'ultima chiamata e analizzare la relativa trasmissione, compresi i segnali di stato e gli eventuali allarmi. Nei casi in cui problemi di comunicazione dovessero rendere impossibile il colloquio con la stazione anche per lunghi periodi, una volta ripristinato il collegamento il software consente l'aggiornamento degli archivi inserendo nel database tutti i dati mancanti.

**RILIEVO TOPOGRAFICO:** ciascuna stazione mareografica è dotata di un riferimento piano-altimetrico in prossimità della porta d'ingresso, facilmente accessibile, ma difficilmente asportabile, tale da poter determinare geometricamente la posizione dello "Ø" idrometrico. Ciascun riferimento è materializzato con un caposaldo le cui caratteristiche sono conformi a quelle indicate dall'Istituto Geografico Militare Italiano. Per ciascun caposaldo è determinata la posizione planimetrica in coordinate Gauss - Boaga e geografiche con allacciamento alla rete trigonometrica istituzionale IGMI e la posizione altimetrica in quota assoluta con allacciamento alla nuova rete altimetrica istituzionale IGMI, posteriore al 1942.

**Inquadramento planimetrico-metodologia:** ciascun caposaldo è stato allacciato alla rete trigonometrica nazionale dell'IGMI, mediante operazioni di inquadramento planimetrico, basate su triangolazioni, trilaterazioni o poligonazioni geodetiche di precisione (tolleranza ), sempre utilizzando la tecnica del centramento forzato dei vertici; in alternativa, dietro specifica autorizzazione della Direzione Lavori e con parere favorevole dell'IGM, la determinazione planimetrica è stata effettuata per rilievo diretto GPS con metodo differenziale statico (tolleranza 5 mm. + 2 ppm x D).

**Allacciamento altimetrico-Metodologia:** il caposaldo in dotazione ad ogni mareografo è stato allacciato alla nuova rete altimetrica nazionale (posteriore al 1942), sul caposaldo IGMI valido pi vicino, mediante operazioni di livellazione geometrica di alta precisione.

La livellazione, appoggiata su linee sicure (strade, banchine, argini ed altri elementi lineari di facile percorribilità e di limitata pendenza), e stata del tipo "dal mezzo", garanzia di massima precisione, dove, per ciascuna misura di dislivello, l'autolivello è stato messo in stazione sempre tra le due mire, equidistante da esse non oltre 40 metri, con incertezza tendente a zero, per cui la distanza tra mire e livello stata misurata accuratamente con nastro metrico mantenuto in posizione perfettamente orizzontale. In ogni battuta, l'autolivello e le due mire si sono trovate in stazione contemporaneamente in quanto non e' ammesso dalle specifiche normative spostare la mira indietro fino a che non si e' eseguita la lettura alla mira avanti. Le misure hanno avuto inizio e fine sempre sui capisaldi e sono state condotte con il metodo della livellazione frazionata, vale a dire, dividendo ogni linea di livellazione in più tratti delimitati da capisaldi intermedi secondari. In ogni tratto, da caposaldo a caposaldo, la misura dei dislivelli è stata ripetuta due volte in andata e due volte in ritorno in maniera indipendente, in giorni e in ore diverse, evitando condizioni di scarsa visibilità (ore calde, presenza di foschia e nebbia), di vento forte e di visuale radente dove il piano orizzontale di visuale tra lo strumento e la lettura alla mira fosse tangente ad ostacoli. La discordanza tra il dislivello misurato in andata e quello misurato in ritorno, su ogni singolo tratto, non è mai stata maggiore della tolleranza , essendo L la lunghezza del tratto espresso in Km.

## SENSORI

### Livello

I sensori (meccanico ed elettronico) di livello della superficie del mare sono stati installati nella cabina mareografica, nell'apposito pozzetto di calma. È stato scelto di installare anche il sensore elettronico all'interno del pozzetto, per le seguenti ragioni:

- maggiore precisione della misura anche senza l'applicazione di filtri software;
- sicurezza di esercizio, essendo il sensore protetto da interferenze esterne (natanti ormeggiati nell'area attiva del sensore, atti di vandalismo ecc.) Qualora il sensore dovesse essere installato all'interno del pozzetto senza particolari accorgimenti la presenza nello stesso pozzetto di dispositivi (galleggiante del mareografo e relativo contrappeso) in movimento potrebbe creare un'interferenza con il fascio di rilevamento ad ultrasuoni, generando una serie di echi spuri tali da rendere impossibile la misura. Per tale motivo il sensore è stato dotato di un tubo che agisce come guida d'onda, obbligando il fascio di ultrasuoni lungo un percorso protetto ed

eliminando quindi qualsiasi interferenza. Il tubo in plastica rigida ha lunghezza pari alla profondità del pozzetto più un tratto, al di sopra del piano di calpestio, che consente di installare il sensore ad altezza conveniente per le prove di verifica e di controllo.

Vento, in accordo con le raccomandazioni dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale i sensori anemometrici (velocità e direzione del vento) sono stati installati su un palo ribaltabile da 10m, in acciaio zincato. I cavi di collegamento sono stati installati all'interno del palo, assicurando quindi la massima protezione.

Temperatura Aria, il sensore di temperatura aria è stato installato su un apposito sostegno ricavato sul palo anemometrico, a un'altezza di 3,5m circa, in luogo dei 2m raccomandati dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale. L'altezza è scelta in modo da rendere il sensore difficilmente raggiungibile da terra, e quindi meno soggetto a furti o atti vandalici. I cavi di collegamento sono stati installati all'interno del palo, assicurando quindi la massima protezione.

Temperatura Acqua, il sensore di temperatura acqua è stato installato nel pozzetto di calma, ad un'altezza di 1m inferiore al livello minimo di marea.

Pressione Atmosferica, il sensore di pressione è stato installato all'interno della cabina mareografica, nel contenitore in vetroresina che protegge la stazione SM3840.

Orologio, è possibile controllare/impostare l'orario in maniera completa (mese, giorno, ora e minuto) e dare conferma al momento opportuno per sincronizzare l'orologio interno. L'unità Centrale ciclicamente controlla la data e l'orario delle stazioni e procede al relativo aggiornamento quando necessario mantenendo traccia dell'avvenimento nel file (log) che memorizza tutte le attività del centro.

Comunicazione con le stazioni, la metodologia con cui le unità centrali colloquiano con le stazioni automatiche prevedono le seguenti principali transazioni:

- spedizione/richiesta della configurazione della stazione
- richiesta su di un intervallo programmabile (da 1 minuto ad un giorno) degli ultimi dati acquisiti dalla stazione (dati correnti ciclici)
- richiesta estemporanea (manuale) degli ultimi dati acquisiti dalla stazione (dati correnti estemporanei)

- richiesta dei dati pregressi contenuti nell'archivio RAM e/o nella memory card della stazione (dati di archivio)
- rifasamento dell'orologio delle stazioni
- ricezione di messaggi di allarme; la stazione può spedire tali messaggi al verificarsi di un allarme.

Centro e periferia possono inviare e memorizzare messaggi introdotti attraverso le rispettive tastiere; questa funzione può risultare molto utile sia per lo scambio di messaggi operativi che, in caso di funzionamento in isofrequenza e quindi senza la possibilità di collegamento vocale, per la comunicazione centrale/stazione durante la fase di manutenzione.

Archiviazione. i dati da archiviare possono avere diversa origine e possono provenire:

- in tempo reale dalle stazioni automatiche: dati correnti raccolti automaticamente dal Front-End agli intervalli prefissati
- dagli archivi RAM e/o Memory Card delle stazioni automatiche: dati degli archivi RAM e/o Memory Card raccolti automaticamente dal Front-End agli intervalli prefissati
- dalle memory card: dati registrati sui moduli di memoria allo stato solido lette nell'apposita interfaccia del Front-End
- da ingresso manuale: dati introdotti direttamente dall'operatore tramite interfaccia grafica di cui si dirà di seguito.

I dati sono archiviati nel database in formato interno compatto contenente per ogni misura:

- riferimenti temporali: data e ora
- riferimento all'intervallo di elaborazione
- riferimento alla stazione
- riferimento al sensore
- riferimento al tipo: corrente ciclico, estemporaneo, di archivio, manuale, da memoria asportabile od elaborato internamente al centro validità.

L'operatore può selezionare un sottoinsieme di dati, fra tutti i dati disponibili provenienti dalle stazioni o calcolati internamente, da archiviare.

Presentazione/modifica dei dati, i dati presentati sul video in forma tabellare o grafica sono aggiornati automaticamente man mano che arrivano dalla periferia o vengono elaborati internamente. Possono essere visualizzate contemporaneamente sul video a colori grafici di funzioni diverse rappresentate in colori diversi; è possibile, puntando col mouse punti delle curve, rappresentare in chiaro in apposito riquadro i valori numerici dei dati e dell'istante corrispondente.

Gestione degli allarmi, il Front-End gestisce sia gli allarmi che vengono segnalati delle stazioni che quelli rilevati internamente. Questi ultimi riguardano:

- superamento di soglie assolute
- superamento di intensità di variazione
- problemi di collegamento con le stazioni o col Centro di Controllo
- problemi dei Front-End stesso e degli altri componenti del centro operativo (stampante, radio ecc.).

Al verificarsi di un allarme di qualsiasi tipo l'unità centrale si comporta nel seguente modo:

- nella rappresentazione sinottica della rete il nodo interessato varia la colorazione;
- segnala immediatamente all'operatore, con apposita finestra, l'allarme: qualsiasi cosa sia rappresentata sul video e stia facendo l'operatore; l'operatore per eliminare la finestra e poter procedere deve riconoscere l'allarme;
- le informazioni relative all'allarme vengono scritte in un file di lunghezza programmabile; il contenuto del file, organizzato cronologicamente, può essere visualizzato in qualsiasi momento con un semplice comando in linea; ogni allarme registrato è completo di:
  - data, ora e minuto di occorrenza
  - indicazione sul riconoscimento o meno da parte dell'operatore
- lo segnala al Centro di Controllo
- quando la variazione delle misure di un sensore supera l'allarme di intensità programmato (ad es. vento), l'intervallo ciclico di chiamata della relativa stazione, se previsto dall'operatore in fase di configurazione, può automaticamente diventare più frequente per controllare più finemente il fenomeno in atto; può passare, ad esempio, da 2 ore ad un'ora o da un'ora a 15 minuti ecc.

- può procedere ad attivazione di comandi (out digitali e/o analogici) sia a livello del centro che della periferia. Controllo di qualità sul livello di riferimento

Il collegamento (*linking*) accurato dei dati osservati ad un riferimento (datum) uno degli aspetti più importanti del controllo di qualità. La procedura posta a base del software prevede l'analisi di controllo di qualità a periodicità mensile. Le coppie di osservazioni, visualizzate su uno “*scatter diagram*” potranno presentare un modello di correlazione di tipo lineare o viceversa. Nel primo caso, una volta eliminate le singole coppie di valori chiaramente "fuori modello" si avvia una procedura di analisi statistica delle due serie il cui risultato principale è il calcolo del livello medio di riferimento. Tale valore, correlato con quello precedentemente calcolato (mese precedente) è da ritenersi accettabile ove esso non presenti uno scostamento superiore a 1.5 cm. Nel caso contrario le osservazioni strumentali acquisite sul periodo saranno soggette a una elaborazione ulteriore (tramite la tecnica dei residui) per tenere conto della accertata instabilità del livello di calibrazione. E' ovvio che ove lo scatter diagram di cui sopra non presenti un pattern lineare, qualsiasi correzione è non applicabile e i dati acquisiti non possono essere considerati validi.

Controllo di qualità sul timing, errori di timing sui dati si producono sia a causa di carenza di precisione in fase di elaborazione sia, più comunemente, a causa di non accuratezza nella manutenzione dei meccanismi dello strumento di acquisizione. Tali errori sono chiaramente identificabili tramite la visualizzazione dei residui del record analizzato e in genere presentano caratteristiche di fluttuazione periodica. L'effetto più diretto di tali errori di timing è riconducibile a una non affidabile previsione di marea. da tenere presente comunque che non è raro il caso in cui fluttuazioni sul record dei residui siano dovute non a problemi di timing ma a effetti non lineari nel record di origine sovrapposti a maree dovute a fiumi o a fondali o geometrie costiere di particolare irregolarità. In questi casi i suddetti effetti non lineari non sono risolti da nessuna tecnica di analisi ed è questo il motivo per cui l'IOC raccomanda una accurata scelta del sito di posizionamento dei sensori di misura. In ogni caso gli errori di timing possono essere accuratamente risolti dal modulo software a questo scopo preposto tramite la tecnica di identificazione visuale della direzione di slittamento in ore. Ci è fatto previa sovrapposizione visuale del record dei residui sul record dei dati osservati. Se i picchi delle fluttuazioni residue sono a sinistra dei picchi sui dati allora questi ultimi sono shiftati in avanti e viceversa. Una volta stimato l'intervallo di shift e la sua direzione il modulo software agisce sulla data di acquisizione delle misure fino a annullare o ridurre al minimo le fluttuazioni periodiche dei residui: a



questo punto il controllo di qualità sul timing può considerarsi effettuato e i dati sono considerati corretti. Correzione degli spikes e copertura di gaps di breve durata. Ovvio che la migliore maniera di coprire i gaps di un record è rimpiazzare le osservazioni mancanti con dati qualitativamente controllati derivati da un sensore di misura ausiliario (cosa per altro giustamente prevista nel capitolato di gara). Ove comunque il sensore ausiliario sia assente o non abbia registrato i dati nello stesso periodo è prevista sul modulo di correzione la possibilità di copertura tramite il cosiddetto "metodo della marea prevista". Tale metodo è applicabile solo avendo a disposizione già almeno un anno di dati osservati e il corrispondente periodo di dati previsti. In questo caso le maree previste sono dal software shiftate nel tempo fino a combaciare con le caratteristiche temporali delle serie osservate per il periodo in cui è presente il gap. I residui fra la previsione shiftata e i dati osservati vengono calcolati e viene effettuata una semplice interpolazione lineare fra i punti estremi del gap nella serie dei residui. Tale tecnica, ormai da tempo validata e accettata scientificamente, deve essere comunque applicata a copertura di brevi periodi di gap e, in ogni caso, non superiori a 24 ore. Per quanto riguarda la presenza di spikes, (singole osservazioni ovviamente errate) essi possono essere direttamente evidenziati a video e corretti con interpolazione lineare o automaticamente identificati tramite calcolo e parimenti corretti.

Formattazione delle informazioni validate, le informazioni di livello marino possono essere formattate secondo le raccomandazioni dell'IOC relative allo scambio di dati a livello internazionale. Ci riferiamo allo STANDARD GF3 SUBSET FOR MEAN SEA LEVEL come predisposto dal PSMSL (UK) e in base al quale sono attualmente archiviate tutte le informazioni relative al livello marino nel centro mondiale di Birkenhead (UK).

La tecnologia trasmissiva utilizzata al momento per la trasmissione dei dati dalle stazioni della rete mareografica alla centrale operativa è la rete GSM di Telecom Italia; inoltre per mostrare l'enorme copertura di tale rete di seguito c'è la mappa della copertura della rete TIM [14], in cui è visibile in rosso le zone coperte.



**Figura 3.3: Copertura GSM di TI**

## 3.2 LA RETE RON

La Rete Ondametrica Nazionale è attiva a partire dal luglio 1989 e originariamente era composta da otto boe direzionali di tipo *pitch-roll*, dislocate al largo delle seguenti città: La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotone, Catania e Mazara. Ogni boa, ancorata su fondali dell'ordine di 100 metri, segue il movimento della superficie dell'acqua e permette di determinare l'altezza e la direzione delle onde; gli strumenti sono dotati di un sistema di localizzazione che utilizza il satellite ARGOS per il controllo continuo della posizione.

Nel 1999 sono state aggiunte alla rete preesistente ulteriori boe a traslazione nelle città di Cetraro ed Ancona ed inoltre è stata sostituita la boa *pitch-roll* di Catania; la Rete Ondametrica Nazionale è quindi configurata ora su dieci stazioni di misura, di cui sette costituite da una boa direzionale Datawell-Wavec (di tipo *pitch-roll*) e tre costituite da una boa direzionale Datawell-Waverider di tipo a traslazione. Le stazioni sono completate da un centro di ricezione ed elaborazione a terra dei dati inviati via radio dalla boa.

La boa Datawell-Wavec segue il movimento della superficie del mare e mediante il sensore Hippy 120 ne misura l'elevazione e le inclinazioni riferite ad una piattaforma inerziale, contenuta all'interno del sensore, che individua il piano di riferimento orizzontale. Per le boe Wavec l'elevazione è ottenuta dalla doppia integrazione dell'accelerazione verticale misurata da un accelerometro montato sulla piattaforma. Le inclinazioni sono ottenute dalla misura del seno degli angoli formati tra gli assi  $x$  e  $y$  del sistema di riferimento solidale con la boa ed il piano di riferimento orizzontale. Un sistema di bussole misura le componenti del campo magnetico lungo gli assi del sistema di riferimento solidale con la boa:  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ . Da tali componenti del campo magnetico e dalle suddette inclinazioni si ricavano: il valore assoluto e l'inclinazione del campo magnetico terrestre, l'orientamento della boa e le due pendenze locali della superficie dell'acqua nelle due direzioni nord-sud ed est-ovest, che consentono di definire la direzione di propagazione delle onde. Abbiamo già detto che la boa Datawell-Waverider misura il moto ondoso mediante il sensore Hippy 40 che è composto da una bussola inerziale misurante le componenti del campo magnetico  $H_x$ ,  $H_y$  lungo gli assi  $x$  e  $y$  del sistema di riferimento solidale con la boa, e la direzione dell'asse  $z$ , perpendicolare a  $x$  e  $y$ . In tal modo la posizione della boa rispetto al sistema fisso di coordinate nord, ovest e verticale è completamente determinato.

I valori misurati: elevazione, inclinazioni,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  per le boe tipo *pitch-roll* ed elevazione e spostamenti in direzione nord e ovest per le boe a traslazione, sono trasmessi, via radio, in continuo dalla boa e vengono ricevuti nella stazione a terra. Il ricevitore fornisce i segnali ricevuti dalla boa in un formato codificato e un apposito computer li decodifica, esegue il controllo sulla qualità dei dati e li pre elabora. I dati vengono acquisiti normalmente per periodi di 30 minuti ogni tre ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative. Dalle tre serie temporali di elevazione, pendenza nord-sud e pendenza est-ovest per le boe Datawell-Wavec e di elevazione, spostamento nord e spostamento ovest per le boe Datawell-Waverider, vengono ottenuti:

- **parametri sintetici:**
  - $H_s$  (metri) altezza d'onda significativa spettrale;
  - $T_p$  (secondi) periodo di picco;
  - $T_m$  (secondi) periodo medio;
  - $D_m$  (gradi N) direzione media di propagazione;

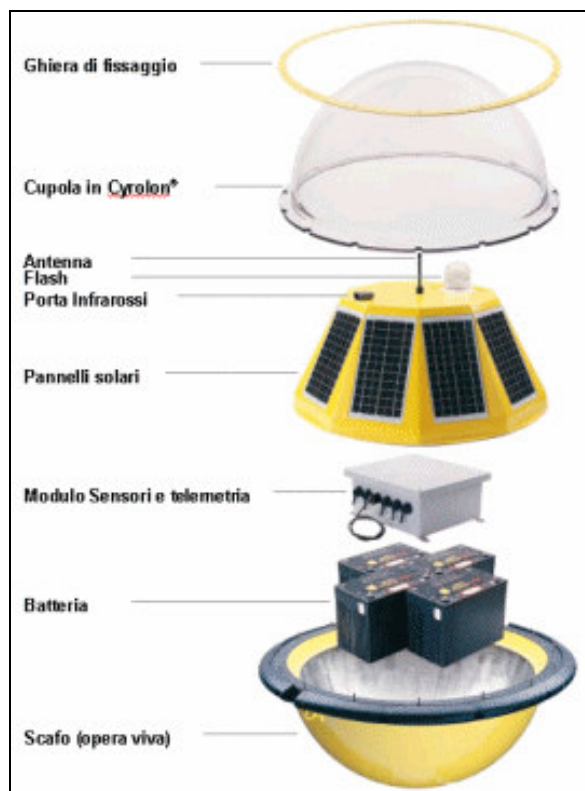
- **parametri spettrali per banda di frequenza:**

- densità di energia;
- direzione media di propagazione;
- dispersione direzionale (*spread*);
- asimmetria (*skewness*);
- curtosi.

Nei casi di mareggiate particolarmente significative, con valori di  $H_s$  superiori a 3.0 m l'acquisizione dei dati avviene automaticamente in continuo e le informazioni sono prodotte ogni mezz'ora. Nella stazione a terra, due calcolatori sono collegati al ricevitore, mediante i quali si acquisiscono i dati grezzi trasmessi dalla boa ed i dati elaborati, e si trasmettono sintesi dei dati al Centro di controllo e gestione della rete presso la Direzione del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale.

Dall'inizio del 2002 gran parte delle modifiche della rete sono state orientate a migliorare l'efficienza generale del sistema, dotando le boe di dispositivi di *data-logging* per recuperare i dati non trasmessi a terra, potenziando sensibilmente i centri locali di ricezione con elaboratori di tipo industriale *Master/Slave* in connessione *multidrop* e telecontrollati, dotando il centro di controllo di un efficiente file system mediante un *cluster* ad alta disponibilità (completamente ridondato) e dotando il sistema di warning per i disormeggi di un sistema automatico di posizionamento GPS con trasmissione satellitare della posizione (via Inmarsat D+). Il numero delle stazioni è stato infine portato a 14, aggiungendo 4 nuove boe posizionate a Capo Linaro (Civitavecchia, Tirreno Centrale), Capo Gallo (Palermo, Sicilia), Punta della Maestra (alto Adriatico) e Capo Comino (Sardegna Orientale). La diffusione dei dati avviene principalmente via Internet, Televideo RAI e Global Telecommunication System. Gli ondometri direzionali impiegati nella RON dal terzo trimestre 2002 sono tutti **TRIAXYS** (immagine sopra), fabbricati dalla ditta canadese Axys Technologies Inc. modificati per rispondere alle particolari esigenze della RON; la rete sarà comunque in grado di poter gestire tutte le differenti tipologie di ondometro impiegate correntemente in Italia.





**Figura 3.4: Componenti di una boa Triaxys**

Il funzionamento ininterrotto della rete ormai da più di dieci anni, con un rendimento complessivo superiore al 92% in termini di dati archiviati, permette di avere a disposizione una gran quantità di dati validi per elaborazioni scientifiche ed ingegneristiche. Presso l'area marittima dell'I.S.P.R.A. (ex-APAT), è operativo il Centro di Elaborazione e Archiviazione Dati, che svolge il servizio di supervisione dello stato della rete, acquisizione di dati sintetici in tempo reale, archiviazione ed elaborazione dei dati storici. Tali attività consistono in particolare nella verifica continua della completa funzionalità dei dispositivi, nell'acquisizione di dati sintetici in tempo reale, nell'archiviazione, elaborazione e distribuzione dei dati. L'area marittima cura direttamente l'elaborazione e produzione dei Bollettini delle Rilevazioni Ondametriche ed in queste pubblicazioni trimestrali vengono riportati:

- il funzionamento dei sistemi di rilevamento;
- i tabulati dei dati elaborati: altezza significativa, periodo di picco e direzione media;
- le elaborazioni grafiche delle serie temporali delle altezze significative;

- le elaborazioni grafiche delle analisi spettrali (quando le altezze significative hanno valori superiori alla soglia prefissata per ogni stazione).

Al Bollettino viene inoltre allegato un floppy disk, contenente i dati in formato ASCII relativi al trimestre considerato.

### 3.3 SVILUPPI INNOVATIVI A BREVE TERMINE

Durante lo studio che abbiamo effettuato sull'attuale scelta implementativa della rete nazionale, abbiamo pensato ad un'innovazione da poter eseguire sulla Rete Mareografica al fine di migliorare alcuni parametri tipici delle reti di telecomunicazioni, quali ad esempio il rate trasmissivo; infatti al momento la RMN utilizza il protocollo GSM che risulta essere abbastanza "obsoleto". Prima però dobbiamo differenziare alcuni concetti definiti dal Codice delle comunicazioni elettroniche.

Il Codice delle comunicazioni elettroniche istituito con il decreto legislativo n.259 del 1° agosto 2003, è il riferimento normativo che disciplina i servizi di comunicazione elettronica per i quali occorre un'autorizzazione generale o una licenza individuale. Le autorizzazioni generali ad uso pubblico si richiedono per Phone center, Internet point, Internet Service Provider, Rivendita Traffico Telefonico, Servizio Fax, Servizio telefonico accessibile al pubblico, Fornitura di reti pubbliche, Servizi satellitari etc.; invece le autorizzazioni generali ad uso privato si richiedono per i servizi svolti esclusivamente nell'interesse proprio dal titolare della relativa autorizzazione generale quali Radioamatori, Ponti Radio, Radiolan,CB, PMR - 446, Autorizzazione per apparecchiature di debole potenza in ausilio alle imprese.

In particolare definisce **rete pubblica di comunicazione**, una rete di comunicazione elettronica utilizzata interamente o prevalentemente per fornire servizi di comunicazione elettronica accessibili al pubblico, e **rete telefonica pubblica** una rete di comunicazione elettronica utilizzata per fornire servizi telefonici accessibili al pubblico (la rete telefonica pubblica consente il trasferimento di comunicazioni vocali e altre forme di comunicazione, quali il facsimile e la trasmissione di dati, tra punti terminali di rete).

L'innovazione migliore per la RMN è di sicuro tramite rete pubblica con il passaggio dalla tecnologia GSM a quella UMTS: tale ipotesi sarebbe supportata dal fatto che qualora non

vi fosse copertura UMTS, allora il sistema commuterebbe automaticamente sul GSM, garantendo la continuità dei dati. Dato che nel centro operativo dell'ente esiste già una componente di accesso alla rete Telecom Italia, allora un'idea possibile potrebbe essere quella di realizzare un APN (*Access Point Name*) dedicato, creando un collegamento tra la rete I.S.P.R.A. e la rete MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) di Telecom Italia (TI). Passare dal protocollo GSM al MPLS porterebbe vantaggi in termini di massima velocità trasmissiva, affidabilità dei dati e continuità.

Per poter accedere alla rete di TI è necessario avere un indirizzo IP (*Internet Protocol*), che può essere statico (ossia rimane sempre lo stesso ed è assegnato all'inizio della connessione fra le due reti) o dinamico (ossia ogni qual volta ci si connette ne verrebbe assegnato uno nuovo, in base alle disponibilità di indirizzi): per tenere un IP statico occorre che l'utente sia sempre attivo o che ad intervalli costanti esegua una qualche operazione per mantenere valido l'indirizzo, mentre con un IP dinamico ciò non serve ma presenta anch'esso dei problemi. Dal centro di controllo dell'ISPRA è possibile al momento interrogare le singole stazioni mareografiche, però per far questo la stazione (prima di inviare i propri dati) deve riconoscere l'utente e ciò avviene tramite l'indirizzo IP, che per causa forze maggiori dovrà essere statico; quindi nonostante un IP dinamico consumerebbe (come energia) sicuramente di meno, dobbiamo preferire quello statico per non poter perdere la possibilità di interrogare le stazioni.

Al momento se venisse perseguita tale idea, consigliamo il seguente modulo come rapporto servizi/consumo.

#### Caratteristiche dell 'eventuale modulo UMTS da Telecom Italia: **Wireless Modules HC25**

Siemens Wireless Modules permette di compiere un passo avanti significativo per i dispositivi mobili terminali portatili industriali, dispositivi di intrattenimento, routers, gateways e molto altro ancora. Il modulo HSDPA a 3.6 Mbit/s offre Tri-Band UMTS, Quad-Band GSM, un driver RIL/NDIS/USB, pieno supporto alle funzionalità voce e dati ed un montaggio robusto. Questo assicura un breve time-to-market ed uno sviluppo efficiente in termini di costo. HC25 supporta sia la funzionalità Quad-Band GSM/GPRS/EDGE, che Tri-Band UMTS/HSDPA, permettendo al modulo di coprire tutte le frequenze usate a livello mondiale. Per essere in grado di sviluppare soluzioni di comunicazione innovative, HC25 si presenta con un totale supporto alle funzioni voce e dati. Ciò permette di usare diverse modalità voce — cellulare, cuffie auricolari e vivavoce — e di usare voce e dati allo stesso tempo. Le caratteristiche principali di HC25:

- HSDPA 3.6 Mbit/s;
- Tri-band HSDPA/UMTS: 850/1900/2100 MHz;
- Quad-band GSM/GPRS/EDGE: 850/900/1800/1900 MHz;
- NDIS/USB driver per dispositivi basati su Microsoft© Windows XP;
- RIL/NDIS/USB driver per dispositivi basati su Microsoft©;
- Windows™ Mobile™ 5.0 e le seguenti versioni;
- Totale supporto di funzionalità voce e dati;
- USB 2.0 full speed.



## **4. LE CARATTERISTICHE DELLO TSUNAMI NEL MEDITERRANEO**

### **4.1 INTRODUZIONE**

Fino ad ora abbiamo descritto realtà che sono già esistenti o che verranno realizzate nel breve termine, mentre l'obiettivo principale della tesi è di realizzare il progetto di un *Warning System* per tsunami all'interno del bacino del Mar Mediterraneo e per riuscire in tale proposito abbiamo analizzato le più recenti pubblicazioni sull'argomento sia dal punto di vista geofisico sia da quello tecnologico. A tal fine, è risultato necessario indagare quali fossero le caratteristiche principali di un sistema di warning system in termini di estensione territoriale del sistema di monitoraggio: abbiamo identificato da un lato le zone del nostro paese che sarebbero soggette ad un tale fenomeno e dall'altro gli scenari che potrebbero generare tsunami potenzialmente pericolosi per le nostre coste.

A tal fine, si sono cercate nella letteratura scientifica informazioni riguardanti le seguenti tematiche:

- le caratteristiche di generazione degli tsunami potenzialmente dannosi per le coste italiane;
- le zone di origine degli tsunami che potrebbero raggiungere le coste italiane;
- il grado di rischio associato ad ogni scenario delineato.

Nei paragrafi seguenti daremo una breve descrizione del fenomeno stesso, per poi soffermarci sulla delimitazione delle aree di interesse del sistema di monitoraggio.

### **4.2 DESCRIZIONE DEL FENOMENO**

Uno tsunami è costituito da una serie di onde oceaniche generate solitamente (ma non solo) da terremoti il cui epicentro si trova sul fondale marino o nelle immediate vicinanze e che, dopo aver percorso anche migliaia di chilometri attraversando interi oceani, si abbattono come giganteschi muri d'acqua sulle coste, distruggendo tutto ciò che incontrano sul loro cammino. Il termine è di origine giapponese che può essere tradotto letteralmente come

"onda del porto", indicando i terribili effetti che questo evento provoca sulle regioni costiere sulle quali si abbatte [16]. Nel passato, talvolta, il termine è stato tradotto con "onde di marea", ma tale traduzione è fuorviante; infatti è certamente vero che la situazione di alta o bassa marea, presente nel momento in cui uno tsunami colpisce, può influenzare notevolmente la sua azione, ma si tratta di due fenomeni fisici ben distinti e assolutamente non correlati. Il verificarsi delle maree, inoltre, è un evento completamente prevedibile in quanto dipende dall'azione gravitazionale del nostro satellite, mentre uno tsunami ha un carattere quasi completamente aleatorio. A differenza di quanto si verifica per le maree, lo sviluppo di uno tsunami è caratterizzato da un tempo di preavviso molto limitato, e questo non fa che aumentare notevolmente la pericolosità della sua azione. Un altro termine (impiegato soprattutto nella comunità scientifica) con il quale ci si riferiva a questo fenomeno era quello di "onda sismica marina", ma anch'esso non è completamente corretto poiché quella sismica è solamente una delle possibili origini. Anche la traduzione con il termine italiano di "maremoto" è, per analogo motivo, parzialmente fuorviante, come suggerisce l'etimologia stessa del termine che richiama espressamente ad un fenomeno di natura sismica. L'origine di uno tsunami non va, dunque, ricercata solamente in fenomeni sismici: in generale si può affermare che qualunque causa in grado di perturbare verticalmente una colonna d'acqua sufficientemente grande movendola dalla sua posizione di equilibrio è in grado di originare uno tsunami; dunque, anche se molto spesso uno tsunami può essere causato dalla combinazione di molteplici fattori, possono a pieno titolo diventare causa di tsunami:

- movimenti tettonici sottomarini;
- forti terremoti (90-95% dei casi) con epicentro nel bacino acquatico o in prossimità ad esso;
- frane sottomarine;
- eruzioni vulcaniche sottomarine;
- frane di superficie (terra e rocce) in prossimità del bacino acquatico;
- caduta di grandi blocchi di ghiaccio;
- esplosioni sottomarine di origine varie.

A queste cause di origine terrestre ne va aggiunta anche una esterna, costituita dal possibile impatto con oggetti cosmici. Proprio per evitare le possibili inesattezze legate ai diversi

termini impiegati per indicare il fenomeno è stato deciso, nel corso di un convegno scientifico internazionale tenutosi nel 1963, di introdurre la parola giapponese "tsunami" quale denominazione ufficiale. Uno tsunami è profondamente differente dal comune moto ondoso: nel classico moto ondoso le onde sono caratterizzate da un periodo (intervallo di tempo tra due onde successive) solitamente di 5-20 secondi e da una lunghezza d'onda (distanza tra due creste successive) di circa 100-200 metri; le onde di uno tsunami, invece, hanno un periodo dell'ordine di un'ora e una lunghezza d'onda che può raggiungere anche il valore di alcune centinaia di km.

I parametri fisici che distinguono maggiormente le onde di uno tsunami (chiamate anche "*shallow-water waves*", ossia onde d'acqua bassa, in quanto la loro lunghezza d'onda è di gran lunga maggiore della profondità dell'acqua in cui si sviluppano) sono la loro modesta ampiezza (altezza rispetto al piano medio della superficie marina) e l'elevata velocità con la quale si propagano in mare aperto: la velocità  $v$  di propagazione delle "*shallow-water waves*" è data dalla formula:

$$v = \sqrt{g * d}$$

in cui  $d$  è la profondità dell'acqua in quel punto e  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $9.8 \text{ m/sec}^2$ ). Un semplice calcolo, impiegando questa formula, ci permette di trovare che, per esempio, in un oceano caratterizzato da una profondità di 4000 metri (quale può essere l'Oceano Pacifico) un'onda di tsunami si può propagare alla velocità di oltre 710 km/ora; infatti è importante ricordare che questa è la velocità che le caratterizza in "mare aperto" ossia per grandi profondità, mentre con l'avvicinarsi alla costa e con la conseguente diminuzione della profondità stessa le velocità tipiche sono dell'ordine dei 30-60 Km/h: bisogna sottolineare che una persona al massimo delle potenzialità può correre a circa 30 Km/h solo per distanze molto brevi e questo evidenzia l'importanza della realizzazione di un *Warning System*, che dia la possibilità di prevedere tali fenomeni per poter così fornire un "accettabile" anticipo a tutti coloro che si trovano coinvolti in un tale evento. Il secondo aspetto, che caratterizza tali onde, è la loro ridotta ampiezza il cui valore è tipicamente dell'ordine di un metro: questa particolarità le rende praticamente "invisibili" per qualsiasi imbarcazione che le incrocia in mare aperto. L'estrema pericolosità di questo fenomeno può essere meglio compresa introducendo alcune considerazioni riguardanti l'energia trasportata dal moto ondoso: il tasso di perdita di energia di un'onda è strettamente correlato all'inverso della sua lunghezza d'onda e questo comporta che la propagazione di

un'onda di tsunami avvenga con piccolissime dispersioni, dunque il treno d'onde può percorrere lunghissime distanze mantenendo praticamente inalterato il suo carico energetico. Per tale motivo infatti lo tsunami viene considerato l'esempio naturale di un'onda solitonica: in telecomunicazioni il solitone, soprattutto in campo ottico, viene indicato come una possibile soluzione dell'equazione non lineare di Schrödinger (derivante dalle equazioni differenziali di Maxwell per la propagazione delle onde), noto come SOLITONE FONDAMENTALE:

$$\Psi(\zeta; \tau) = \text{sech}(\tau) * e^{j\zeta/2}$$

con  $\text{sech}(\tau) = 1/\cosh(\tau) = 2/(e^{\tau} + e^{-\tau})$

che permette un risultato particolare per cui un'onda può propagarsi in un mezzo mantenendo inalterata una funzione di ampiezza d'onda e frequenza; infatti l'argomento della secante iperbolica mostra l'indipendenza dalla distanza, mentre il termine esponenziale indica la variazione di fase. Le due caratteristiche d'onda sono dipendenti (in particolare inversamente correlate), l'onda muta aspetto subendo un'attenuazione/amplificazione a seconda del mezzo di propagazione, ma può sempre riprendere l'aspetto del segnale di partenza se viene a propagarsi in un mezzo analogo. L'onda può quindi percorrere un numero teoricamente infinito di chilometri senza dissipazioni. Questa conservazione dell'onda significa sia assenza di perdite di energia sia assenza di perdite di informazione, ed ha evidenti implicazioni tecniche sia per le trasmissioni energetiche (nessuna perdita di rendimento nella rete per effetto Joule) sia informatiche.

È proprio l'elevatissimo contenuto energetico delle onde e l'ineluttabilità della legge di conservazione dell'energia che trasformano queste onde da piccoli e quasi impercettibili movimenti della superficie marina in mare aperto a gigantesche calamità naturali nel momento in cui si abbattono violentemente sulle coste. Avvicinandosi alle coste diminuisce la profondità del mare e dunque anche la velocità delle onde si riduce, ma questo comporta che, dovendo per necessità fisica rimanere costante l'energia, debba aumentare l'ampiezza del moto ondoso, cioè l'altezza delle onde. La massima altezza cui può giungere un'onda di tsunami viene indicata con il termine inglese di "*run-up*" ed il suo valore è mediamente circa dieci volte maggiore dell'altezza dell'onda che lo ha originato, ma è evidente che tutto ciò è legato all'andamento del profilo batimetrico.

Altri aspetti fondamentali da tenere in considerazione nel limitare gli effetti devastanti di uno tsunami, sono la morfologia della costa e la configurazione del terreno (liscio o rugoso, ricco o privo di alberi), elementi in grado di rallentare o meno l'impeto dell'acqua che tende ad addentrarsi nella terraferma anche per centinaia di metri. Vi è anche la possibilità che uno tsunami non si manifesti subito come la classica gigantesca onda che si abbatte sulla costa, ma come un improvviso fenomeno di bassa marea, un repentino ritirarsi delle acque fino a lasciare scoperto il fondale marino per decine di metri prima che, una dopo l'altra, le numerose ondate che costituiscono lo tsunami si abbattano con gigantesca violenza ed elevata velocità. L'entità finale dell'evento è, evidentemente, legata in modo molto stretto all'energia trasmessa all'oceano dall'evento scatenante: nel caso di terremoto, ad esempio, sarà la sua magnitudo a determinare l'ampiezza iniziale del moto ondoso, ma hanno la loro importanza anche altre caratteristiche quali la rapidità delle deformazioni del fondo marino, il profilo batimetrico e la profondità del mare nella zona dell'epicentro. Nella figura viene illustrato in modo schematico il fenomeno dello tsunami: un'onda di tsunami proveniente dal mare aperto si avvicina alla costa, si innesca il fenomeno del *run-up* ed una montagna d'acqua si abbatte violentemente sulla regione costiera.

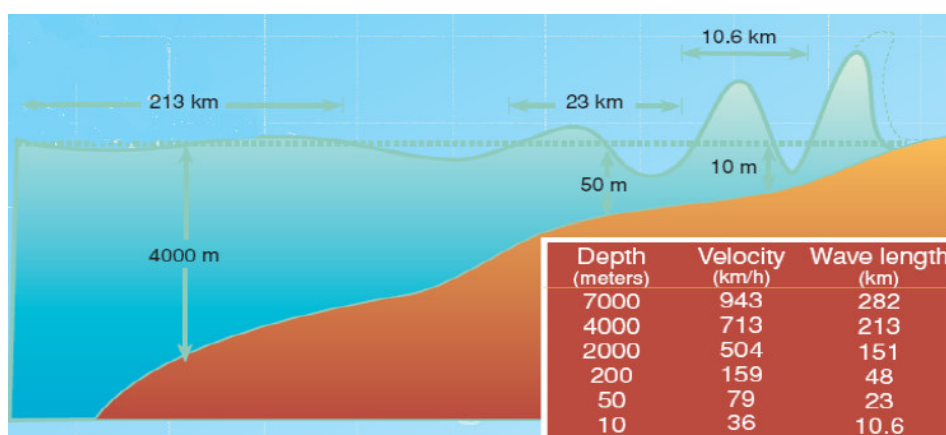


**Figura 4.1: Illustrazione del fenomeno dello tsunami**

### **4.3 TSUNAMI (MAREMOTO)**

La grande maggioranza dei maremoti è costituita da eventi piccolissimi, tanto da non poter essere nemmeno rilevati, i quali nel mondo scientifico internazionale sono noti con il nome di Tsunami: un maremoto è generato da una perturbazione di tipo impulsivo, o in ogni caso molto breve rispetto ai periodi caratteristici del maremoto stesso (dell'ordine di centinaia o migliaia di secondi), che coinvolge una considerevole massa d'acqua e nella maggioranza

dei casi, tale perturbazione risulta essere un evento sismico, ovvero un terremoto. Per questa ragione le onde di maremoto vengono indicate a volte con il termine “*seismic sea wave*”. In realtà anche questo appellativo risulta incorretto (o riduttivo) per descrivere la totalità del fenomeno, poiché numerosi eventi hanno evidenziato come il maremoto possa avere anche origini completamente diverse. Tuttavia resta l'evento sismico, sottomarino o nell'entroterra a pochi chilometri dalla costa, il principale produttore di maremoto e, tra l'altro, va detto che gli tsunami non generati da terremoti sono soggetti ad una più rapida dissipazione e, dunque, molto raramente riescono a raggiungere coste lontane dalla zona di generazione. L'onda di tsunami si forma quando la massa d'acqua, praticamente incompressibile, investita dalla perturbazione sismica, tende a ritornare verso l'iniziale posizione di equilibrio per effetto della forza di gravità. E' dunque la forza di gravità che, fungendo da forza di richiamo, dà effettivamente origine all'onda (che talora è detta appunto “*gravitational wave*”). Di conseguenza si può pensare allo tsunami come ad un fenomeno originato da energia che oscilla alternativamente tra le due forme di energia cinetica e di energia potenziale gravitazionale. E' evidente allora come l'entità di un maremoto sia strettamente correlata alla profondità  $H$  dell'oceano o del mare in cui viene generato: tanto più grande è lo spessore  $H$  dello strato d'acqua in prossimità della sorgente, tanto maggiore sarà la massa d'acqua spostata dall'equilibrio e, quindi, tanto maggiore sarà l'ampiezza massima dell'onda. Le dimensioni delle onde di maremoto possono essere davvero enormi e raggiungere negli oceani ampiezze di alcuni metri; ampiezze che dopo un tragitto anche di migliaia di chilometri, arrivate in prossimità della costa, aumentano di un fattore che varia da 2 a 10, quando avviene lo *shoaling*, termine con cui si indica specificatamente la progressiva crescita dell'onda all'avvicinarsi alla terraferma. Approssimandosi alla costa, a causa dell'assottigliamento dello strato liquido in cui si propaga, che causa una diminuzione della velocità dell'onda, lo tsunami viene ad occupare un volume d'acqua sempre minore. In rispetto del principio di conservazione dell'energia ed in conseguenza dell'incompressibilità dell'acqua, l'energia trasportata dallo tsunami viene progressivamente ridistribuita, facendo aumentare l'ampiezza dell'onda [6].



**Figura 4.2: Variazione dell'onda dello tsunami**

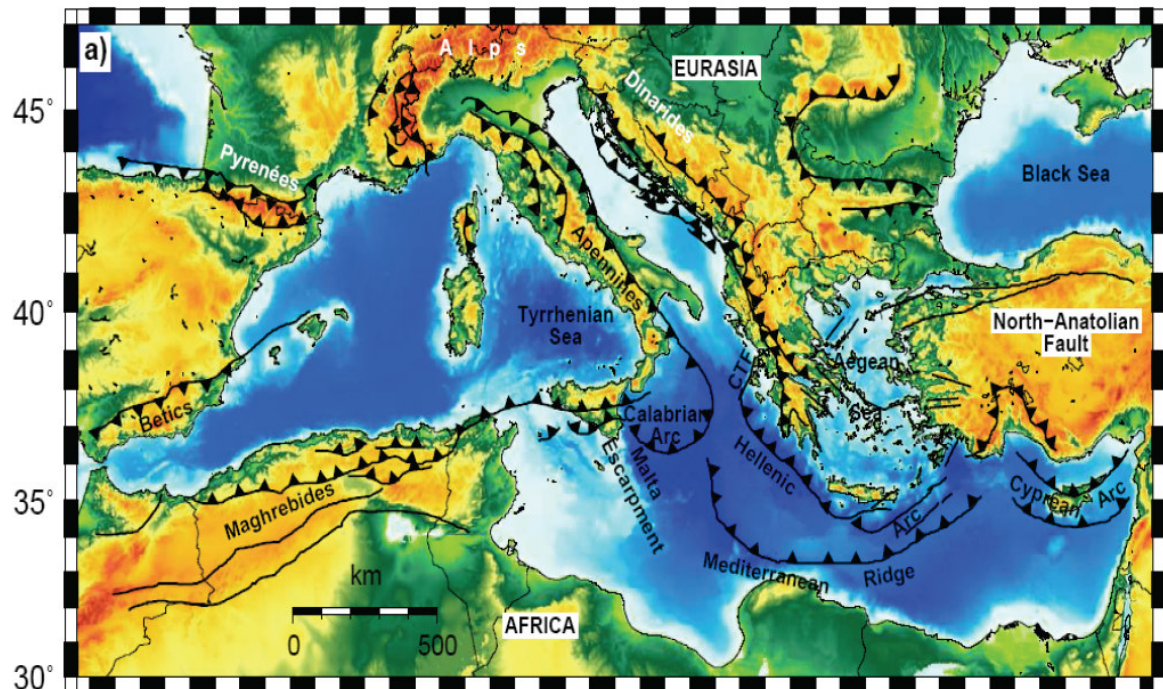
In tale contesto il maremoto è causato dai displacements del fondale marino (soprattutto variazioni verticali, perché quelle orizzontali sono inefficaci a generare tsunami [7]) a causa di un terremoto in grado di rilasciare una quantità di energia paragonabile al consumo mensile di energia di un'intera nazione e/o continente (in funzione della sua magnitudo). Il legame tra terremoto e tsunami è molto stretto, anche se non vi è una corrispondenza diretta e certa fra la magnitudo del fenomeno sismico e la generazione dello tsunami (come mostra la tabella sottostante), però si può affermare che al di sopra di una certa magnitudo, è molto probabile che si generi uno tsunami; inoltre dimostra l'importanza fondamentale della realizzazione di un Warning System che sia affidabile, accurato e continuo.

Date	Location	Magnitude	Early Warning?	Fatalities
26 Dec 2004	Sumatra	9.2	No	Tsunami death~230,000
28 Mar 2005	Nias Island	8.7	Panic evacuation	Evacuation killed ~100
19 July 2005	North California	7.7	False alarm	No tsunami
27 Jan 2006	Benda Sea	7.6	?	No tsunami
3 May 2006	Tonga	8.0	False Alarm	No tsunami
19 July 2006	South Java	7.7	No	Tsunami death~730
15 Nov 2006	Kuril Islands	8.3	False alarm/alert	Small tsunami
13 Jan 2007	Kuril Islands	8.1	False alarm/alert	No tsunami
1 Apr 2007	Solomon Island	8.0	No	Tsunami death~54
15 Aug 2007	Central Peru	8.0	Alert	No tsunami
12 Sep 2007	South Sumatra	8.4	Alert	No tsunami

**Tabella 4.1: La magnitudo non determina lo tsunami**



Come dimostra un articolo pubblicato sul *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* [1], uno stesso terremoto, inteso come uguaglianza di parametri fisici che lo contraddistinguono (come ad esempio magnitudo, momento sismico, zona di origine del terremoto, *slip rate*), può generare effetti completamente diversi e quindi anche tsunami di differente entità e tipologia. Dato che i fondali marini sono caratterizzati da una notevole attività sismica, che si concentra lungo le faglie, si evidenzia l'importanza di analizzare fenomeni quali tsunami derivanti da terremoti sottomarini ed in particolare quelli del Mediterraneo, in cui le faglie si trovano vicino alle coste riducendo così gli ipotetici tempi di allertamento, come mostra la figura sottostante; inoltre possiamo notare come il bacino del Mediterraneo sia caratterizzato dalla presenza di molteplici faglie.



**Figura 4.3: Faglie nel Mar Mediterraneo**

Prima di provare a classificare le varie magnitudo dei terremoti, è opportuno richiamare alcuni parametri chiave dei terremoti per questo studio.



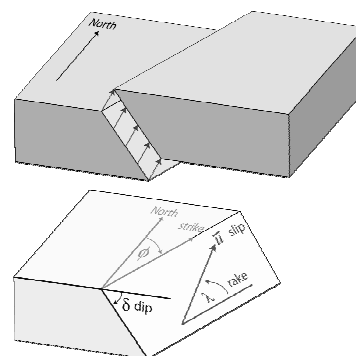
## 4.4 PARAMETRI GEOFISICI DEL TERREMOTO

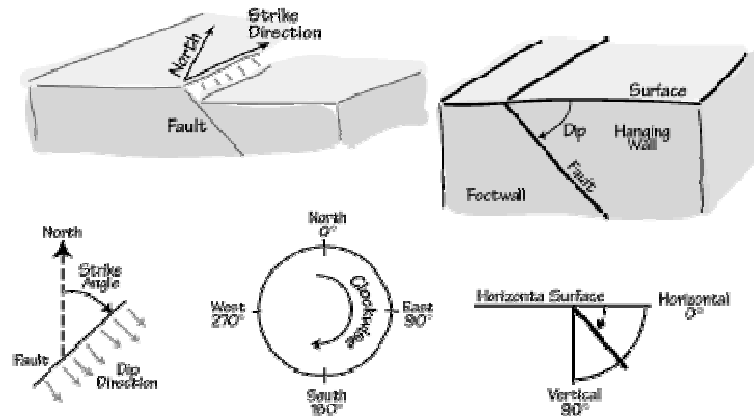
Ogni qual volta si verifica un movimento tra i margini di una faglia, si ha un accumulo di energia elastica (sotto forma di tensioni tangenziali) nella roccia che costituisce i margini e quando le tensioni raggiungono la massima resistenza della roccia, essa si rompe e l'energia accumulata viene rilasciata. L'effetto della frattura dipende dalle proprietà meccaniche della roccia lungo la faglia: se la roccia è duttile, l'energia accumulata sarà esigua e verrà rilasciata sotto forma di movimento lento, asismico; invece nel caso di roccia fragile, la frattura sarà repentina e l'energia si rilascerà come in un'esplosione, in parte sotto forma di calore e in parte sotto forma di onde di tensione (Terremoto). Ne segue che, se sono note la rigidità della roccia, la lunghezza della faglia e la velocità con la quale i margini si muovono tra loro, è possibile, in linea di principio, calcolare il tempo nel quale si accumulerà l'energia corrispondente alla condizione di frattura e la probabile magnitudo associata all'evento sismico che avrà luogo a seguito della frattura. Dall'osservazione comparata dei movimenti di faglia e dell'attività sismica storica lungo la faglia è possibile individuare zone di gap sismico, queste, secondo la teoria del rimbalzo elastico, sono quelle dove è più probabile che si verifichi un terremoto. Individuare il meccanismo focale di un evento sismico equivale a definire i caratteri geometrici della frattura in termini di:

**Strike:** è l'angolo che rappresenta l'orientamento di una faglia ed è valutato in senso orario a partire dal nord;

**Dip:** è l'angolo che rappresenta la pendenza del piano di faglia rispetto ad un piano orizzontale posto in corrispondenza della superficie terrestre;

**Rake:** è la direzione nella quale si muove il tetto della faglia e si valuta in relazione allo strike ( $-180^\circ + 180^\circ$ ). Un rake  $>0$  indica una faglia inversa mentre uno  $<0$  indica una faglia normale.





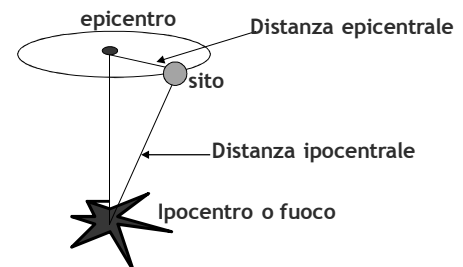
**Figura 4.4: Parametri di un terremoto**

Nel fenomeno del terremoto possiamo identificare tre tipologie diverse di onde sismiche:

- le onde P (onde longitudinali o di compressione) che fanno oscillare la roccia avanti e indietro nella stessa direzione di propagazione dell'onda, generando quindi "compressioni" e "rarefazioni" successive nel materiale in cui si propagano (nella crosta terrestre tali onde viaggiano a una velocità che può raggiungere anche i 10 km al secondo);
- le onde S (onde di taglio o trasversali) che muovono la roccia perpendicolarmente alla loro direzione di propagazione e che sono più lente delle onde P, viaggiando nella crosta terrestre con una velocità fra 2,3 e 4,6 km/s (tali onde non possono propagarsi attraverso i fluidi perché non oppongono resistenza al taglio);
- le onde superficiali che si manifestano solo ad una certa distanza dall'epicentro e che . Tali onde sono il frutto del combinarsi delle onde P e delle onde S, sono perciò molto complesse. Le onde superficiali sono quelle che provocano i maggiori danni.

La localizzazione preliminare di un terremoto equivale ad identificare la posizione del suo epicentro, che si basa sulla differenza tra i tempi di arrivo in diverse stazioni, che hanno registrato l'evento, delle onde P ed S; la differenza di tempo dipende dalla differente velocità delle onde P ed S e dalla distanza tra

il sismometro e l'epicentro: 
$$d = \frac{\Delta t_{p-s}}{\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p}}$$



Nella roccia del substrato la velocità delle onde P è compresa tra 3 e 8 km/s, mentre quella delle onde S varia tra 2 e 5 km/s: valutando tale distanza per almeno tre stazioni sismometriche è possibile individuare, approssimativamente, la zona epicentrale. Altro parametro fondamentale è il **momento sismico** di un terremoto, tramite il quale è possibile valutare l'energia associata ad un evento sismico:

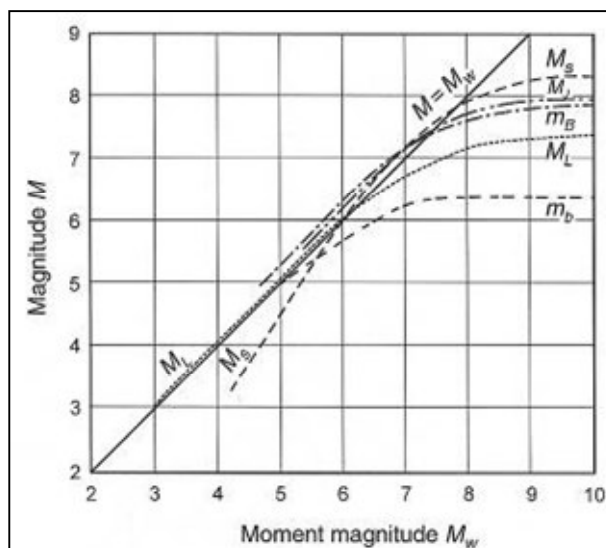
$$M_0 = \mu * A * D$$

dove  $\mu$  rappresenta la resistenza della roccia lungo la frattura,  $A$  l'area interessata dalla frattura e  $D$  rappresenta il valor medio dello scorrimento lungo la frattura. Più che un momento delle forze, il momento sismico invece può essere correlato con la quantità di energia rilasciata durante un terremoto: esso viene quantificato attraverso l'analisi dei sismogrammi in bassa frequenza.

Esistono diverse formule empiriche che legano il Momento sismico alla magnitudo di un terremoto, ma l'unica scala che non risente dell'effetto saturazione è la "Magnitudo Momento" (Hanks & Kanomori, 1979) che si basa sulla valutazione del momento sismico, che a sua volta è una quantità direttamente legata ai fattori che influenzano la fase di rottura:

$$M_w = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.7$$

L'effetto saturazione è indicato dall'appiattirsi delle altre scale di magnitudo, in corrispondenza di terremoti di grossa entità, come mostrato dalla figura sottostante, in cui  $M_L$  è la magnitudo locale Richter (quella più diffusa),  $M_S$  magnitudo delle onde di superficie,  $m_b$  e  $m_B$  magnitudo di breve e lungo periodo delle onde di volume,  $M_J$  magnitudo della *Japan Meteorological Agency* (JMA) e  $M_W$  magnitudo di momento sismico (preferita dai sismologi).



**Figura 4.5: Magnitudo calcolata con diversi metodi**

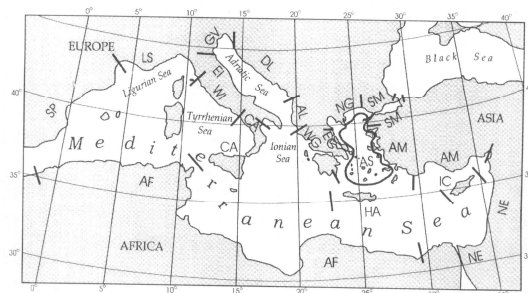
Questi parametri geofisici sono importanti, perché sono utilizzabili per un'ipotetica classificazione di casi di rischio.

## 4.5 MAREMOTI NEL MARE DEL MEDITERRANEO

Come mostra la **Figura 4.3** il bacino del Mar Mediterraneo è una zona densa di faglie che sono causa dell'origine dei terremoti e poteva essere sufficiente tale immagine a giustificare la necessità e la fantasia di realizzare un warning system per tsunami nel mediterraneo, però abbiamo ritenuto importante dedicare questo paragrafo per spiegare che ci sono già stati casi in passato; infatti quando si parla di tsunami si pensa di solito che siano calamità naturali esclusive di alcuni scenari presenti solo negli oceani, mentre tale eventi sono già accaduti in passato anche nel Mar Mediterraneo. Come si evince dal libro *"Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C. – 2000 A.D."* il bacino del mediterraneo è stato spesso sede di queste calamità naturali, oltre ad essere caratterizzato dal passaggio di molteplici varietà di faglie (*"reversed fault"*, *"shear fault"* e *"normal fault"*), che rendono questa zona particolarmente a rischio. Bisogna però da subito specificare una differenza fra tsunami che avvengono nel Mediterraneo e quelli dell'Oceano Pacifico: l'altezza dell'onda nel Mediterraneo decresce molto più velocemente con la distanza rispetto a quella oceanica; infatti, Papazachos ha stimato un fattore di attenuazione pari a  $r^{2,4}$ , che è dovuto alla rapida attenuazione dei sismi stessi: la profondità focale di un terremoto, che avviene

nel Mar Mediterraneo, è relativamente piccola e per questo motivo gli effetti che esso genera decadono molto più velocemente con la distanza rispetto ad un caso analogo avvenuto nell'oceano. Inoltre, anche in termini di massima altezza d'onda raggiungibile, esiste una sostanziale differenza tra onde di uno tsunami generatosi nell'oceano e quelle di uno generatosi nel mar mediterraneo; tale differenza è dovuta al divario esistente fra le profondità dei rispettivi fondali, che vincolano l'altezza d'onda come abbiamo visto nel paragrafo 4.3.

Da quanto abbiamo appreso durante la lettura di diverse pubblicazioni e testi scientifici [7], le prime informazioni riscontrabili sugli tsunami risalgono a partire dagli antichi greci, che rappresentò un primo tentativo di studiare e dare una spiegazione di tale fenomeno, ma l'inizio di studi scientifici moderni risalgono a dopo il 1956, anno in cui ci fu un devastante tsunami nel Mare Egeo con origine nello stretto tra le isole di Amorgos e Astypalaia davanti alla Grecia; inoltre ad incrementare l'interesse nella valutazione del rischio da tsunami, ci fu il bisogno di garantire sicurezza alle stazioni di energia nucleare lungo le coste. In realtà identificare lo tsunami e la sua origine può essere molto complicato a tal punto che frequentemente le onde che esso genera vengono considerate “*abnormal long waves*”, onde che sono osservate regolarmente in alcune zone costiere che si affacciano sugli oceani; queste onde in effetti hanno caratteristiche del tutto simili alle tipiche onde degli tsunami, in termini di periodo, distanze e modalità di distruzione nell'istante in cui raggiungono le coste, tanto che Defant nel 1961 le indicò con il termine di “*meteorological tsunamis*”: distinguere le due tipologie di onde non è affatto semplice, tanto che in alcuni studi accanto al termine tsunami si possono trovare [7] termini aggiuntivi, che identificano la maggiore e/o minore certezza dell'origine del fenomeno, specialmente quando si fa riferimento a periodi antichi. Le descrizioni che abbiamo a disposizione su questi eventi e/o simili avvenuti nel Mar Mediterraneo sono circa trecento e possono essere classificate almeno da un punto di vista visivo in funzione delle zone in cui sono avvenuti, come mostra la figura sopra.



Due tsunami possono essere considerati casi esemplari avvenuti in periodi temporali molto diversi fra loro: il primo è quello che distrusse Creta all'incirca nel 1400 a.c., il secondo quello avvenuto nel 1908 e che colpì Messina; nella maggior parte dei casi si può

ipotizzare che vi sia un terremoto all'origine dello tsunami, mentre nel Mare Egeo molto spesso sono stati causati da eruzioni vulcaniche, quale ad esempio l'eruzione del vulcano di Santorini sull'isola di Thira che avvenne approssimativamente nel 1400 a.c. e che fu accompagnato da un forte terremoto e da un enorme tsunami, che causò la distruzione di Creta e la scomparsa della civiltà minoica.

## 4.6 DELIMITAZIONE DELLE AREE DI INTERESSE

Come si evince dal libro “*Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C. – 2000 A.D.*”, il bacino del Mediterraneo è sede di una molteplicità di “*fault zones*”, dalle quali si possono generare terremoti dando così origine ad una varietà di potenziali tsunami; infatti uno studio più approfondito dovrebbe avere come obiettivo l'analisi di ognuna di queste faglie presenti nel Mediterraneo, mentre in questa tesi sono state analizzate solo tre zone di tutte quelle potenziali [2], indicate in rosso nella figura sottostante.

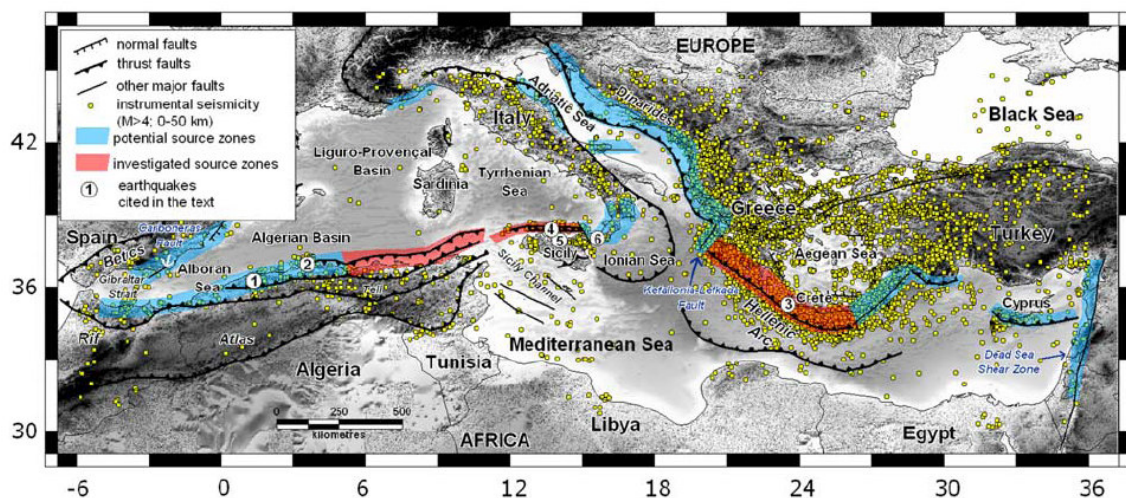


Figura 4.6: Delimitazione delle aree di interesse

La procedura utilizzata per analizzare queste tre zone (“*Southern Tyrrhenian thrust belt*”, “*Tell-Atlas thrust belt*”, “*western Hellenic Arc*”) è sintetizzata dalla pseudo-codice sottostante e prevede il calcolo del “massimo terremoto credibile” che si può generare e lo studio della geometria e della cinematica per ogni “*Typical Fault*” (andando a definire parametri quali ad esempio  $M_w$ , *rake*, *dip*, *length*, *width*, *depth*, *slip*); in seguito definite si calcolano i possibili tsunami generabili, ottenuti resolvendo le equazioni non lineari di

propagazione dell'acqua superficiale risolte mediante un metodo alle differenze finite. Per ogni simulazione, ossia per ogni zona di origine dello tsunami che viene analizzata, vengono ottenuti i valori delle massime elevazioni dell'acqua, le mappe di propagazione delle onde e le relative altezze d'onda nel momento in cui arrivano alla costa, da cui si evince l'enorme variabilità del fenomeno in base alla zona di origine; infatti dai risultati emersi dall'articolo "*Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea: Scenarios of potential threats to Southern Italy*" l'onda più alta, che si avrebbe nel caso di tsunami da una delle tre zone analizzate, è quella generata dal "*western Hellenic Arc*", che arriva fino a 5 metri. Una "*Source Zone*" (SZ) può essere vista come la zona da cui si può originare un enorme terremoto, ma anche come l'unione di tanti più piccoli segmenti ognuno dei quali è in grado di rilasciare un terremoto ed è per questo che ad ogni SZ è stato associato un "*Maximum Credible Earthquake*" (MCE) ed un "*Typical Fault*" (TF), in sintesi la procedura può essere rappresentata con il seguente pseudo-codice.

```
define SOURCE ZONES
choose COASTLINES
```

```
for each SOURCE ZONE
define MAX CREDIBLE EARTHQUAKE and TYPICAL FAULT ( $M_w$ , rake, dip, length, width, depth, slip)
define SIMULATION PARAMETERS (domain size, spatial resolution, time step)
place VIRTUAL TIDE-GAUGES
```

```
for each TYPICAL FAULT
move TYPICAL FAULT along the SOURCE ZONE at L or L/2 steps
and define discrete TSUNAMIGENIC SOURCES (lat,lon, strike)
calculate HMAXs, TRAVEL TIMES, MARIGRAMS
at VIRTUAL TIDE-GAUGES
```

```
End
```

```
for each COASTLINE
Calculate MAXIMUM of HMAXs, AVERAGE of
HMAXs, STANDARD DEVIATION of HMAXs
```

```
End
```

```
End
```

Da questo codice notiamo che in tale articolo sono state adoperate anche delle tide-gauges virtuali per monitorare l'altezza d'onda e per poter valutare i tempi di arrivo; in particolare tramite queste simulazioni si possono cercare di confrontare diversi scenari fra di loro, cercando di classificare le tre zone in base alla pericolosità dello tsunami che potrebbero generare. Per valutare il MCE tipico di una zona, sono stati consultati diversi cataloghi tra cui il "*ISC On-line Bulletin*" disponibile al sito [www.isc.ac.uk](http://www.isc.ac.uk) da cui sono stati ottenuti i dati dei terremoti avvenuti e per ogni zona il terremoto con magnitudo più grande è stato



assunto come MCE; invece per identificare la geometria del *fault* sono stati utilizzati dati provenienti dalle mappe geologiche, dalle *cross-sections*, dati geodetici ed inoltre è stata utilizzata la relazione empirica di *Wells and Coppersmith* del 1994. Nella simulazione effettuata le onde dello tsunami vengono considerate come lunghe onde gravitazionali dell'acqua superficiale, perché la loro lunghezza è di solito molto più grande della profondità del mare e nel nostro specifico caso sono state utilizzate le seguenti equazioni differenziali non lineari per la propagazione delle onde sull'acqua superficiale, dove  $z$  è l'elevazione dell'acqua al di sopra del livello del mare,  $h$  è la profondità dell'acqua in un oceano immobile,  $v$  è il vettore velocità orizzontale alla profondità media,  $g$  è l'accelerazione gravitazionale,  $C$  è la forza di Coriolis e  $F$  rappresenta le “*fiction Forces*”.

$$\frac{\delta(z+h)}{\delta t} + \nabla \cdot [v(z+h)] = 0$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + (v \cdot \nabla)v = -g \nabla z + C + F$$

Inoltre impostando le condizioni al contorno, in modo tale che la componente perpendicolare alla costa della velocità sia nulla, avremo che tutta l'energia cinetica dello tsunami viene convertita in potenziale sulla costa e per la trasmissione completa delle onde  $v \cdot n = (\frac{g}{c})z$  viene assunta la condizione di mare aperto, dove  $c = \sqrt{g \cdot h}$  è la celerità dell'onda ed  $n$  è il vettore unitario normale al bordo e diretto verso l'esterno; effettuando le simulazioni si sono calcolate e/o scelte le seguenti informazioni:

- i valori massimi assunti dall'altezza dell'acqua (HMAX) raggiunti durante la propagazione dello tsunami;
- i tempi di attraversamento delle onde degli tsunami, scegliendo le prime onde arrivate con ampiezza positiva (wave crest) ad ogni “grid node”;
- l'evoluzione temporale dell'altezza dell'acqua (mareogramma) in alcune località costiere;
- i porti scelti, per calcolare i mareogrammi, ed i siti costieri densamente popolati che sono stati scelti come posizione delle virtuali stazioni “tide-gauge”.

Infine per ognuna delle tre SZ si sono calcolati il massimo assoluto, la media e la deviazione standard di tutti i valori di  $H_{MAX}$  lungo le coste; ora vediamo i risultati ottenuti

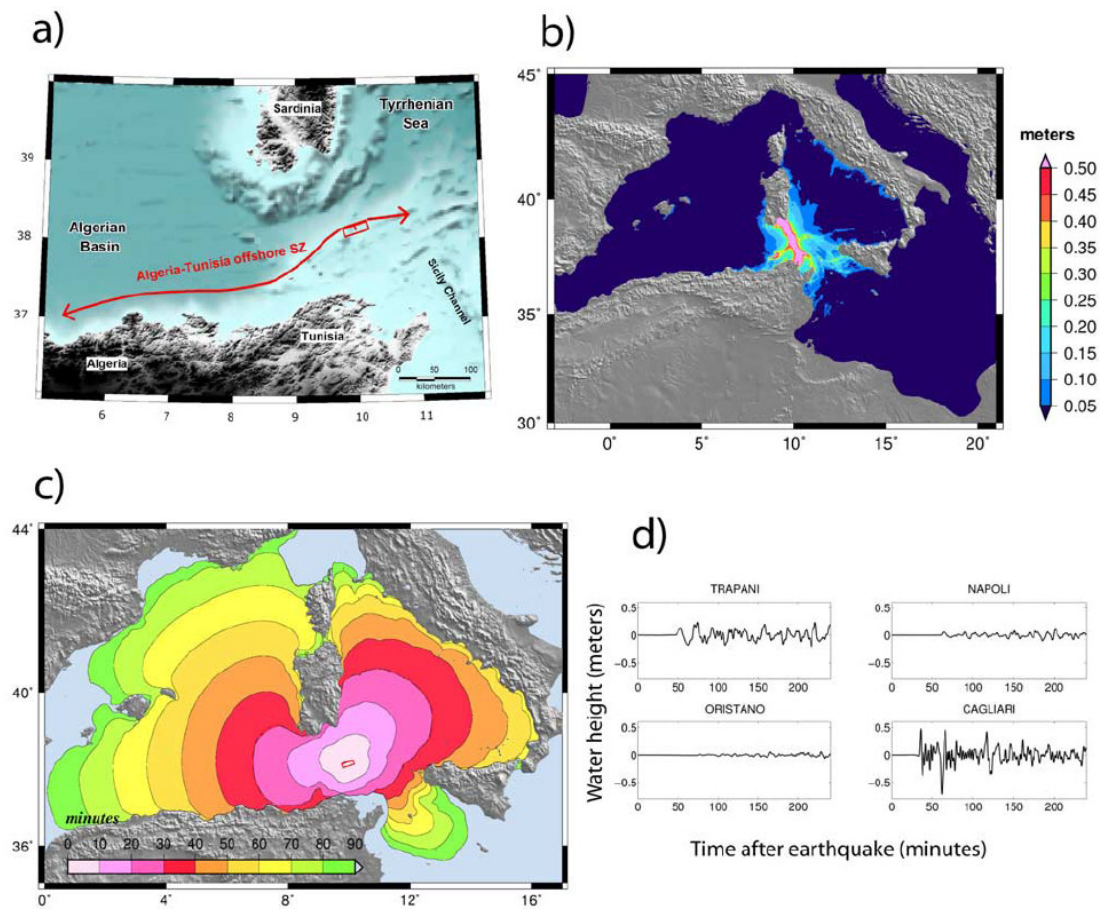


dall'analisi delle tre SZ, in cui in ognuna le diverse figure mostrano le seguenti informazioni:

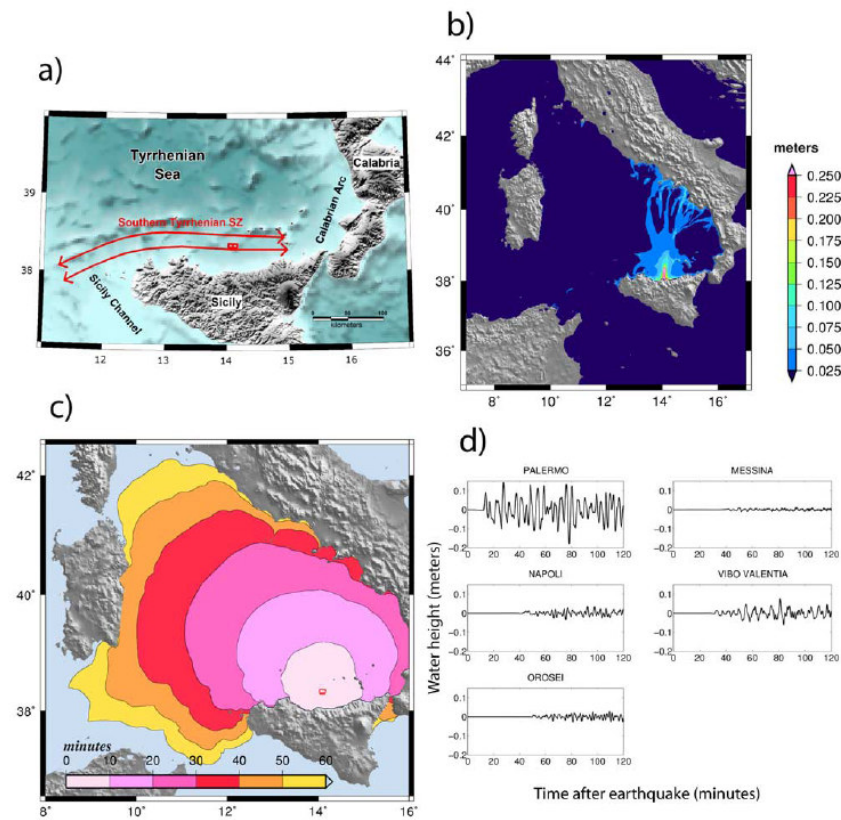
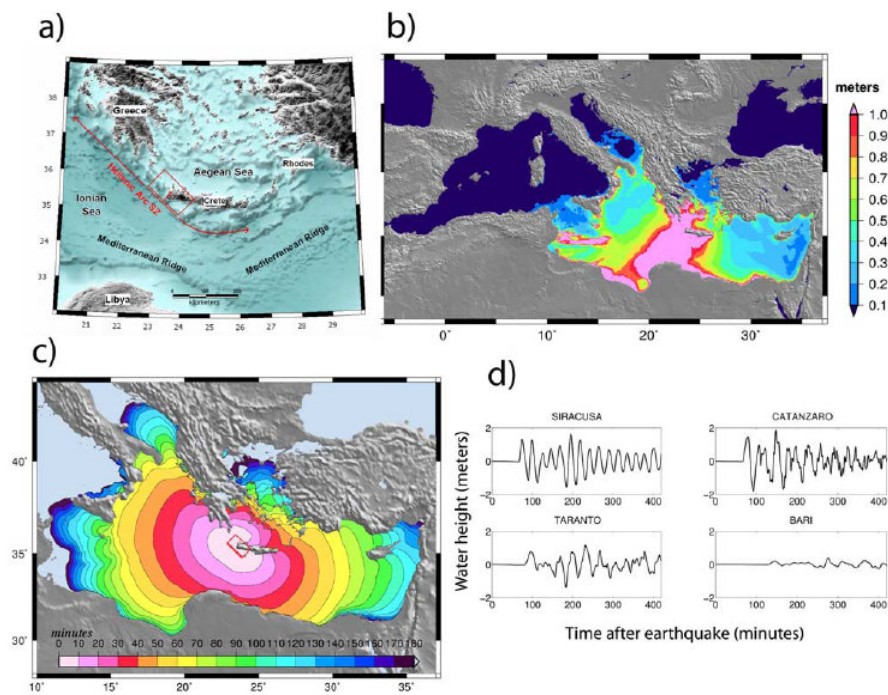
- la mappa della SZ in cui la doppia freccia indica la direzione di propagazione del percorso del TF;
- la mappa della massima altezza d'onda dello tsunami generato nella simulazione dalla TF;
- la mappa dei tempi di propagazione dello tsunami ad intervalli di 10 minuti;
- mareogrammi ottenuti dalle *virtual tide gauges*.

### **Prima SZ: Algeria-Tunisia**

Le figure seguenti mostrano i risultati ottenuti con queste assunzioni [2] per tsunami che provengono dalla SZ nota come “*Tell-Atlas thrust system*”.



**Figura 4.7: Caratteristiche di uno tsunami nella SZ Algeria-Tunisia**

**Seconda SZ: Sud Tirreno****Figura 4.8: Caratteristiche di uno tsunami nella SZ Sud Tirreno****Terza SZ: Arco ellenico****Figura 4.9: Caratteristiche di uno tsunami nella SZ Arco ellenico**

Facendo una comparazione fra le tre casistiche si può notare che in termini di altezze dell'onda dello tsunami le SZ Algeria-Tunisia e Sud Tirreno affliggono la costa della Sicilia in un modo simile, generando solo in qualche punto della costa nord della Sicilia altezze dell'ordine di 0.5 metri; invece da un punto di vista esclusivamente temporale, è chiaro che dalla SZ Algeria-Tunisia i tempi sono molto più lunghi di quelli della SZ Sud Tirreno (nel caso di TF abbiamo valori dell'ordine dei 40-50 minuti nel primo caso contro i 10 minuti del secondo). Contrariamente a questi primi due casi la SZ dell'arco ellenico potrebbe colpire più pesantemente tutta la costa est della Sicilia e la Calabria: l'altezza prevista è generalmente più alta di 1 metro con picchi oltre i 3 metri in diverse località e con tempi di arrivo che variano fra i 50 e 90 minuti a seconda dell'esatta posizione della sorgente; inoltre la stessa SZ è in grado di generare nelle coste sullo Ionio e sull'Adriatico onde fino a 5 metri con tempi di arrivo dell'ordine 60-100 minuti. Le coste del Sud Italia che si affacciano sul Mar Tirreno sono ben protette da un eventuale tsunami generato dall'arco ellenico, mentre sono esposti a quello generato dalla SZ Algeria-Tunisia con tempi di arrivo dell'ordine di mezz'ora o poco più; invece gli effetti dello tsunami generato dalla SZ dell'arco ellenico sulle coste della Sardegna sono molto più duri di quelli che si otterrebbero dalla SZ del Sud Tirreno, ma questi effetti avrebbero luogo ore dopo l'origine dell'evento.

Dalla lettura dell'articolo scientifico [2] possiamo trarre delle conclusioni finali, che ci sono molto utili nello scopo di questa tesi, che abbiamo detto essere il progetto di un Warning System per tsunami nel mediterraneo; infatti non solo ci sono già stati casi passati, ma l'intero bacino è attraversato da faglie che rendono abbastanza probabile l'evento di uno tsunami. Poiché il sistema di monitoraggio deve essenzialmente difendere le coste italiane, ci soffermiamo a ragionare ciò che è emerso dalle tre SZ. In particolare possiamo dire che nel caso si verifichi uno tsunami, i tempi che avremmo a disposizione per elaborare i dati provenienti dal sistema ed intraprendere delle azioni, quali ad esempio piani di evacuazione, sono chiaramente molto variabili in funzione della zona da cui ha origine il fenomeno; infatti in termini temporali, il caso peggiore sarebbe quello della SZ del Sud Tirreno poiché le onde arriverebbero sulla costa siciliana entro e non oltre i **10-20 minuti**, mentre raggiungerebbero le coste tirreniche e la Sardegna non prima di **30-40 minuti**. Dato inoltre che l'altezze d'onda sono relativamente basse, possiamo dedurre che questa SZ non è di certo il caso più pericoloso per le coste italiane. Per la SZ Algeria-Tunisia le coste italiane non verrebbero raggiunte prima dei **30 minuti**, mentre se lo

tsunami si originasse dalla SZ dell'arco ellenico avremmo a disposizione un tempo minimo di **40 minuti**. Anche se i tempi caratteristici di propagazione ci inducono a pensare che l'arco ellenico sia il caso migliore, in realtà date le altezze delle onde risulta essere il caso maggiormente pericoloso per le coste italiane; quindi, nel momento in cui studieremo il progetto di un sistema di monitoraggio ed allertamento, ci dovremo domandare quale sia la finalità da raggiungere, perché se vogliamo garantirci la protezione da ogni eventualità, allora il sistema dovrà essere in grado di prevedere uno tsunami indipendentemente dalla SZ, mentre se invece dovremo venire incontro a vincoli economici tanto da non poter implementare tutte le componenti, allora il caso peggiore per le nostre coste sarebbe lo tsunami proveniente dall'arco ellenico.

Da quanto emerso dall'articolo [2] è importante avere un sistema di rilevamento, che sia in grado di prevedere in anticipo tali eventi e per riuscire in tale proposito dovrà avere tempi di elaborazione enormemente brevi (nonostante i tempi caratteristici siano abbastanza elevati dobbiamo considerare che quell'intervallo temporale ci occorre soprattutto per intraprendere tutte le azioni possibili una volta che lo tsunami è stato rilevato), un'elevata accuratezza e precisione (onde evitare falsi allarmi, che sono molto dannosi in termini economici e pericolosi in termini di vite umane), continuità e una percentuale di errore molto bassa. Vedremo nel capitolo 5 infatti che accanto alla tecnica di rilevamento, è opportuno affiancare altri dispositivi che possono dare conferma e/o smentita in tempo, qualora la tecnica abbia commesso un errore.

## 5. TECNOLOGIE PER UN SISTEMA DI ALLERTA DAL RISCHIO TSUNAMI

### 5.1 INTRODUZIONE

Le tecnologie da poter utilizzare per creare un *Warning System* possono essere diverse sia per la tecnologia utilizzata sia per lo scopo ultimo per cui viene realizzato il sistema; infatti è importante sottolineare che le specifiche tecniche che il sistema deve soddisfare sono in funzione della tipologia del servizio che esso eroga: se il sistema deve fornire esclusivamente il monitoraggio dei dati meteomarinari o al massimo fornire una sintesi dei displacements che avvengono in una determinata zona, allora può essere sufficiente continuare ad adoperare le reti attualmente esistenti, ma se l'obiettivo è quello di prevedere eventi che possono essere catastrofici, allora è indispensabile che il sistema funzioni nel modo migliore possibile. Questo significa che il sistema dovrà essere supportato dalle migliori tecnologie disponibili per raggiungere livelli di accuratezza e precisione molto elevati, tenendo in considerazione però sempre il rapporto qualità/prezzo.

Dalla documentazione tecnica studiata ([1] e [3]) vengono di seguito riportate due tecniche diverse di cui una, chiamata “**Rapid Determination**”, viene utilizzata nella maggioranza dei casi di studio, mentre l'altra “**GPS-Shield Arrays**” risulta essere maggiormente innovativa; infatti questa differenza è data dal fatto che mentre per la prima tecnica è possibile utilizzare, come vedremo nel paragrafo 5.3, delle strutture già esistenti o implementarne delle nuove in maniera graduale (aspetto modulare), invece la seconda tecnica prevede l'utilizzo di apparecchiature molto specifiche che devono essere acquistate almeno in una configurazione minima.

È opportuno richiamare in sintesi il *Global Positioning System* (GPS) ossia la tecnologia alla base in entrambe le due tecniche.

### 5.2 I SISTEMI GPS E GLONASS

Il sistema di navigazione **GPS** (*Global Positioning System*), noto anche con il nome di Navstar, fu concepito dal Ministero della Difesa statunitense come mezzo universale per



determinare con ottima precisione il punto esatto in cui un ricevitore si trova sulla terra e per ottenere un'indicazione oraria molto precisa. Le applicazioni del sistema GPS non sono limitate al campo militare, ma sono disponibili a tutti anche per uso civile. La disponibilità del segnale GPS 24 ore su 24 in ogni angolo del globo e la progressiva riduzione dei costi dei ricevitori hanno trasformato il sistema GPS addirittura in un fenomeno di massa, soprattutto nel settore della navigazione marina, dove ormai un ricevitore GPS portatile è presente anche nel più piccolo gozzo che solca i nostri mari. Sebbene le applicazioni marine siano quelle più visibili a tutti, ne sono possibili molte altre, soprattutto nel settore automobilistico e in quello delle telecomunicazioni. La conoscenza della posizione esatta di un veicolo è il primo passo fondamentale per realizzare sistemi di allarme e gestione flotte molto sofisticati, nonché una serie di prodotti di ausilio alla guida, generalmente realizzati accoppiando un ricevitore GPS a un sistema di elaborazione di carte stradali digitalizzate e consultate in tempo reale dal guidatore; invece nel nostro caso ciò che più ci interessa è proprio l'accuratezza della stima della posizione poiché fondamentale per il calcolo degli spostamenti. Il sistema GPS si compone di tre parti: il segmento spaziale, il centro di controllo e i ricevitori. La costellazione di 24 satelliti, prevede 21 satelliti operativi e tre satelliti di scorta pronti a intervenire in caso di guasto. I satelliti sono posti in un'orbita circolare a circa 20.200 km dalla terra e compiono una rivoluzione in 12 ore ripassando sullo stesso punto, visto da un osservatore terrestre, ogni 24 ore circa. I piani orbitali su cui ruotano i satelliti sono sei, spazati tra loro di 60° e inclinati di circa 55° rispetto al piano equatoriale. In ogni punto della terra è sempre possibile "vedere" tra cinque e otto satelliti. Ciascuno dei satelliti GPS in orbita trasmette in continuazione due portanti a radiofrequenza. La portante L1 (1575,42 MHz) trasporta il segnale per la localizzazione grossolana ("*coarse acquisition*") e il segnale di tempo, la portante L2 (1227,60 MHz) trasporta il segnale per la localizzazione di precisione. Le due portanti sono modulate in fase utilizzando tre diversi codici, quello detto C/A, che serve per la localizzazione grossolana, quello detto P, che serve per la localizzazione precisa e quello che trasporta i dati della navigazione, cioè quei bit che descrivono l'orbita del satellite, le correzioni al suo segnale di clock e altri parametri di sistema. La portante L1 viene modulata con un clock a 10,23 MHz da un segnale utile alla localizzazione precisa (codice P) e da un segnale a 1,023 MHz utile per la localizzazione grossolana (codice C/A). A ciascuno dei due segnali modulanti binari vengono sommati modulo-2 i dati per la navigazione emessi a 50 bps. Tali dati per la navigazione, che vengono comandati dal centro di controllo terreno del sistema GPS, comprendono il segnale di clock del satellite,

la sue correzioni rispetto al tempo universale UTC (*Universal Time Coordinate*), le effemeridi dei satelliti e vari segnali di stato. Ogni satellite ha un codice di modulazione univoco, ortogonale a quello degli altri satelliti, così che il ricevitore possa discernere i vari segnali trasmessi sulla stessa frequenza da tutti i satelliti, che lavorano con una modalità di accesso a divisione di codice (CDMA) a spettro disperso (*spread spectrum*). L'utilizzo del segnale C/A è libero per tutti, mentre l'utilizzo del codice P è limitato ai soggetti autorizzati dal Governo degli Stati Uniti. I ricevitori commerciali sono pertanto costruiti per ricevere solamente il segnale L1 e decodificare il codice C/A, mentre i ricevitori per uso militare ricevono entrambi i segnali L1 ed L2 e possono decodificare sia il codice C/A, sia il codice P. In passato il Governo statunitense ha intenzionalmente degradato la precisione ottenibile utilizzando il codice C/A, per cui le applicazioni civili non potevano sfruttare appieno tutta la precisione teoricamente ottenibile dal sistema GPS. Recentemente tale restrizione, indicata anche con la sigla SA (*Selective Availability*) è stata parzialmente rimossa, per cui in futuro si dovrebbero poter costruire ricevitori per uso civile capaci di sfruttare appieno tutte le potenzialità del sistema GPS per ottenere una localizzazione più precisa. In realtà, mediante tecniche differenziali e una serie di stazioni terrene anche con le apparecchiature civili si possono ottenere delle precisioni di localizzazione più elevate di quelle garantite dalla ricezione del solo codice C/A. Il centro di controllo del sistema GPS si trova nei pressi di Colorado Spring ed ha il compito di eseguire tutte le misure necessarie per "correggere" le informazioni inviate dai satelliti GPS. La stazione di controllo comunica ai vari satelliti i dati di correzione, i quali a loro volta li inseriscono nei dati di navigazione che diffondono continuamente ai ricevitori posti a terra. Un ricevitore GPS determina la sua posizione istantanea misurando le distanze (*range*) dalla sua antenna ai satelliti visibili in quel momento, dei quali è nota la posizione nello spazio. Intersecando geometricamente le misure di distanza effettuate contemporaneamente dal ricevitore su più satelliti si ottiene la longitudine e la latitudine in cui si trova il ricevitore stesso, oltre che un'informazione temporale riferita al clock del sistema GPS. Da un punto di vista teorico, la triangolazione geometrica garantisce che per conoscere la propria località basterebbero tre misure di distanza rispetto a tre oggetti noti (tre satelliti). Conoscendo tre distanze da tre punti noti si identificano in realtà due punti nello spazio tridimensionale, dati dall'intersezione di tre sfere il cui raggio è pari alla distanza misurata tra ricevitore e punto di riferimento. Dei due punti uno in genere è evidentemente errato e può essere facilmente scartato; si pensi per esempio a una nave, se uno dei due punti della soluzione trigonometrica ha un'altezza di chilometri rispetto alla superficie terrestre, è immediato

notare che rappresenta una falsa soluzione. Comunque, per ovviare a una delle maggiori incertezze delle misure, per ricavare la propria posizione è indispensabile eseguire quattro misure indipendenti anziché tre, per introdurre anche la variabile tempo in un sistema di quattro equazioni e quattro incognite che, risolto, produce la propria localizzazione con la minima incertezza garantita dal sistema. Per misurare la distanza istantanea da un satellite, il ricevitore GPS calcola il tempo che occorre al segnale per viaggiare dal satellite all'antenna del ricevitore. Il codice temporale emesso dal satellite è confrontato con l'identico codice generato dal ricevitore. Lo scostamento di fase del codice generato dal ricevitore viene fatto variare per ottenere la massima correlazione con il segnale ricevuto dal satellite. Lo scostamento temporale tra i due segnali, moltiplicato per la velocità della luce, produce la distanza apparente tra antenna del ricevitore e satellite. Il sistema funziona bene poiché tutti gli orologi che intervengono nel sistema GPS sono sincronizzati tra loro. In ogni satellite sono montati quattro orologi atomici che periodicamente vengono ulteriormente sincronizzati dal centro di controllo per stabilire la massima stabilità. Per quanto riguarda il ricevitore che ovviamente non può disporre di un orologio atomico per ragioni di costo, ciò che importa è la stabilità del clock nel breve periodo e non la precisione assoluta, eseguendo il calcolo della localizzazione partendo da quattro misure (anziché le tre necessarie teoricamente) si elimina l'imprecisione dovuta a uno scostamento costante del clock del ricevitore. La misura di distanza così ricavata è affetta da diversi errori, dovuti agli effetti atmosferici sulla velocità di propagazione del segnale, alle imprecisioni dei segnali di clock dei satelliti e ad altri effetti secondari. Per tale ragione, la distanza misurata viene chiamata nel gergo GPS "pseudo distanza" o "*pseudorange*". Avendo a disposizione quattro pseudo distanze misurate contemporaneamente su quattro satelliti diversi, il ricevitore è in grado di risolvere un sistema a quattro incognite e ricavare longitudine, latitudine, altezza da terra e tempo assoluto in cui si trova. La precisione normale che si ottiene nelle misure civili con ricevitori economici è di circa 100 m nella direzione orizzontale, di circa 150 m in quella verticale e di circa 340 ns in quella temporale. Se il ricevitore è in grado di vedere più di quattro satelliti contemporaneamente, è possibile sfruttare algoritmi matematici di correzione degli errori che aumentano la precisione ottenibile. Un ricevitore GPS da solo ha una precisione orizzontale di 20 metri per il 95% del tempo. Le principali cause di errore sono solitamente l'imperfezione delle orbite dei satelliti, l'errore degli orologi dei satelliti e gli effetti della ionosfera sul segnale. La precisione intrinseca del sistema GPS è così alta che gli Stati Uniti decisero di proibire l'uso di tutte le sue potenzialità a chi non fosse espressamente autorizzato (procedimento



noto come *Selective Availability* (SA) che concede precisioni orizzontali entro 100 metri reali per il 95% del tempo). Gli autorizzati che invece hanno accesso al codice PPS (*Precise Positioning System*), che invece non è degradato dalla SA, godono della precisione intrinseca del sistema che è pari a circa 20 metri. Per minimizzare gli effetti della disponibilità selettiva e degli altri errori, gli utenti e i governi di vari paesi si sono affidati alle stazioni di riferimento differenziali, che calcolano e trasmettono ai ricevitori in zona le correzioni da apportare ai loro dati. Sono state installate in molte aree una serie di stazioni radio fisse, prevalentemente costiere, che emettono il segnale utile alle misure differenziali.

### D-GPS

Il GPS differenziale (D-GPS) richiede l'uso di almeno 2 ricevitori GPS, uno posizionato stabilmente in località fissa (con coordinate note) e l'altro mobile, da usare normalmente in una generica posizione. Se i due ricevitori non sono troppo lontani l'uno dall'altro, essi si troveranno più o meno nelle stesse condizioni atmosferiche, vedranno gli stessi satelliti e riceveranno gli stessi segnali. Entrambi, quindi, potranno effettuare i consueti calcoli sulla base dei segnali ricevuti e determinare la propria posizione, "inquinata" dall'errore E. Se consideriamo in prima approssimazione che questo errore E sia uguale per entrambi i ricevitori, possiamo sfruttare questa circostanza per correggere l'errore del secondo ricevitore; infatti, la posizione data dal GPS del ricevitore fisso è pari alle coordinate "reali" più l'errore E (ricordando che le coordinate del GPS fisso sono note). Quindi, effettuando la sottrazione tra la posizione del GPS mobile e quella del GPS fisso, si ottiene proprio l'errore E; a questo punto, se il GPS fisso invia l'errore all'altro GPS, quest'ultimo potrà calcolare la propria posizione con esattezza (sottraendo alla posizione calcolata l'errore ricevuto). Questo schema serve a compensare gli errori naturali del sistema: non si tratta quindi di un trucco illegale per "pirati", ma di un intelligente metodo generale per migliorare la precisione del GPS, tanto che oggi è ufficialmente sfruttato da diversi sistemi che in tutto il mondo sono stati sviluppati per migliorare la precisione nei porti, negli aeroporti e così via. I segnali DGPS possono essere trasmessi da stazioni a terra, o meglio ancora da satellite, sulle stesse frequenze dei satelliti GPS: questa seconda soluzione è quella che garantisce la copertura geografica più ampia. Tali satelliti trasmettono i dati per la correzione sulle stesse frequenze dei satelliti GPS, e per questo possono essere captati dagli stessi ricevitori GPS senza che siano necessarie modifiche hardware alla sezione radio. Occorre solo che il software del ricevitore sia predisposto per interpretarli, rendendo

così minimo il costo industriale per produrre ricevitori che supportino il DGPS. Grazie ai segnali correttivi DGPS, che vengono ricevuti insieme ai segnali GPS, il ricevitore non deve fare altro che sottrarre l'errore alle coordinate determinate in base alle informazioni GPS, per ottenere una stima precisissima della posizione: la precisione orizzontale e verticale ottenibile con sistemi DGPS è talmente alta (inferiore al centimetro) da risultare sufficiente, in caso di necessità, per supportare anche sistemi di atterraggio strumentale negli aeroporti.

Nelle applicazioni geodetiche, ricercatori, ingegneri minerari e studiosi dalle terre spesso si installano una propria stazione di riferimento e ottengono la precisione centimetrica. Ma anche qui la disponibilità selettiva è in agguato: l'errore che essa impone varia continuamente e le correzioni via radio devono arrivare al ricevitore rapidamente e di continuo. La perdita della ricezione anche di pochi secondi comporta un errore che cresce molto rapidamente, anche se il ricevitore riesce a ricevere il segnale da molti satelliti contemporaneamente. Un'altra conseguenza della maggiore disponibilità di segnali contemporanei dai satelliti è che - quando la precisione centimetrica è possibile - il tempo richiesto per raggiungerla diminuisce con l'aumentare dei segnali ricevuti.

Esiste anche un altro sistema di calcolo della posizione che è stato realizzato dai russi nel gennaio 1996 che è composto da una costellazione di 24 satelliti operativi; tale sistema è noto come **Glonass** (GLObal NAVigation Satellite System). GPS e Glonass sono sistemi molto simili, ma alcune differenze sono significative: Glonass non ha nessun degrado della precisione né crittografia dei segnali. Le orbite dei due tipi di satellite sono simili. I satelliti GPS ruotano su 6 piani, 4 per ogni piano. Glonass usa 3 piani, con 8 satelliti su ognuno. L'inclinazione dei piani orbitali è leggermente superiore nel Glonass ( $64.8^\circ$ ) che nel GPS ( $55^\circ$ ). Le orbite sono entrambe circolari, con raggio analogo (GPS 26.560 Km, Glonass 25.510 Km). Sia il GPS sia il Glonass funzionano con lo stesso principio della trilaterazione: conoscendo la distanza da più punti di coordinate note, si può calcolare la propria posizione. Sorge spontanea una domanda: "E se potessimo aggiungere altri 24 satelliti alla nostra costellazione GPS? E magari senza alcun degrado del loro segnale causato volutamente dalla Selective Availability? Potremmo eliminare alcuni limiti del sistema?" La risposta è affermativa e in commercio oggi si trovano ricevitori, come quelli di Ashtec (in Italia Codevintec) che abbinano i due sistemi per ottenere prestazioni migliori. Sommando i due sistemi la costellazione diventa di 48 satelliti, di cui almeno 11 sono

sempre visibili in ogni istante. Gli orologi dei satelliti GPS sono tutti sincronizzati. Anche gli orologi dei satelliti Glonass sono tutti sincronizzati, ma l'ora GPS non è sincronizzata con l'ora Glonass. Così il ricevitore ha due incognite: l'orario GPS e l'orario Glonass. Queste due incognite più latitudine, longitudine e altezza fanno 5 incognite, da risolvere con 5 (o più) satelliti visibili. Se un tipico ricevitore GPS da solo fornisce punti con precisione di 100 metri, un tipico ricevitore combinato GPS/Glonass da solo ha già una precisione di 16 metri, senza ricorrere a tecniche differenziali. Un'altra conseguenza della maggiore disponibilità dei satelliti è che - quando la precisione centimetrica è possibile - il tempo richiesto per raggiungerla diminuisce con l'aumentare dei segnali ricevuti. Un tipico ricevitore differenziale di precisione per GPS necessita di circa 30-40 minuti per arrivare alla precisione centimetrica, mentre a un equivalente ricevitore combinato GPS/Glonass bastano 5-15 minuti.

### Stazione Permanente

Una stazione GPS permanente consiste in un ricevitore GPS che staziona costantemente sullo stesso sito. L'architettura di una tale stazione dipende, in alcuni casi, dalla particolare applicazione, nel caso più generale, però, si traduce in una antenna, nel ricevitore vero e proprio e in un computer di controllo dell'intero sistema, che consente tra l'altro, il monitoraggio da remoto del ricevitore GPS e il salvataggio locale dei dati acquisiti. Tipicamente una stazione GPS permanente opera senza interruzioni acquisendo e immagazzinando i dati di codice e di fase di tutti i satelliti in visibilità dal ricevitore 24 ore su 24 per 365 giorni l'anno. Naturalmente ciò è reso possibile dalla disponibilità della rete elettrica per alimentare il ricevitore, così come l'eventuale controllo da remoto del ricevitore implica che lo stesso sia connesso ad una linea telefonica o ad una linea dati. E' evidente che una tale stazione di solito risulta localizzata presso strutture più ampie (uffici, centri di ricerca o altro) dove oltre alla alimentazione elettrica o la disponibilità di linee telefoniche sia disponibile anche una vigilanza che garantisca la protezione del sistema da estranei o animali, e i necessari ambienti per localizzare adeguatamente l'antenna, il ricevitore, il computer ecc. In alcuni casi, infine, a fianco del sensore di posizione, il GPS, possono essere installati anche apparati meteorologici o altri sensori per applicazioni specifiche. Facciamo ora qualche ulteriore considerazione sulla scelta del sito ove localizzare la stazione permanente e sulle problematiche connesse al punto ove localizzare l'antenna. In tali considerazioni si farà riferimento alle applicazioni del GPS che

presentano requisiti più stringenti. I sistemi che soddisferanno tali requisiti, infatti, saranno in grado di supportare adeguatamente anche applicazioni meno esigenti ma non viceversa. Le principali linee guida che devono essere seguite per quanto riguarda l'individuazione del sito e la monumentazione di antenna sono le seguenti:

- scelta di un sito elettromagneticamente pulito, per quanto possibile, per ridurre al minimo il rischio di interferenze non desiderate;
- scelta di un sito libero da costruzioni circostanti, per quanto possibile, per ridurre al minimo il rischio di percorsi multipli (*multipath*);
- monumentazione stabile ancorata direttamente su roccia o sedimenti stabili (in particolare per applicazioni geofisiche è da evitare il posizionamento su tetti o manufatti, soprattutto se oggetto di studio fossero le deformazioni indotte da fenomeni sismici, come nel nostro caso. La localizzazione sopra tetti anche se di stabili antisismici è sconsigliata per garantire la maggior stabilità possibile del punto; infatti il ricevitore sarebbe sensibile ad una serie di movimenti in alta frequenza dovuti alle oscillazioni dello stabile e di carattere stagionale dovuti alla dilatazione termica delle strutture che necessiterebbero di un'adeguata modellizzazione);
- visibilità del cielo sopra l'antenna completamente libera anche a bassi gradi ( $5^{\circ}$  -  $10^{\circ}$  *cut-off* di elevazione) per ottimizzare l'utilizzo della stazione per studi meteorologici.

I precedenti requisiti vanno considerati come ottimali nella realizzazione di nuove installazioni per applicazioni scientifiche; alcuni di questi diventano obbligatori se le applicazioni prioritarie per cui vengono realizzati i ricevitori permanenti, sono, ad esempio, di tipo geodinamico oppure per studi in campo meteorologico. Pur potendo sembrare ovvie le considerazioni precedenti non vanno sottovalutate poiché la realizzazione di una stazione permanente avviene a seguito di un *trade-off* che tiene in conto anche degli aspetti logistici di funzionalità operativa del ricevitore (sito vigilato, alimentazione elettrica, connessioni telefoniche ecc.). Tali considerazioni hanno preso spesso il sopravvento con la conseguenza, in alcuni casi, di limitare in certa misura il potenziale utilizzo dei dati acquisiti dal sito per alcune applicazioni e studi scientifici. A completamento dell'analisi delle caratteristiche di una stazione permanente è opportuno delineare le caratteristiche del

SW installato sul PC di corredo della stazione permanente. Tramite il PC si devono poter svolgere:

- le funzioni di controllo e diagnostica del Ricevitore sia in locale che da remoto;
- il salvataggio locale dei dati in modo da poter reiterare la comunicazione degli stessi al Centro di raccolta qualora si presentassero dei problemi di connessione;
- effettuare controlli di qualità dei dati.

E' infine opportuno sottolineare che una stazione GPS permanente non ha, in generale, significato di per sé ma in quanto vertice di una rete di stazioni permanenti, è cioè inserita in un contesto più ampio, ed è all'interno di quest'ultimo che i dati acquisiti dai diversi ricevitori possono essere utilizzati appieno per scopi scientifici.

Una rete geodetica di stazioni permanenti è una rete la cui funzione è fornire una materializzazione del sistema di riferimento terrestre, monitorato nel tempo, determinato con il massimo di precisione ottenibile allo stato dell'arte, allo scopo di poter servire da appoggio in modo consistente per tutte le potenziali applicazioni. Infine introduciamo le equazioni delle osservabili GPS:

- **misura di pseudorange**  $P_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r) + c(\delta t^s - \delta t_r) + \delta \rho_{ion} + \delta \rho_{trop}$ , dove  $\rho_r^s(t_r)$  rappresenta la distanza geometrica tra satellite e ricevitore e si può esprimere in funzione delle coordinate cartesiane del ricevitore e del satellite nel Sistema di Riferimento Convenzionale Terrestre (SRCT):  $\rho_r^s(t_r) = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$ , dove  $(X_s, Y_s, Z_s)$  sono le coordinate del satellite all'istante di emissione del segnale  $t^s$ ,  $(X_r, Y_r, Z_r)$  le coordinate del ricevitore all'istante della ricezione  $t_r$ ,  $\delta t^s$  rappresenta l'errore di sincronismo dell'orologio del satellite,  $\delta t_r$  è l'errore di sincronismo dell'orologio del ricevitore,  $\delta \rho_{ion}$  è l'errore dovuto alla ionosfera e  $\delta \rho_{trop}$  è l'errore dovuto alla troposfera.

La misura di fase, costituita da una componente frazionaria consiste nello sfasamento tra la fase dell'onda portante ricevuta dal satellite all'epoca  $t_r$  e la fase di una copia della portante generata dall'oscillatore all'interno del ricevitore alla stessa epoca, ed una componente intera, che rappresenta la variazione del numero intero di lunghezze d'onda comprese

nella distanza satellite-ricevitore tra le epoche  $t_r$  e  $t_0$ . La sua equazione di osservazione, scritta dimensionalmente come una distanza, è data da

$\lambda\Phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r) + c(\delta t^s - \delta t_r) - \delta\rho_{ion} + \delta\rho_{trop} + \delta\rho_{rel} - \lambda N(t_0)$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della portante,  $N(t_0)$  è l'ambiguità di fase iniziale,  $\delta\rho_{rel}$  è l'errore dovuto agli effetti relativistici.

Si noti che, a meno del termine  $\delta\rho_{rel}$  (peraltro molto piccolo e ben modellizzabile), introdotto per migliorare la modellizzazione degli effetti relativistici che influenzano la misura di fase, la struttura dell'equazione di osservazione relativa alla misura di fase è del tutto analoga a quella dell'equazione di osservazione relativa alla misura di *pseudorange* se non comparisse l'incognita  $N(t_0)$ , (ambiguità iniziale), la cui determinazione è necessaria per tradurre le misure di fase in misure di distanza di alta precisione. Quindi per valutare le applicazioni che una rete geodetica di ricevitori permanenti GPS può soddisfare, è sufficiente analizzare ognuno dei termini che compaiono nelle due equazioni, salvo quello riguardante l'ambiguità di fase iniziale che non è legato ad aspetti fisici ma al modo con cui è fatta la misura.

Ora passiamo ad analizzare nel dettaglio le due tecniche, spiegandone il funzionamento e soprattutto le componenti necessarie alla loro implementazione per poi così poter passare ad un'analisi economica.

### 5.3 TECNICA “RAPID DETERMINATION”

La tecnica che viene illustrata nell'articolo “*Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems*” [3], si basa su un approccio tradizionale, che tramite la magnitudo di un terremoto calcola il potenziale tsunami che si potrebbe generare, come abbiamo già detto nel paragrafo 4.4; la reale dimensione di un terremoto ed il potenziale tsunami possono essere determinati utilizzando i dati GPS entro 15 minuti dall'inizio del terremoto, tracciando lo spostamento medio della superficie della terra nel momento in cui arrivano le onde sismiche. Entro pochi minuti possono essere localizzati anche in zone lontane dall'evento spostamenti superiori a 10 mm collegabili a terremoti con magnitudo dell'ordine  $M_w 9.0 \pm 0.1$  che implicano un'elevata probabilità che si verifichi uno tsunami; infatti è per questo motivo che all'interno di un *Warning System* non deve mancare,

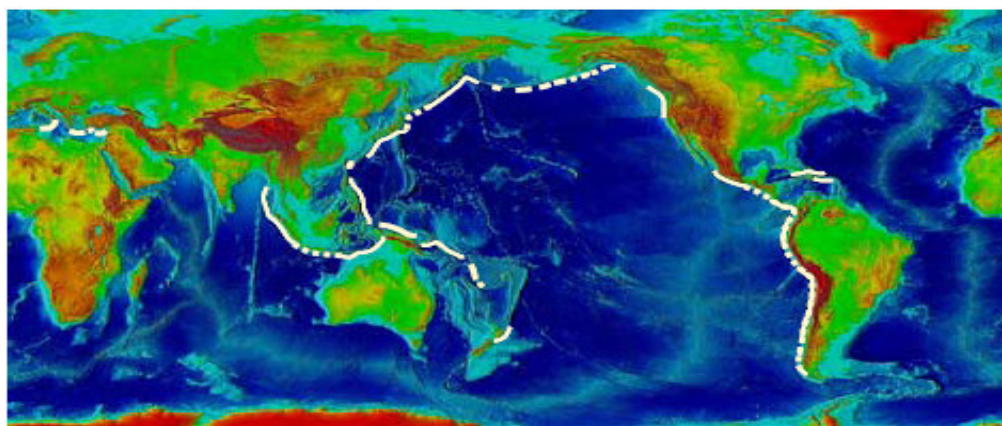
qualora venga utilizzata tale tecnica, un'infrastruttura GPS. La problematica principale, che si riscontra nella realizzazione di un sistema di allertamento e di previsione, è la celerità richiesta nello svolgere tali attività e questo rappresenta un problema per questa tecnica, poiché calcolare la magnitudo di un terremoto dalle osservazioni sismiche può essere valido ma è difficile farlo velocemente in quanto le tecniche sono molto più sensibili a componenti con periodo più breve. È per questo motivo che le onde di superficie di periodo più lungo (dell'ordine dei 400-500 secondi) potrebbero far sottostimare la  $M_W$  e quindi falsificare la reale probabilità di accadimento di uno tsunami, come avvenne a Sumatra nel 2004; infatti quello che viene qui proposto è una variante alla tecnica "Rapid Determination" proprio per ovviare a tale criticità. L'idea è di sfruttare gli spostamenti permanenti (*permanent co-seismic displacements*) della superficie terrestre, poiché tali fenomeni sono direttamente collegati alla generazione degli tsunami e ciò viene ben stimato utilizzando il GPS; infatti il terremoto di Sumatra produsse spostamenti permanenti superiori ai 10 mm in zone lontane come l'India (a circa 2000 Km dall'epicentro) e di pochi millimetri in zone oltre i 3000 Km. Nel momento in cui vengono utilizzati dati GPS ci si riferisce ad un momento  $M_0$ , spesso chiamato "momento statico", che coincide con il momento sismico qualora la "rottura" è di natura totalmente sismica, e da questo valore si passa alla magnitudo  $M_W$  del terremoto da cui si ottiene la previsione dello tsunami; quindi se i dati GPS fossero analizzati rapidamente e con accuratezza, i risultanti spostamenti permanenti potrebbero velocemente indicare le reali dimensioni del terremoto ed il potenziale tsunami (è importante infatti ricordare che nel caso di Sumatra vi è stata alla base proprio una sottostima della magnitudo del terremoto). Nel test eseguito [3] per la flessibilità è stata utilizzata la rete IGS (*International GNSS Service*) per stimare gli spostamenti statici sfruttando solo i dati entro i 15 minuti dall'inizio dell'evento; infatti l'obiettivo è di valutare quanto gli spostamenti statici vincolano il valore  $M_W$  partendo dall'ipotesi di conoscere solo l'epicentro. I dati analizzati provengono da una rete GPS composta da 38 stazioni posizionate fino ad una distanza di 7500 Km dall'epicentro, delle quali due forniscono indicazioni circa il "near field" (poste a circa 300-900 Km) zona in cui si verificano spostamenti superiori ai 10 mm, otto stazioni valutano il "mid field" ad una distanza tra i 1600 ed i 3000 Km in cui si hanno spostamenti più piccoli ma comunque dell'ordine di qualche millimetro, mentre le rimanenti ventotto stazioni, che sono posizionate ad una distanza di 3500-7500 Km ("far field"), sono troppo lontane per fornire dettagli sul terremoto, ma possono essere utili per correggere gli spostamenti delle stazioni più vicine. Anche in termini di accuratezza temporale vi sono delle differenze fra le tre



tipologie di stazioni GPS: la posizione delle stazioni *far field* viene aggiornata con un periodo di 24 ore, mentre per le altre il periodo è di 30 secondi; inoltre vengono utilizzati due filtri: un filtro “*square root*”, che si adatta bene ad operazioni *real-time*, per l’inversione dei dati ed un altro per le posizioni.

## 5.4 TECNICA “GPS SHIELD-ARRAYS”

Questa seconda tecnica che viene illustrata nell’articolo “*Tsunami early warning using GPS-Shield arrays*” nasce a seguito dello tsunami del 2004 avvenuto nell’oceano indiano, che ha duramente enfatizzato il bisogno di un sistema di monitoraggio specialmente in tutti quegli ipotetici casi in cui il tempo a disposizione per attuare qualsiasi possibile soluzione è davvero minimo. Il problema, infatti, non sussiste solo per quelle zone, ma tale studio [1] rappresenta l’introduzione di una nuova tecnica che risulta essere vantaggiosa soprattutto in caso di tsunami *near-field*. La figura sottostante mostra le zone nel mondo in cui tale tecnica può risolvere diversi problemi e soprattutto fornire un valido sostegno alla realizzazione del sistema di monitoraggio e previsione; infatti possiamo notare che le tre SZ, che sono descritte nell’articolo “*Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea: Scenarios of potential threats to Southern Italy*” e sono state trattate nel paragrafo 4.6, sono marcate tutte e tre nell’immagine sottostante.

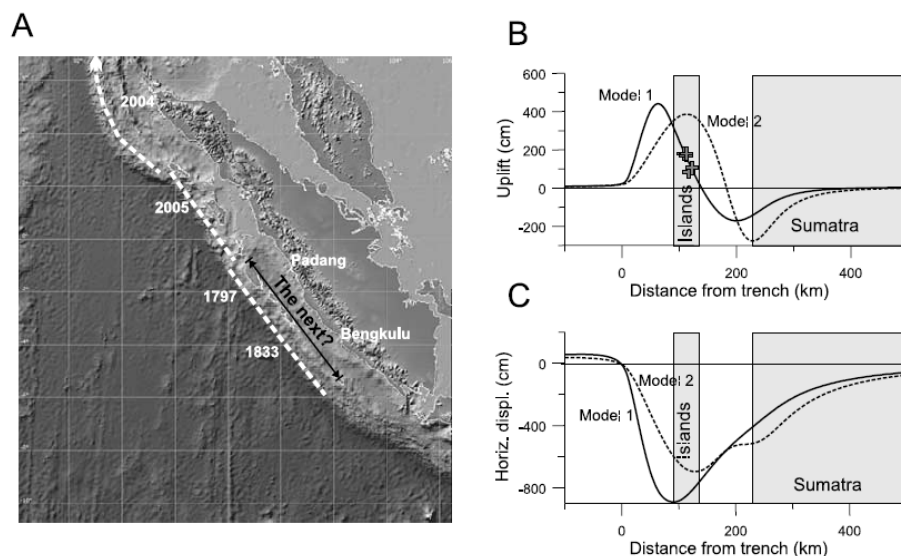


**Figura 5.1: Zone del Mediterraneo idonee al GPS-Shield**

A differenza dall’altra tecnica, basata sulla magnitudo del terremoto, tale sistema parte dalla dimostrazione che terremoti con gli stessi parametri fisici ma *slip distribution* diverse, possono generare tsunami di entità e caratteristiche completamente diversi; inoltre



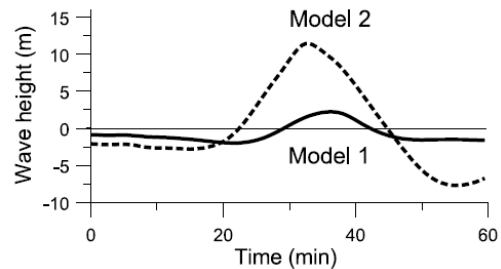
viene dimostrato [1] che tramite il metodo utilizzato (chiamato da ora **GPS-shield**) entro soli 10 minuti dall'inizio del terremoto si può prevedere uno tsunami. Tali arrays sono in grado sia di misurare *displacements* verticali e orizzontali sia di dedurre la *slip distribution*, purché l'array sia localizzato sopra la *rupture zone* oppure ad una distanza inferiore ai 100 Km; inoltre le stazioni che compongono l'array devono essere posizionate il più vicino possibile al *trench* ed allineate perpendicolarmente ad esso. La prossimità della costa alla potenziale sorgente dello tsunami significa che il tempo a disposizione prima che l'onda arrivi alla costa è dell'ordine dei 20-30 minuti (come abbiamo visto nel paragrafo 4.6 in alcuni casi può essere anche inferiore); infatti è per questo motivo che realizzare un warning system è particolarmente difficile. Inoltre determinare lo tsunami mediante magnitudo ed ipocentro può andar bene nel caso *far-field*, ma non aiuterà nella progettazione di un sistema per tsunami "locale". L'aspetto più innovativo introdotto in questa tecnica è che terremoti con slip-distribution diverse generano due tipologie di tsunami, come mostrato dalla **Figura 5.2** e dalla **Figura 5.3**, in cui possiamo notare la sostanziale differenza in termini di variazioni sia verticali sia orizzontali; infatti i due modelli si distinguono per uno slip massimo più profondo in uno dei due casi, mentre sono caratterizzati dallo stesso momento sismico e dalla stessa *fault geometry*. L'aspetto fondamentale è che i due modelli conducono a due scenari diversi, nonostante siano caratterizzati dagli stessi parametri geofisici: in entrambi i casi all'origine c'è uno stesso terremoto (in termini di parametri geofisici) ma con slip-distribution diverse e tale diversità è responsabile della formazione di due tsunami completamente diversi, come possiamo notare dalle figure sottostanti.



**Figura 5.2: Differenze fra i due modelli**

Grazie a questa tipologia di configurazione GPS si è in grado di distinguere fra i due differenti scenari per poi quindi identificare la reale urgenza della situazione; è opportuno ricordare che nella realizzazione di un warning system è fondamentale riuscire a distinguere “reali” pericoli dai falsi allarmi,

poiché le ipotetiche evacuazioni e/o eventuali situazioni di panico generano non solo perdite di denaro, ma anche possibili morti. A difesa dell’ipotesi fondamentale di questa teoria, ossia quella che i due modelli generano tsunami

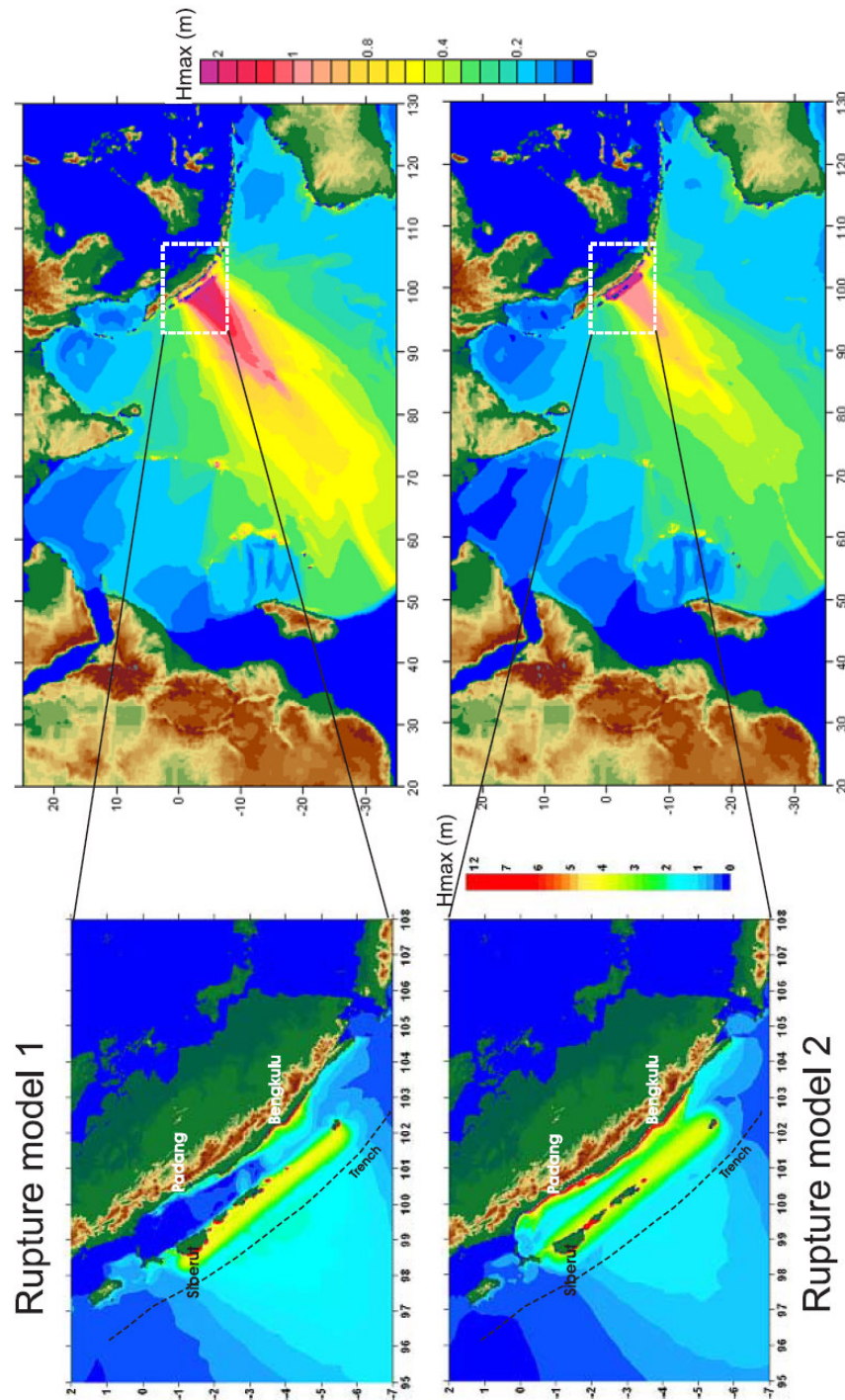


diversi, mostriamo la **Figura 5.3** riguardante la zona di Sumatra, in cui è possibile notare che i due modelli si differenziano non solo per massima altezza d’onda, ma anche sul loro comportamento; infatti nelle figure è possibile vedere le massime altezze raggiunte (nei due casi) dopo il terremoto e le sostanziali diversità: nel caso del primo modello si genera un grande tsunami in direzione del mare dal trench ma, a seguito degli effetti di *screening* delle isole, le onde diventano relativamente basse ma ancora pericolose vicino alla città di Pandang sulla costa, mentre il secondo modello (con uno slip massimo più profondo) genera onde molto alte sulla costa di Pandang ma onde molto più piccole in oceano aperto. Le altezze massime risultanti si differenziano più di un fattore cinque, come mostra la figura qua accanto, marcando l’importanza di utilizzare un sistema di previsione che sia in grado di distinguere fra le due tipologie, poiché abbiamo capito che soprattutto per tsunami near-field non è sufficiente conoscere magnitudo ed ipocentro, ma è necessario studiare le principali caratteristiche in funzione della profondità la slip distribution.

La questione è se sia possibile risolvere e ricavare le principali caratteristiche della slip distribution in tempi molto brevi (quelli che realmente si avrebbero a disposizione) subito dopo l’inizio di un terremoto e se le soluzioni così ottenute siano attendibili; le attuali tecniche GPS consentono un’accuratezza sufficiente a tali scopi e si riesce ad invertire i dati anche entro dieci minuti, però la disposizione spaziale dell’array è fondamentale, perché altrimenti si avrebbero problemi riguardanti l’unicità delle soluzioni ricavate. In questo studio [1] viene illustrata la procedura con la quale è possibile ottenere i risultati che abbiamo indicato e la valutazione di quante stazioni GPS occorranza per raggiungere l’accuratezza necessaria. La procedura è la seguente:

- 1) una o più stazioni GPS (dopo verrà illustrata la problematica) sono state posizionate allineate perpendicolarmente al trench;

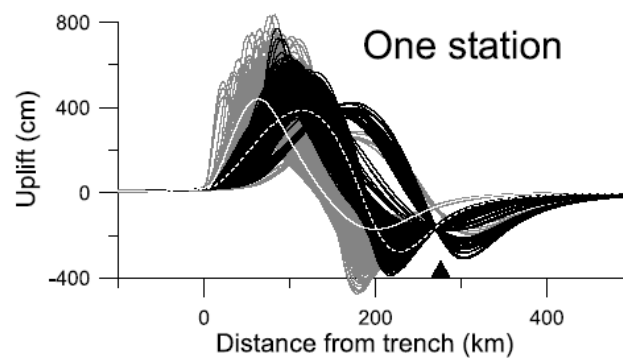
- 2) vengono introdotti come segnali d'ingresso i displacements;
- 3) viene definita l'accuratezza per le osservazioni dei displacements sia verticali e orizzontali sia fra le stazioni;
- 4) successivamente si perturbano i dati in ingresso ad ogni stazione;
- 5) le osservazioni sintetiche vengono allora invertite per ottenere i parametri mediante la parametrizzazione ed un metodo di inversione non lineare;
- 6) alla fine calcoliamo la distribuzione dei displacements così ottenuti e li confrontiamo con i valori mandati in ingresso.



**Figura 5.3: Caratteristiche dello tsunami derivante dai due modelli**

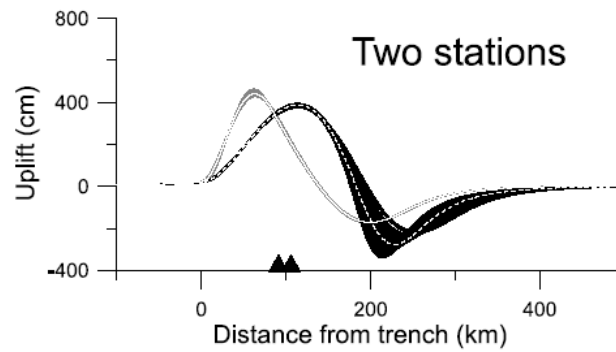
La procedura sopra esposta viene allora ripetuta per altre osservazioni random, ottenendo così un certo numero di modelli e di curve di displacements che combaceranno con i modelli in input anche in funzione della risoluzione del GPS array. A questo punto si deve affrontare la problematica relativa al numero di stazioni GPS che occorrono per

raggiungere l'accuratezza sufficiente; il primo tentativo che verrà effettuato è mostrato nella **Figura 5.4** con una sola stazione GPS posizionata ad una distanza di 270 Km dal trench, che corrisponde all'incirca alla posizione di Pandang nel caso di Sumatra, e che garantirebbe un'accuratezza di  $\pm 5$  cm per displacements orizzontali e  $\pm 10$  cm per quelli verticali. Effettuando circa 500 simulazioni si ottiene il grafico sottostante, in cui è chiaro che una sola stazione non può bastare; infatti nella figura possiamo notare le due curve bianche (una continua e l'altra tratteggiata) che rappresentano le previsioni mediante l'analisi dei due modelli e tutte le curve grigie e nere che rappresentano i valori input delle 500 simulazioni. Dall'immagine risulta chiaro che con una sola stazione non si può raggiungere la sufficiente accuratezza, perché possiamo vedere che le curve bianche non approssimano affatto bene i valori in ingresso, specialmente ad una distanza inferiore di 200 Km dal trench.



**Figura 5.4: Variazione dell'accuratezza in funzione della distanza dal trench (1 stazione)**

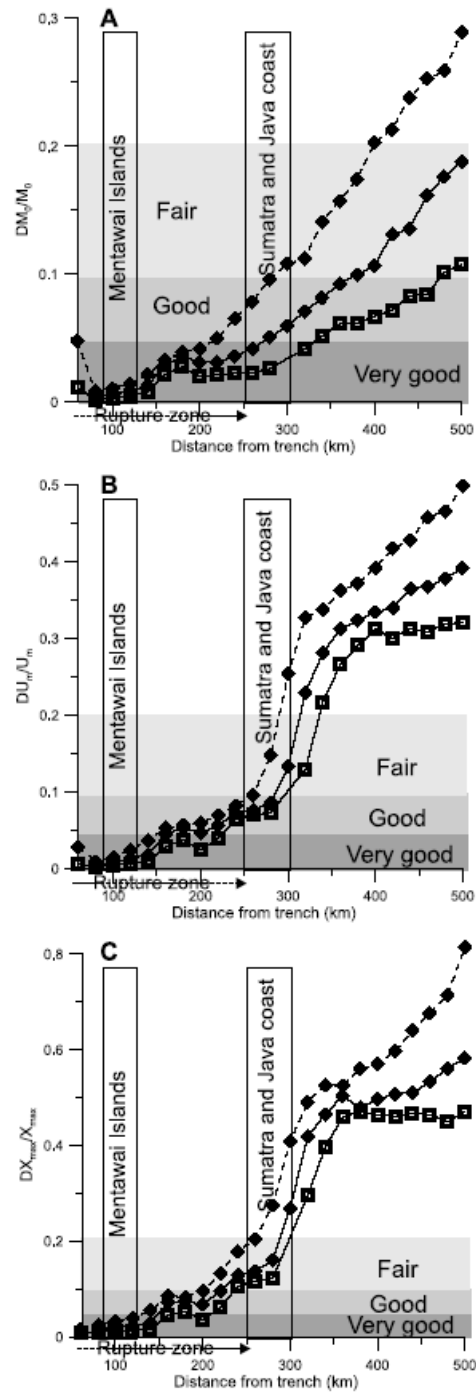
Ripetendo le simulazioni con due stazioni GPS posizionate a **90 Km dal trench** e spaziate tra loro di 20 Km per quanto riguarda l'accuratezza si può considerare il miglioramento che deriva dal fatto di poter utilizzare il D-GPS (le stazioni devono quindi essere vicine, **dell'ordine dei 10-30 Km**) ossia il GPS differenziale (che abbiamo visto nel paragrafo 5.2), che è caratterizzato da una maggiore precisione dovuta al fatto che le diverse stazioni effettuano le correzioni sulla posizione calcolata; l'accuratezza così ottenuta è circa  $\pm 1$  cm per gli spostamenti orizzontali e  $\pm 3$  cm per quelli verticali (situazione decisamente migliore come può essere osservata nella figura sottostante).



**Figura 5.5: Variazione dell'accuratezza in funzione della distanza dal trench (2 stazioni)**

Dall'immagine emerge chiaramente che un array composto da due stazioni può andar bene per prevedere l'altezza dell'ipotetico tsunami e per distinguere fra i due modelli; inoltre è opportuno ricordare che il livello di accuratezza che potrebbe essere raggiunto con un ricevitore GPS sarebbe dell'ordine dei millimetri se non fosse per errori indotti dall'attraversamento della ionosfera e della troposfera rendendo tale precisione raggiungibile esclusivamente con una rete composta da quattro stazioni.

Le nostre due stazioni D-GPS dovranno utilizzare e generare dati con un'alta frequenza (**1 Hz**) ed essere dotate di ricevitori “*precise geodetic dual-frequency receiver*”; inoltre può essere interessante mostrare il valore differenza normalizzato “*Root Mean Square*” (RMS) dei valori ottenuti con questo metodo di inversione ed i valori mandati come input in funzione della distanza del GPS array dal trench. Nella **Figura 5.6** vengono mostrati i risultati ottenuti nell'articolo [1], in cui le diverse curve sono state ottenute considerando diversi gradi di accuratezza dei displacements: come si può notare il caso migliore risulta essere quello in cui l'array è posizionato esattamente sopra il massimo slip del fault (praticamente ad una distanza dal trench di circa 80-90 Km), mentre la qualità decresce man mano che ci si allontana anche se rimane completamente buona fino a che l'array viene spostato lungo la rupture zone. Quando si arriva ad una distanza di più di 100 Km dal *downdip limit* della rupture zone, allora l'accuratezza decresce a tal punto che risulta essere paragonabile al caso in cui vi fosse una sola stazione GPS; in particolare nella figura **A** notiamo il momento sismico normalizzato, nella **B** il displacement medio normalizzato e nella **C** le coordinate orizzontali normalizzate del massimo slip, mentre in tutte le tre figure la curva continua con i quadrati rappresenta l'accuratezza realistica, la curva continua con i rombi il caso conservativo e la curva tratteggiata con rombi il caso pessimistico.



**Figura 5.6: Variazione dell'accuratezza**

Ciò che può essere dedotto dalla figura sopra è che:

- un array di stazioni GPS allineate perpendicolarmente al trench è in grado di risolvere il momento sismico con un'elevata accuratezza anche se è localizzato a diverse centinaia di chilometri dal trench;



- un array può inoltre risolvere i *rupture parameter* come ad esempio il displacement medio e la localizzazione del massimo con un'accuratezza sufficiente alla previsione di tsunami (qualora sia localizzato sopra la rupture zone);
- se l'array è localizzato ad una distanza inferiore a qualche centinaia di chilometri dalla rupture zone, è ancora in grado di risolvere il momento sismico ma l'accuratezza decresce fortemente con l'aumentare della distanza.

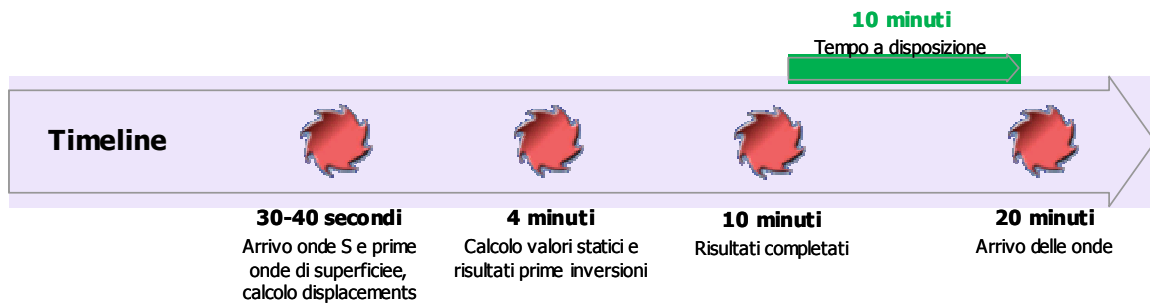
Inoltre se fosse nota la *fault geometry* (ottenibile con l'aiuto di sismometri) e l'accuratezza del GPS fosse migliore di pochi centimetri (ottenuta come abbiamo precedentemente detto), allora si potrebbe calcolare con esattezza il displacement medio e la collocazione del massimo displacement.

Concludendo possiamo riassumere i concetti chiave del **GPS-Shield** da utilizzare per warning system real time per tsunami near-field, come il caso del Mar Mediterraneo: la parte frontale dell'array sarà formata da due o più stazioni GPS ad una distanza dal trench prestabilita (stazioni GPS permanenti, qualora vi fossero isole e/o lembi di terra opportuni, oppure boe ondametriche dotate delle apparecchiature GPS) ed opportunamente spaziate tra loro (10-20 Km) ed allineate perpendicolarmente al trench (parallelo al gradiente di superficie); una *Master station* e diverse *Slave Stations* dovranno essere dotate del *precise geodetic dual-frequency receiver*, di un sensore digitale meteorologico, di un'unità *data processor* e modem radio. La stazione Master riceverà continuamente le osservazioni ad una frequenza di 1 Hz (10 Hz nel caso di terremoto) dalle slave ed eseguirà i calcoli opportuni; qualora tale tecnica venisse implementata è chiaro che per realizzare un Warning System efficiente sarebbe opportuno affiancare le stazioni GPS con altri strumenti come anche quelli più tradizionali come le *tide gauges*.

Come ultimo punto, mostriamo l'andamento temporale entro il quale si avrebbero a disposizione le informazioni necessarie alla realizzazione di una qualsiasi azione di evacuazione o di altro tipo; dopo circa **30-40 secondi** le stazioni GPS più vicine alla rupture zone iniziano a registrare i grandi displacements con l'arrivo delle onde S e delle prime onde di superficie. Dopo circa **3 minuti** le stazioni GPS vicine all'epicentro giungono ai loro valori statici sia per gli spostamenti verticali che orizzontali; la prima inversione per i parametri utilizzando i dati GPS può essere ottenuta già dopo **3 minuti** dall'inizio del terremoto. Dopo **6-7 minuti** tutti i valori statici sono pronti e le inversioni possono essere completate e nel frattempo le onde dello tsunami potrebbero aver già



passato alcune tide gauges (così che si possono confrontare i valori) e di conseguenza sarà possibile prevedere accuratamente l'altezza dello tsunami riuscendo a distinguere fra diversi scenari di pericolosità; tale sistema lascerebbe circa **10 minuti** di tempo prima che arrivi alle coste (nel caso più stringente).



**Figura 5.7: Timeline delle principali scadenze**

## **6. PROGETTO DI UN WARNING SYSTEM PER IL RILEVAMENTO DI TSUNAMI NEL MEDITERRANEO**

### **6.1 INTRODUZIONE**

In questo ultimo capitolo andiamo a mostrare le componenti tecniche necessarie alla realizzazione del sistema, fornendo una descrizione generale del sistema, che un'eventuale Ente (quale ad esempio l'ISPRA) potrebbe realizzare, sia dal punto di vista tecnico sia soprattutto dal punto di vista economico; però nonostante in questa tesi il progetto sia stato affrontato come attività che un singolo ente dovrebbe affrontare, in realtà data la portata e la complessità del progetto sarebbe più opportuno che la sua realizzazione prevedesse una sinergia di più "Stakeholders", soprattutto in virtù del fatto che molte componenti del sistema dovrebbero essere collocate al di fuori dei confini italiani. Questo aspetto è importante se pensiamo alla complessità di tali sistemi non solo in termini di progettazione, ma anche in termini di dispendio economico necessario alla sua implementazione e manutenzione.

Infatti, oltre alla parte più tecnica in questo capitolo andiamo ad effettuare un calcolo della spesa che dovrebbe essere sostenuta negli anni per realizzare il Warning System in entrambe le modalità implementative, ossia tramite la "Rapid determination" o la "GPS-Shield".

### **6.2 COMPONENTI NECESSARIE PER UN WARNING SYSTEM**

Dagli studi condotti fino a questo punto emerge chiara la necessità di differenziare il sistema di monitoraggio e previsione in funzione degli scopi e delle necessità per le quali verrebbe realizzato; infatti prima di definire la strumentazione necessaria ed i relativi costi è opportuno classificare le principali funzioni esplicabili con un tale sistema, soprattutto dato il fatto che le stazioni GPS hanno costi enormemente diversi a seconda se sono

stazioni permanenti oppure stazioni su boe. Tre sono le diverse funzionalità che possono essere erogate con i dati derivanti dal sistema e per ognuna è possibile associare una specifica necessità, come mostra la **Tabella 6.1**.

FUNZIONI	GPS	STRUMENTAZIONE NECESSARIA
monitoraggio continuo di fenomeni ordinari e di parametri meteomarinari	GPS su boa	Rete Ondamentrica Nazionale + Rete Mareografica Nazionale (già realizzata)
modello di propagazione di un'onda rilevata che in unione alla tecnica <b>GPS-Shield</b> fornirebbe un modello di previsione di tsunami nel mar mediterraneo	GPS su boa	Array di 2 stazioni GPS su boa con tsunameter + tide gauges e/o ulteriore strumentazione ausiliaria (da realizzare)
modello di previsione di tsunami nel mar mediterraneo sfruttando la <b>tecnica classica</b>	GPS a terra	38 stazioni permanenti GPS (da realizzare)

**Tabella 6.1: Strumentazione e tecnologia da implementare in funzione dell'obiettivo**

Per poter decidere quale delle due tecniche implementare è fondamentale il fine ultimo per il quale il Warning System verrebbe realizzato ed in particolare se si vuole monitorare:

- eventi ordinari: può essere sufficiente o implementare le attuali reti oppure una rete composta da un numero inferiore di stazioni permanenti GPS (< 38), poiché l'aspetto cruciale è il suo funzionamento in continuo, mentre l'unica problematica risulterebbe la distribuzione spaziale delle stazioni;
- tsunami: si dovrebbe implementare una delle due tecniche sopra esposte, che rispondono entrambe ai requisiti necessari quali l'accuratezza, velocità e robustezza;
- entrambi.

L'importanza di un tale sistema, indipendentemente dalla modalità implementativa che viene scelta, è che consentirebbe azioni immediate per mitigare gli effetti dell'onda e/o difendere la popolazione che vive nelle zone costiere; infatti qualunque sia l'azione se venisse fatta tempestivamente e venissero divulgati allarmi precisi, allora si potrebbero salvare diverse vite. Bisogna però fare attenzione ai falsi allarmi, poiché essi stessi possono essere causa di mortalità e/o incidenti: basarsi completamente solo sulle onde sismiche può

essere davvero pericoloso, poiché nel caso di tsunami near-field aspettare le conferme da parte delle tide gauges (nella maggior parte dei casi) non è la soluzione più opportuna, quindi vi è la necessità di iniziare nel frattempo ad intraprendere delle azioni. Le informazioni che tale sistema dovrebbe fornire, prima che l'onda arrivi alla costa, sono tutti i parametri critici dello tsunami quali ad esempio ampiezze, distanze di inondazione, velocità della corrente tutti valori la cui esattezza dipende da tre parametri (requisiti) fondamentali: accuratezza, velocità e robustezza.

**Accuratezza:** gli errori e le incertezze saranno sempre presenti nei sistemi di previsione qualunque sia la finalità per cui vengono utilizzati, poiché è implicito nel termine stesso di previsione, ma un sistema “pratico” è caratterizzato dalla minimizzazione delle incertezze e dalla riduzione dei possibili errori; infatti nel nostro caso i possibili errori sono dovuti a:

- errori di misura dovuti a componenti di disturbo esterne, come il rumore, che alterano i dati;
- errori dovuti ai modelli di previsione utilizzati;
- errori presenti nei segnali in ingresso al modello.

**Velocità:** quando si parla di velocità si intende la velocità operativa che caratterizza due parti del sistema:

- velocità del modello nell'eseguire l'inversione e/o l'operazione necessaria alla generazione dei dati;
- velocità del trasferimento dati dalla stazione GPS al centro di controllo (vedi 6.4).

**Robustezza:** mantenere le stazioni perfettamente funzionanti è molto difficile e soprattutto molto impegnativo in termini di costo, in particolare se si tratta non di stazioni GPS permanenti ma di stazioni GPS su boa.

La strategia è quella di sviluppare un Warning System accurato e veloce per offrire analisi dei dati derivanti da terremoti e/o dai parametri meteomarini per poi così poter prevedere tsunami e loro potenziali effetti sulle comunità costiere; inoltre è opportuno sottolineare che anche gli allarmi senza reale necessità sono pericolosi, costosi e diminuiscono la credibilità del sistema (ad esempio nel caso delle Hawaii i costi di evacuazione sono stati superiori ai 68M di dollari).

Indipendentemente dalla tecnica che viene utilizzata, il sistema deve soddisfare dei requisiti che sono essenziali per il suo corretto funzionamento:

- accuratezza: 0,5 cm o meno;
- campionamento: 1 secondo (1 Hz);
- elaborazione: 2 minuti o meno;
- consegna dati: 5 minuti o meno.

Dato che la tecnica “Rapid Determination” può essere considerata come caso semplificato del GPS-Shield (ossia composta essenzialmente da stazioni permanenti), si ritiene opportuno descrivere maggiormente in dettaglio le componenti tecniche che costituiscono l’array.

### **Tecnica GPS-Shield Arrays**

La **Figura 6.1** mostra due componenti fisiche: uno “*tsunameter*” sul fondale ed una boa di superficie con la capacità di realizzare comunicazioni satellitari dando la possibilità ad un tale sistema di effettuare comunicazioni bidirezionali con lo “*Tsunami Warning Center*” (vedi paragrafo 6.4); la presenza di uno *tsunameter* sul fondale è dovuta al fatto che le onde sismiche viaggiano ad una velocità significativamente maggiore di quella delle onde dello tsunami, offrendo la possibilità al dispositivo di segnalare un “*event mode*” prima del verificarsi del maremoto stesso e fornendo un servizio di scoperta eventuali falsi allarmi.

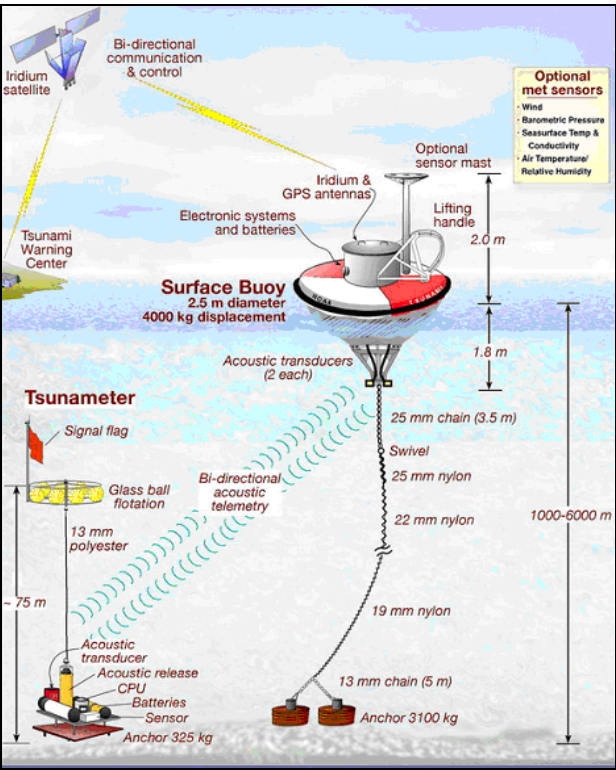


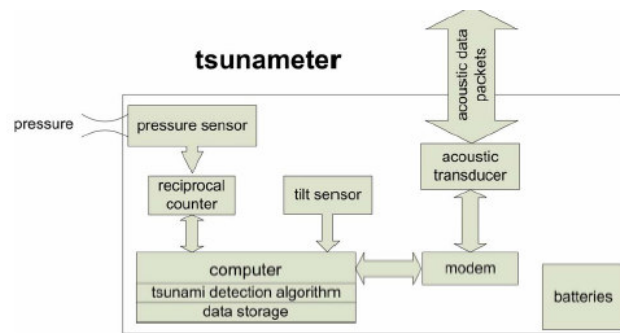
Figura 6.1: Componenti di una stazione GPS-Shield

Per una tale strumentazione bisogna fissare le specifiche (mostrate nella tabella sottostante) che devono essere pianificate durante la progettazione e raggiunte dopo l’implementazione in modo da poter far funzionare correttamente il sistema; le specifiche sono da considerarsi per entrambe le parti se non è specificato diversamente.

CARATTERISTICHE	SPECIFICHE	CARATTERISTICHE	SPECIFICHE
Affidabilità ( <i>Reliability</i> )	> 80%	Intervallo di campionamento, registrazioni <i>event mode</i>	1/10 di secondo
Massima profondità	6000 metri	Intervallo di campionamento, report su parametri meteomarinari	<= 15 minuti
Minima durata delle realizzazione	> 1 anno	Sensibilità delle misure	<= 1 mm in 5000 metri
Intervallo di manutenzione della boa	> 2 anni	Richiesta Report su dati tsunami	1) automaticamente con il passaggio da "normal mode" a "event mode" 2) su richiesta dallo Tsunami Warning Center
Intervallo di manutenzione dello tsunameter	> 4 anni	Massimo ritardo nella consegna dei report	< 2 minuti
Intervallo di campionamento, registrazioni <i>normal mode</i>	1 secondo	Massimo Costo	250,000\$ ~ 189,653 Euro

Tabella 6.2: Specifiche del sistema

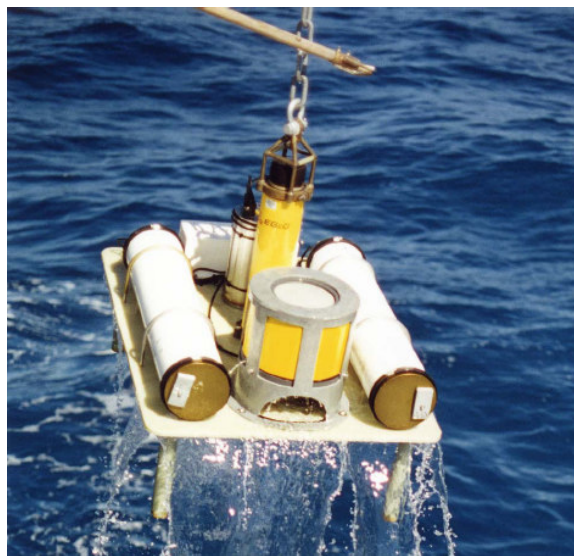
Ora passiamo ad analizzare le singole componenti, partendo dallo **tsunameter** ossia il dispositivo situato sul fondale marino che, come mostrato in figura, risulta essere formato da più dispositivi interagenti fra loro; in particolare il “*pressure sensor*” è un modello realizzato dalla Paroscientific (410K Digiquartz) con un range da 0 a 10.000 psi (*Pound per Square Inches*), unità di misura anglosassone della pressione con la seguente relazione di equivalenza  $1 \text{ PSI} = 0,069 \text{ bar}$ ). I “*transducers*” utilizzano un fascio di quarzo di cristallo molto sottile capace di “vibrare” anche alle frequenze di risonanza più basse. Il blocco “*Reciprocal Counter*” è responsabile della misura simultanea della pressione e della temperatura, raggiungendo una risoluzione del millesimo sia per la temperatura sia per la pressione: ad intervalli stabiliti il computer legge i dati e li salva nella flash memory card (*data storage*, in un anno i dati occuperanno circa 270 MB). Il computer presente sia nello tsunameter sia sulla boa è un modello realizzato da Motorola (68332 microcontroller) programmato in C e costruito per avere un basso consumo energetico; inoltre dispone di una memoria da 4 MB e 512 B di RAM. Le comunicazioni in onde acustiche fra lo tsunameter e la boa avvengono mediante un modem Benthos (ATM-880) che ha un fascio di apertura conico di  $40^\circ$  ed i dati vengono modulati mediante MFSK (*Multiple Frequency-Shift Keying*); inoltre il protocollo utilizzato cerca di minimizzare il consumo di energia ma al tempo stesso supporta il trasferimento dei dati ad un alto *rate* garantendone l’integrità. Sicuramente però uno dei blocchi più importanti è lo “*tsunami detection algorithm*”, che prima lavora per calcolare le fluttuazioni dell’ampiezza della pressione nel range delle frequenze dello tsunami per poi confrontarle con un valore di soglia: se i valori osservati superano la soglia, allora lo tsunameter va in modalità “*Event Mode*”; infatti lo tsunameter lavora in due modalità di *reporting*, uno a basso consumo di energia (chiamato *standard mode*) in cui sono previste trasmissioni solo schedate, l’altro a maggior consumo a seguito di un evento (chiamato *event mode*):



- **Standard Mode:** i reports vengono inviati ogni 6 ore, contenenti informazioni quali ad esempio l’altezza media della colonna dell’acqua ed il voltaggio della batteria che forniscono la sicurezza che il dispositivo stia funzionando correttamente.

- Event Mode: tali reports vengono inviati esclusivamente a seguito del superamento di un valore di soglia ed in tal caso vengono trasmesse immediatamente con un ritardo consentito inferiore a 3 minuti (tali trasmissioni continueranno fino a che l'algoritmo non ripristina lo standard mode).

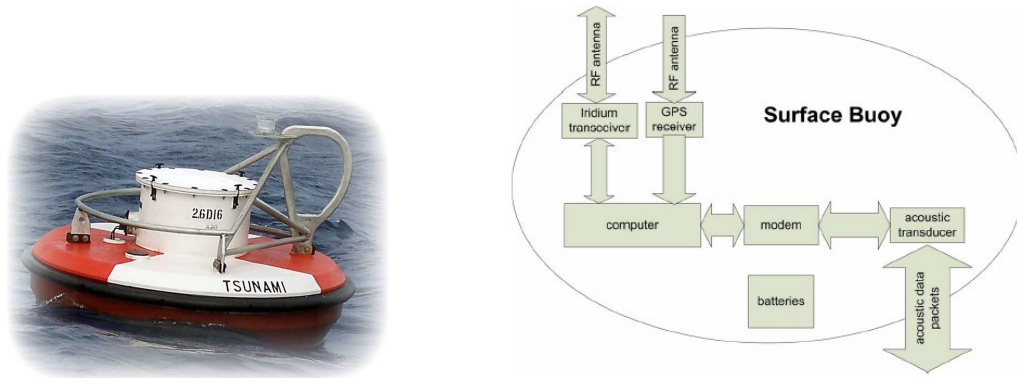
L'ultimo blocco che esaminiamo è il sistema di alimentazione, che fornisce energia al computer dello tsunameter ed ai dispositivi di misura, composto da una batteria "*Alkaline D-cell*" con una capacità di 1560 watt a ora (1,56 KW/h); il modem viene alimentato analogamente tramite una batteria in grado di fornire una capacità di oltre 2 KW/h. Tali batterie sono state progettate per durare almeno 4 anni, nel cui calcolo sono stati considerati un certo numero medio di eventi che potrebbero capitare cercando di massimizzare la vita della batteria dato che i costi per andare a recuperare lo tsunameter sono molto elevati, come si può immaginare già dalla sola osservazione dell'immagine sottostante.



**Figura 6.2: Recupero di uno tsunameter**

Analogamente a quanto abbiamo fatto con lo tsunameter ora passiamo ad analizzare le componenti della boa di superficie; la boa contiene due sistemi elettronici identici per offrire ridondanza nell'eventualità in cui una delle due non funzionasse.





**Figura 6.3: Componenti interne della boa di superficie**

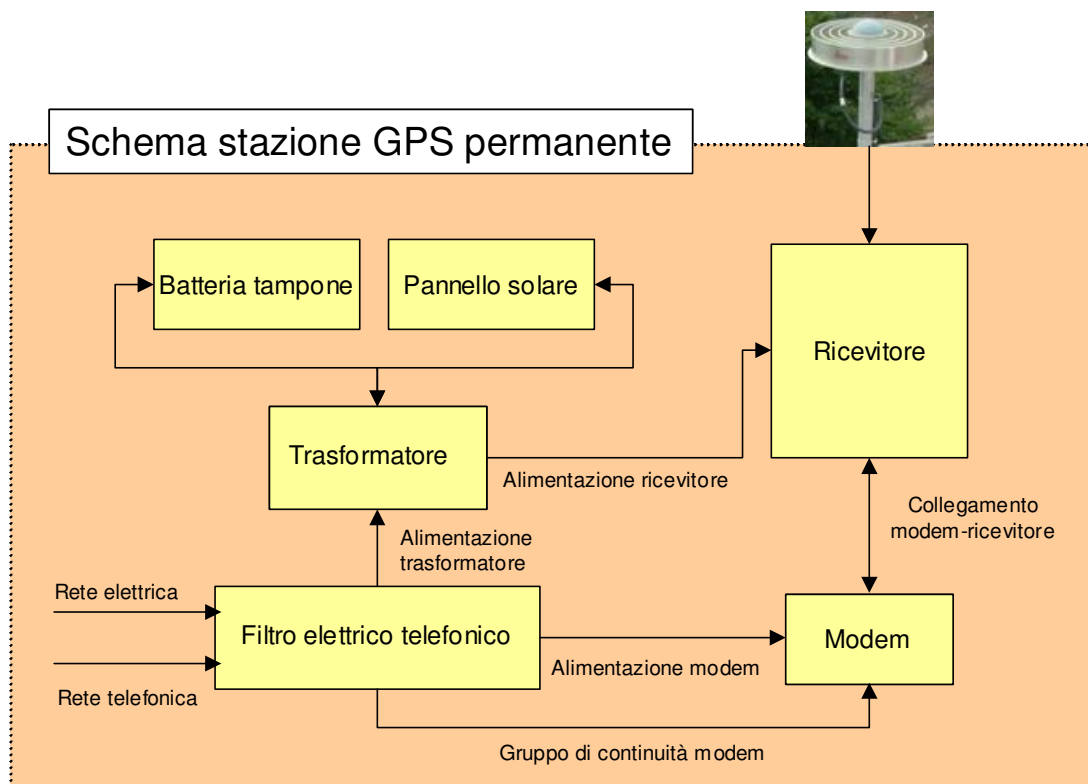
Il computer di cui dispone è della stessa tipologia di quello implementato nello tsunameter ed è responsabile dell'elaborazione dei messaggi scambiati fra satellite e tsunameter (anche i modem ed i transducers sono gli stessi). La boa ha un diametro di 2,5 metri per un peso di 4000 Kg ed è ancorata con un'ancora di 3100 Kg per mantenere la boa sempre al centro del fascio conico dello tsunameter. Una componente fondamentale è data dal “*Iridium Transceiver*” composto da un transceiver Motorola 9522 L-Band, che consente la connettività con il satellite Iridium (costellazione formata da 66 satelliti di comunicazione); inoltre la componente GPS oltre a fornire i dati di posizione è anche fondamentale per il servizio di sincronizzazione che fornisce. Per quanto riguarda le batterie dobbiamo dire che sono della stessa tipologia di quelle dello tsunameter, fornendo al transceiver ed al computer un'energia di 2.560 W/h (2,56 KW/h) e di 1,8 KW/h per il modem acustico; infatti il periodo di esistenza è fissato ad almeno 2 anni.

Bisogna sottolineare che uno degli aspetti più innovativi è senza dubbio il fatto che fra le boe, gli tsunameter ed il centro di controllo esiste un collegamento dati bidirezionale attivo 24h su 24, che rende tutti i dati disponibili real-time presso la sala di controllo nello Tsunami Warning Center; infine anche la boa ha due modalità di funzionamento:

- Listen Mode, in cui può essere solamente interrogata da parte dello Tsunami Warning Center.
- Active Mode, in cui a seguito di un evento invia l'allarme allo Tsunami Warning Center.

### **Tecnica “Rapid Determination”**

Per quanto riguarda l’implementazione di questa tecnica, abbiamo già detto che basterebbero 38 stazioni permanenti GPS quindi descriviamo brevemente un prototipo di stazione permanente. Ogni stazione è costituita da un ricevitore GPS con relativa antenna ed un trasmettitore dei dati registrati verso lo Tsunami Warning Center: lo schema di ogni stazione permanente è riportato nella figura sottostante, in cui ciascun ricevitore consente di captare i segnali trasmessi da una rete di satelliti in orbita attorno alla Terra, la cui analisi combinata permette di determinare la posizione esatta di ciascuna stazione, con precisione dell'ordine di qualche millimetro. La strumentazione di cui si compongono le stazioni della rete è stata allestita in maniera tale da integrarsi con le altre reti operanti a livello nazionale e mondiale, in maniera da consentire il totale interscambio di informazioni, fornendo, quindi, un quadro completo e real-time; inoltre possono essere utilizzati i pannelli solari per alimentare il ricevitore GPS.



**Figura 6.4: Componenti interne della stazione GPS permanente**

## 6.3 VALUTAZIONE ECONOMICA DEL SISTEMA

Quanto abbiamo visto fino ad ora ci consente di poter preferire una tecnica ad un'altra esclusivamente da un punto di vista puramente tecnico, ma non è stato mai trattato un costo economico; quindi prima di poter trarre qualsiasi conclusione, cercando di giungere ad una *best choice* (qualora sia possibile), è opportuno domandarci “quanto costerebbero le apparecchiature ed i costi ad esse associati?”. Per rispondere ad una tale domanda abbiamo contattato diverse aziende fornitrici ottenendo delle cifre orientative, che però ci possono aiutare a delineare uno schema riassuntivo economico. Data l'importanza del sistema e dato che un evento come lo tsunami è particolarmente raro, emerge che i costi devono essere valutati in riferimento ad una finestra temporale opportunamente grande, in particolare deve essere considerato pari alla **vita utile** delle sue componenti tecniche, ossia il periodo temporale dopo il quale le componenti a parte un valore residuo sono da sostituire. Dato che i costi che abbiamo ricavato sono però ciclici, ci è sembrato opportuno mostrare nella tabella sottostante una finestra temporale di 5 anni, tenendo in considerazione il fatto che lo tsunameter ha bisogno di manutenzione dopo un minimo di 4 anni. Infatti ciò ci consente di poter inserire anche i costi di manutenzione dello tsunameter (durata minima 4 anni), considerando il caso peggiore ossia che una manutenzione sia necessaria allo scadere del quarto anno; inoltre tali apparecchiature (specialmente quelle in acqua) hanno costi di acquisto molto elevati ed è per tale motivo che una possibilità può essere quella di utilizzare uno Tsunami Warning System anche come sistema continuo di monitoraggio di dati meteo-marini e/o sismici.

La tabella sottostante riassume tutte le voci dei costi che devono essere sostenuti nei due casi durante un arco temporale di cinque anni:

- nel caso GPS-Shield Arrays il costo di una singola boa GPS più tsunameter è di circa 250.000\$ ossia circa 193.528,41 Euro ed è prevista una spesa di manutenzione annua di 125.000\$ ossia circa 96.764,2 Euro (da considerare tale anche nel caso di più boe), tale manutenzione prevede essenzialmente il costo di recupero e/o messa in acqua della strumentazione ed è per questo che è stata prevista per il primo anno per la costituzione dell'array, nel terzo anno per la manutenzione della boa e nel quinto anno soprattutto per la manutenzione dello tsunameter. Il costo totale è ottenuto considerando un array formato da due boe GPS.

- nel caso della tecnica RD il costo di una singola stazione permanente GPS compresa di manutenzione per una finestra temporale di cinque anni è di circa 40.000 Euro; in questo caso il costo totale è ottenuto considerando la rete composta da 38 stazioni.

		I ANNO	II ANNO	III ANNO	IV ANNO	V ANNO
TECNICA GPS-SHIELD ARRAYS	COSTO UNITARIO (Euro)	193.528,41	0,00	0,00	0,00	0,00
	2 BOE	387.056,82	0,00	0,00	0,00	0,00
	MANUTENZIONE (Euro)	96.764,20	0,00	96.764,20	0,00	96.764,20
	TOTALE ANNUO	483.821,02	0,00	96.764,20	0,00	96.764,20
TOTALE		677.349,43				
TECNICA RD	COSTO UNITARIO (Euro)	39.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	38 STAZIONI	1.482.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MANUTENZIONE (Euro)	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
	TOTALE ANNUO	1.492.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
TOTALE		1.532.000,00				

**Tabella 6.3: Schema economico delle due tecnologie a confronto**

Questi valori indicati nella **Tabella 6.3** ci servono esclusivamente per capire quali costi dobbiamo affrontare, ma prima di effettuare qualsiasi confronto occorre che fissiamo un'opportuna finestra temporale e calcoliamo un Valore Attuale Netto (VAN) in un arco temporale di 20 anni. Trattandosi di una semplificata analisi costi-benefici ed in particolare di un'analisi finanziaria dobbiamo attualizzare i costi all'anno zero, utilizzando un fattore

di sconto pari al 5% (come da letteratura) tramite la seguente formula, in cui  $i = 5\%$  e  $n = 0-19$ .

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{S_0}{(1+i)^0} + \frac{S_1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n}$$

		FLUSSI DI CASSA	n	ATTUALIZZAZIONE
TECNICA GPS-SHIELD ARRAYS	I ANNO	-483.821,02	0	<b>-483.821,02</b>
	II ANNO	0,00	1	0,00
	III ANNO	-96.764,20	2	<b>-87.767,99</b>
	IV ANNO	0,00	3	0,00
	V ANNO	-96.764,20	4	<b>-79.608,15</b>
	VI ANNO	0,00	5	0,00
	VII ANNO	-96.764,20	6	<b>-72.206,94</b>
	VIII ANNO	0,00	7	0,00
	IX ANNO	-96.764,20	8	<b>-65.493,82</b>
	X ANNO	0,00	9	0,00
	XI ANNO	-96.764,20	10	<b>-59.404,83</b>
	XII ANNO	0,00	11	0,00
	XIII ANNO	-96.764,20	12	<b>-53.881,93</b>
	XIV ANNO	0,00	13	0,00
	XV ANNO	-96.764,20	14	<b>-48.872,50</b>
	XVI ANNO	0,00	15	0,00
	XVII ANNO	-96.764,20	16	<b>-44.328,80</b>
	XVIII ANNO	0,00	17	0,00
	XIX ANNO	-96.764,20	18	<b>-40.207,53</b>
	XX ANNO	0,00	19	0,00
	<b>VAN</b>	<b>-1.035.593,50</b>		

**Tabella 6.4: VAN della tecnica GPS-Shield Arrays**

		FLUSSI DI CASSA	n	ATTUALIZZAZIONE
TECNICA RD	I ANNO	-1.492.000,00	0	-1.492.000,00
	II ANNO	-10.000,00	1	-9.523,81
	III ANNO	-10.000,00	2	-9.070,29
	IV ANNO	-10.000,00	3	-8.638,38
	V ANNO	-10.000,00	4	-8.227,02
	VI ANNO	-10.000,00	5	-7.835,26
	VII ANNO	-10.000,00	6	-7.462,15
	VIII ANNO	-10.000,00	7	-7.106,81
	IX ANNO	-10.000,00	8	-6.768,39
	X ANNO	-10.000,00	9	-6.446,09
	XI ANNO	-10.000,00	10	-6.139,13
	XII ANNO	-10.000,00	11	-5.846,79
	XIII ANNO	-10.000,00	12	-5.568,37
	XIV ANNO	-10.000,00	13	-5.303,21
	XV ANNO	-10.000,00	14	-5.050,68
	XVI ANNO	-10.000,00	15	-4.810,17
	XVII ANNO	-10.000,00	16	-4.581,12
	XVIII ANNO	-10.000,00	17	-4.362,97
	XIX ANNO	-10.000,00	18	-4.155,21
	XX ANNO	-10.000,00	19	-3.957,34
	VAN	-1.612.853,21		

Tabella 6.5: VAN della tecnica RD

Dalla **Tabella 6.3** emerge, ad un primo confronto, che la tecnica RD (Rapid Determination) ha un impatto economico pari a circa il doppio della tecnica GPS-Shield, anche se considerata nella configurazione minima dell'array (ossia composto da solo due

stazioni), mentre nell'altro caso sono state considerate tutte le 38 stazioni permanenti; la motivazione è data dal fatto che mentre per GPS-Shield l'accuratezza necessaria può essere raggiunta con due sole boe-GPS nell'altro caso occorre tutta la rete per raggiungere gli obiettivi. Se osserviamo la **Tabella 6.4** e la **Tabella 6.5**, in cui abbiamo utilizzato il calcolo del VAN in una finestra temporale di venti anni, ci rendiamo conto che la spesa sostenuta all'anno zero per le due tecniche è dello stesso ordine, ma dovendo scegliere con la tecnica del confronto del VAN, dovremmo optare per quella con VAN positivo più alto che in questo caso equivale a scegliere quello minore (essendo state considerate solo le spese con segno negativo per indicare il flusso di cassa).

Però bisogna considerare che la scelta fino a qui valutata economicamente è quella che prevede la configurazione minima ossia una configurazione che consentirebbe la copertura di una sola zona delle tre evidenziate nel paragrafo 4.6; infatti ora confrontiamo le spese, qualora decidessimo di coprire tutte le tre zone: per la tecnica GPS-Shield si traduce nell'acquisto di 6 boe-GPS (due per ciascuna zona), mentre per la tecnica RD nell'acquisto di altre due reti ciascuna formata da 38 stazioni (per un totale di 114 stazioni), in cui per ognuna sono state considerate invariate le spese di manutenzione (considerando la possibilità di un unico contratto di manutenzione).

		I ANNO	II ANNO	III ANNO	IV ANNO	V ANNO
TECNICA GPS-SHIELD ARRAYS	COSTO UNITARIO (Euro)	193.528,41	0,00	0,00	0,00	0,00
	6 BOE	1.161.170,46	0,00	0,00	0,00	0,00
	MANUTENZIONE (Euro)	96.764,20	0,00	96.764,20	0,00	96.764,20
	TOTALE ANNUO	1.257.934,66	0,00	96.764,20	0,00	96.764,20
TOTALE		1.451.463,07				
TECNICA RD	COSTO UNITARIO (Euro)	39.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	114 STAZIONI	4.446.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	MANUTENZIONE (Euro)	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
	TOTALE ANNUO	4.456.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
TOTALE		4.496.000,00				

**Tabella 6.6: Schema economico delle due tecnologie a confronto (GPS-Shield con 6 stazioni e RD con 114 stazioni permanenti)**



		FLUSSI DI CASSA	n	ATTUALIZZAZIONE
TECNICA GPS-SHIELD ARRAYS	I ANNO	-1.257.934,66	0	<b>-1.257.934,66</b>
	II ANNO	0,00	1	0,00
	III ANNO	-96.764,20	2	<b>-87.767,99</b>
	IV ANNO	0,00	3	0,00
	V ANNO	-96.764,20	4	<b>-79.608,15</b>
	VI ANNO	0,00	5	0,00
	VII ANNO	-96.764,20	6	<b>-72.206,94</b>
	VIII ANNO	0,00	7	0,00
	IX ANNO	-96.764,20	8	<b>-65.493,82</b>
	X ANNO	0,00	9	0,00
	XI ANNO	-96.764,20	10	<b>-59.404,83</b>
	XII ANNO	0,00	11	0,00
	XIII ANNO	-96.764,20	12	<b>-53.881,93</b>
	XIV ANNO	0,00	13	0,00
	XV ANNO	-96.764,20	14	<b>-48.872,50</b>
	XVI ANNO	0,00	15	0,00
	XVII ANNO	-96.764,20	16	<b>-44.328,80</b>
	XVIII ANNO	0,00	17	0,00
	XIX ANNO	-96.764,20	18	<b>-40.207,53</b>
	XX ANNO	0,00	19	0,00
	<b>VAN</b>	<b>-1.809.707,14</b>		

Tabella 6.7: VAN della tecnica GPS-Shield Arrays con 6 stazioni

		FLUSSI DI CASSA	n	ATTUALIZZAZIONE
TECNICA RD	I ANNO	-4.456.000,00	0	-4.456.000,00
	II ANNO	-10.000,00	1	-9.523,81
	III ANNO	-10.000,00	2	-9.070,29
	IV ANNO	-10.000,00	3	-8.638,38
	V ANNO	-10.000,00	4	-8.227,02
	VI ANNO	-10.000,00	5	-7.835,26
	VII ANNO	-10.000,00	6	-7.462,15
	VIII ANNO	-10.000,00	7	-7.106,81
	IX ANNO	-10.000,00	8	-6.768,39
	X ANNO	-10.000,00	9	-6.446,09
	XI ANNO	-10.000,00	10	-6.139,13
	XII ANNO	-10.000,00	11	-5.846,79
	XIII ANNO	-10.000,00	12	-5.568,37
	XIV ANNO	-10.000,00	13	-5.303,21
	XV ANNO	-10.000,00	14	-5.050,68
	XVI ANNO	-10.000,00	15	-4.810,17
	XVII ANNO	-10.000,00	16	-4.581,12
	XVIII ANNO	-10.000,00	17	-4.362,97
	XIX ANNO	-10.000,00	18	-4.155,21
	XX ANNO	-10.000,00	19	-3.957,34
	VAN	-4.576.853,21		

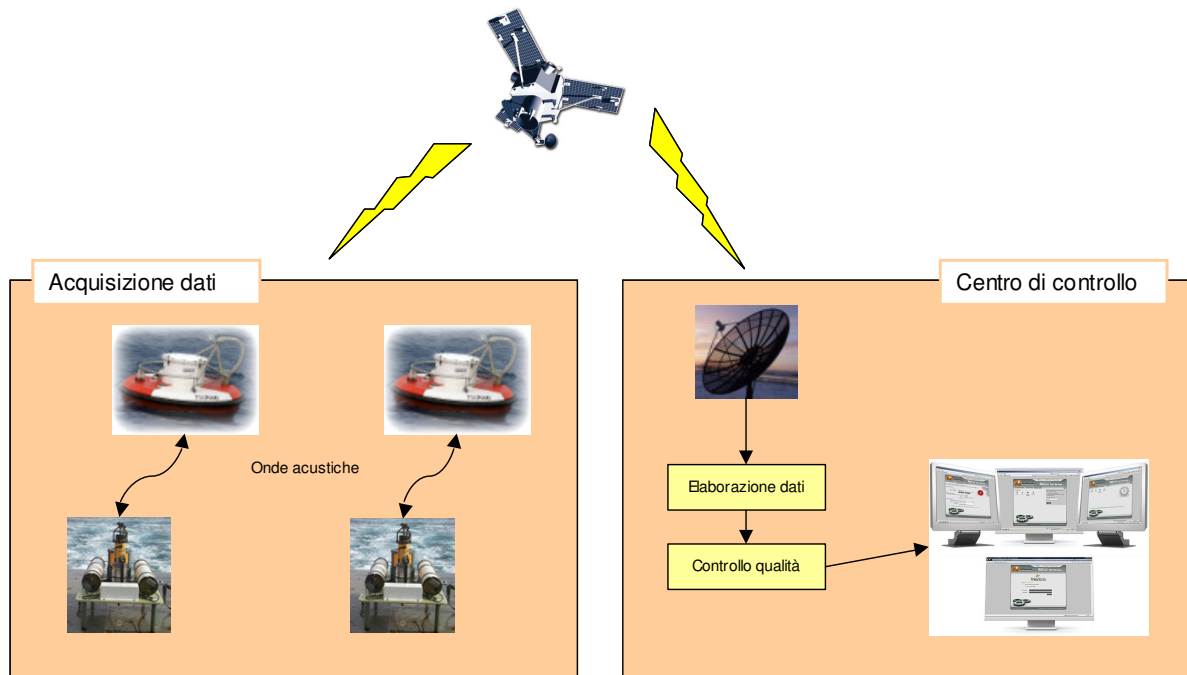
Tabella 6.8: VAN della tecnica RD con 114 stazioni

Questa ultima considerazione ci suggerisce il fatto che il trend dell'aumento dei costi nelle due tecniche è notevolmente diverso; infatti questo aspetto è dovuto essenzialmente alla diversità della spesa nei due casi: se decidessimo di implementare la tecnica GPS-Shield la

spesa non sarebbe composta solo dall'acquisto, ma anche dalla manutenzione delle attrezzature, che come possiamo notare dalla tabella sono una parte considerevole della spesa (i costi sono così elevati, poiché le componenti sono in mare e per questo motivo la manutenzione prevede il trasporto tramite nave); invece se decidessimo di utilizzare l'altra tecnica allora la spesa sarebbe quasi tutta composta dall'acquisto, dato che la manutenzione è praticamente trascurabile. Quindi considerando l'implementazione di un sistema che garantisca la sicurezza in tutte e tre le zone delineate, dalle tabelle emerge chiaramente che dovremmo scegliere la tecnica GPS-Shield Arrays.

## **6.4 STRUTTURA GENERALE E SUE APPLICAZIONI**

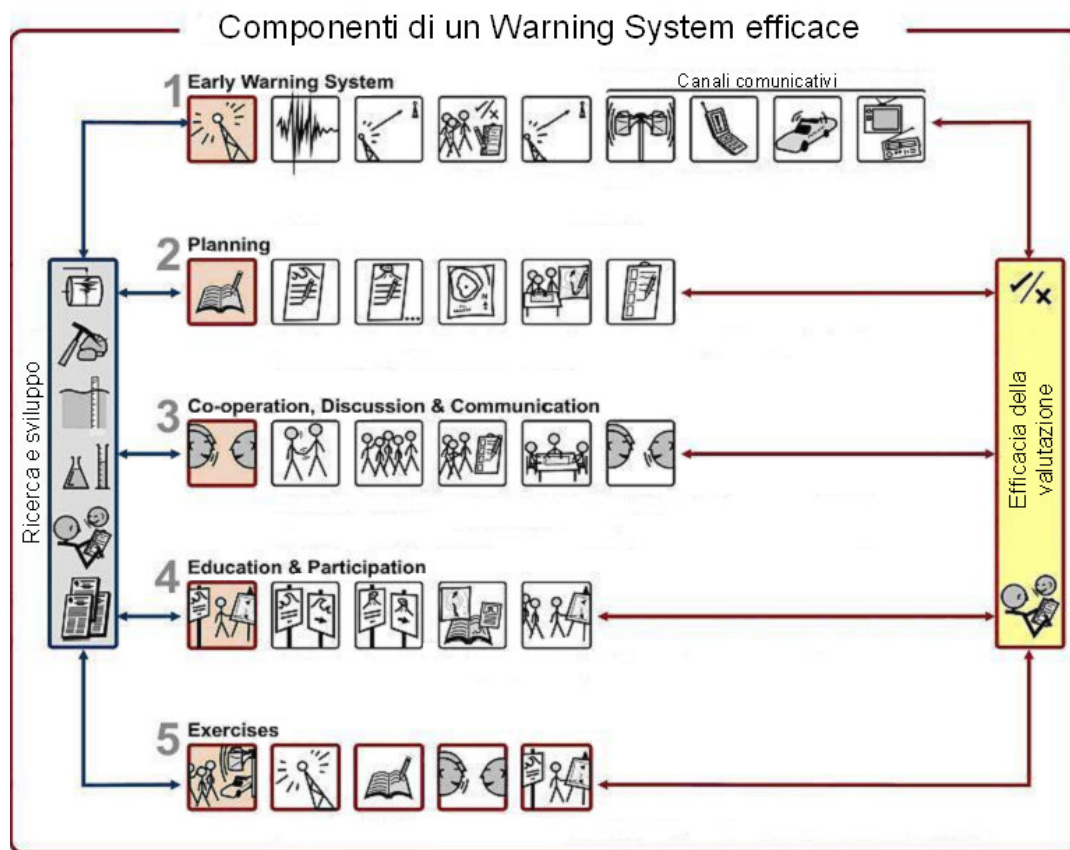
Ora che abbiamo analizzato le due possibili tecnologie per poter ottenere i dati necessari alla previsione del fenomeno dello tsunami, come ultimo studio passiamo a definire l'ipotetica struttura generale del Warning System per poi introdurre qualche applicazione. Il sistema può essere pensato come l'unione/integrazione di tre componenti diverse: la prima formata dalle componenti tecniche che acquisiscono i dati (boe-GPS e/o stazioni permanenti GPS), la seconda dalle comunicazioni necessarie al trasferimento dei dati e la terza dal centro di controllo che utilizzerà le informazioni ricevute per possibili applicazioni e nel caso di tsunami comunicherà l'allarme; poiché la struttura sarebbe del tutto analoga, mostriamo nella figura sottostante solo il caso di GPS-Shield Arrays, in cui possiamo notare le tre parti che si integrano in un unico sistema tale da poter trasferire i dati acquisiti anche a Km di distanza presso un centro di controllo in grado di poter attuare le azioni più opportune.



**Figura 6.5: Schema generale del Warning System**

Il flusso informativo che giunge al centro di controllo deve essere sottoposto alla verifica di qualità per assicurarci la correttezza dei dati ed in modo da evitare “falsi allarmi”; infatti il Warning System non termina con la rilevazione del fenomeno, ma comprende tutte quelle possibili applicazioni per rendere effettive ed efficaci le azioni che verrebbero attuate. Una delle possibili applicazioni è di creare degli accordi nazionali ed internazionali con uno o più gestori delle reti mobili, in modo tale (in caso di necessità) da utilizzare il canale GSM/UMTS per notificare l’eventuale rischio presente in una zona; infatti il flusso logico sarebbe il seguente: ricevuti ed elaborati i dati, il sistema è in grado di determinare fra quanto tempo e dove lo tsunami potrà colpire e a questo punto l’operatore telefonico invierà ad esempio SMS a tutti coloro che sono nelle zone interessate e questo è possibile grazie al fatto che il gestore invierà messaggi broadcast alla cella radiomobile interessata. Chiaramente la notifica può essere instradata attraverso uno o più canali quali ad esempio gli altoparlanti in zone pubbliche, megafoni mobili, televisione, radio...; inoltre questo risulterebbe come un’unica componente del sistema. Infatti, un’altra componente che rende effettivo il sistema è la pianificazione tramite la quale si creano delle procedure per aiutare il personale tecnico a prendere delle decisioni o si scelgono in anticipo alcune strategie (ad esempio valori di soglia, mappe di evacuazione, percorsi, relazioni organizzative e canali di comunicazione). Altro elemento fondamentale è la cooperazione, discussione e

comunicazione fra diverse nazioni e continenti, ma soprattutto fra i diversi enti preposti alla salvaguardia in modo tale da poter scegliere un comune percorso. È opportuno prevedere anche corsi di educazione e formazione sul fenomeno, sul comportamento da seguire in casi di evacuazione e/o di panico ed infine preparare e realizzare simulazioni e scenari da sottoporre alle comunità per poter ottenere dei *feedback*; a tutte tali applicazioni e sinergie devono giungere gli ausili della scienza e quindi del settore “ricerca e sviluppo”, in modo tale da fornire tutti i risultati per stimare l’efficacia della valutazione. Lo schema sottostante riassume tutte le considerazioni sopra esposte e mostra il flusso logico.



**Figura 6.6: Schema generale di un efficace Warning System**

## 7. CONCLUSIONI

Abbiamo visto che la progettazione di un Warning System da tsunami è una tematica enormemente complessa, dovuto al fatto che non si tratta di prevedere un evento naturale qualsiasi, ma di prevedere un evento che può avere degli effetti catastrofici; per questo motivo abbiamo già detto che il sistema deve essere formato e costituito dalle più recenti tecnologie ed innovazioni, soprattutto per riuscire a diminuire la percentuale di errore e ad aumentare i tempi che si avrebbero a disposizione per intraprendere una qualsiasi azione. Per ciò è stato definito il sistema anche da un livello di astrazione maggiore, ossia oltre la mera previsione dell'evento, che comprende tutte quelle attività che possono servire a pianificare e prevedere le azioni da eseguire in caso di necessità e di allarme. La scelta fra le due tecniche, che possono essere usate come modello di previsione, è stata ottenuta facendo un'analisi tecnica ed una economica; infatti per poterle ordinare tra loro è necessario identificare delle priorità. Dall'analisi tecnica è emerso che la differenza sostanziale è che se decidessimo di utilizzare la tecnica RD, significherebbe adoperare delle strumentazioni che possono essere già in uso o che comunque richiedono una gestione molto più semplice già per il solo fatto di non essere in acqua. Se però tale tecnica può sembrare più "conveniente" dal punto di vista della sua gestione, l'altra offre una maggiore informazione, dato che non solo si trova in una posizione in cui la sua acquisizione dei dati può risultare migliore, ma che in più dispone di uno strumento (lo tsunameter) che sfruttando la maggiore celerità delle onde sismiche può offrire un servizio di controllo/conferma (ossia può avvisare o smentire l'arrivo di uno tsunami); inoltre a favore della tecnica GPS-Shield Array c'è la velocità di elaborazione ed acquisizione dei dati.

Oltre a questo aspetto, abbiamo notato che effettuando un confronto tramite i VAN la tecnica GPS-Shield Array risulta essere più vantaggiosa economicamente, specialmente se consideriamo la seconda ipotesi fatta, ossia quella di voler coprire tutte le tre SZ.

A questo punto assunto che scegliamo di utilizzare alla base del Warning System la tecnica GPS-Shield Array, le conclusioni possono essere due; la prima prevede un minor impatto economico del sistema, ossia cerchiamo di minimizzare i costi. Per far questo siamo costretti a scegliere di implementare un array di due soli elementi, ma la domanda è "dove poniamo le due boe GPS?"; infatti dallo studio condotto in questa tesi emerge che le zone pericolose per le coste italiane all'interno del bacino del mediterraneo sono tre, ma ci

troveremmo nella situazione di dover scegliere. La scelta deve ricadere sulla SZ più pericolosa e più rischiosa per le nostre coste e quindi la scelta ricade sulla SZ dell'arco ellenico, questo perché le altre due SZ nonostante generino tsunami più vicini a noi, sono caratterizzate da tsunami con onde molto più basse. Seguendo quanto abbiamo appreso le due boe devono essere collocate sulla rupture zone e di conseguenza occorreranno i permessi necessari a collocare la strumentazione in zone straniere.

L'altra conclusione invece, non preoccupandoci dei costi, prevede la soluzione migliore per la corretta realizzazione del Warning System ossia l'implementazione di sei boe GPS, di cui due su ogni SZ; in questo modo le nostre coste italiane sarebbero protette da tutte le tre eventualità di tsunami. Questa conclusione chiaramente fa aumentare di molto i costi necessari alla sua realizzazione: passeremmo da un valore attualizzato netto pari a **1.000.000 Euro** a **1.800.000 Euro**; inoltre dato che in entrambe le conclusioni ci si troverebbe a dover inserire delle boe in territori al di fuori dei confini italiani, allora conviene perseguire questa seconda conclusione, cercando però di coinvolgere altri Stakeholders (possibilmente stranieri) nella realizzazione di un sistema "comunitario".

Un'ultima considerazione ricade proprio sulla necessità che in un futuro tale sistema possa essere frutto delle attività condotte da più Stakeholders non solo per un discorso di abbattimento dei costi, ma per realizzare un Warning System che non copra esclusivamente tre zone, ma che possa coprire tutte le zone in cui esiste un rischio da tsunami (realizzazione di un sistema pan-europeo); inoltre questi costi elevati devono essere visti come un investimento di partenza per cercare in futuro di realizzare un sistema che abbia minori costi di realizzazione e manutenzione, ma la stessa o maggiore precisione di quello pensato in questa tesi. Queste ultime affermazioni aprono numerosi punti che dovrebbero essere oggetto di ulteriori studi, quali ad esempio la possibilità di sfruttare la telemetria e/o le immagini ad alta risoluzione da satellite per acquisire i dati e la necessità di condurre un'analisi costi-benefici di un tale sistema.

## 8. LISTA ACRONIMI

<b>ABR</b>	Answer Bid Ratio
<b>ASR</b>	Answer Seizure Ratio
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>DPC</b>	Dipartimento Protezione Civile
<b>GLONASS</b>	GLObal NAvigation Satellite System
<b>GLOSS</b>	Global Sea Level Observing System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GOS</b>	Grade Of Service
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>INGV</b>	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
<b>IOC</b>	Intergovernmental Oceanographic Commission
<b>IODE</b>	International Oceanographic Data and Information Exchange
<b>MCE</b>	Maximum Credible Earthquake
<b>MFSK</b>	Multiple Frequency-Shift Keying
<b>MPLS</b>	Multi Protocol Label Switching
<b>MVPN</b>	Mobile Virtual Private Network
<b>ODINAFRICA</b>	Ocean Data Information Network for Africa
<b>PPS</b>	Precise Positioning System
<b>PSI</b>	Pound per Square Inches
<b>RMS</b>	Root Mean Square



<b>SA</b>	Selective Availability
<b>SRCT</b>	Sistema di Riferimento Convenzionale Terrestre
<b>SZ</b>	Source Zone
<b>TF</b>	Typical Fault
<b>TWSP</b>	Tsunami Warning System in the Pacific
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinate
<b>VLIZ</b>	Flanders Marine Institute
<b>CPSM</b>	Centro Previsioni e Segnalazione Maree
<b>ISPRA</b>	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
<b>IP</b>	Internet Protocol

## BIBLIOGRAFIA

- [1] “*Tsunami early warning using GPS-Shield arrays*”, S.V. Sobolev, A.Y. Babeyko, R. Wang, A. Hoechner, R. Galas, M. Rothacher, D.V. Sein, J. Schröter, J. Lauterjung, C. Subarya, *J. Geophys. Res. Vol.112*, 25 Agosto 2007
- [2] “*Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea: Scenarios of potential threats to Southern Italy*”, S. Lorito, M.M. Tiberti, R. Basili, A. Piatanesi, G. Valensise, *J. Geophys. Res. Vol.113*, 9 Gennaio 2008
- [3] “*Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems*”, G. Blewitt, C. Kreemer, W.C. Hammond, H.P. Plag, S. Stein, E. Okal, *J. Geophys. Res. Vol.33*, 13 Giugno 2006
- [4] “*The 26 December 2004 tsunami source estimated from satellite radar altimetry and seismic waves*”, Y.T. Song, C.Ji, L.L. Fu, V. Zlotnicki, C.K. Shum, Y. Yi, V. Hjorleifsdottir, *J. Geophys. Res. Vol.32*, 18 Ottobre 2005
- [5] “*Global and regional tsunami early warning systems*”, Laura S. L. Kong, *International Tsunami Information Centre, Hawaii, USA*
- [6] “*Lo Tsunami:Il fenomeno, le sue caratteristiche e la sua presenza lungo le coste italiane*”, T. Pinat, F. Romanelli, G.F. Panza, <http://ulisse.sissa.it>
- [7] “*Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C. – 2000 A.D.*”, S.L. Soloviev, O.N. Solovieva, C.N. Go, K.S. Kim, N.A. Shchetnikov, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 2000
- [8] “*Acquisition and quality assurance of DART data*”, M.C. Eble, S.E. Stalin, E.F. Burger, *Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, Washington, USA*, 2001
- [9] “*Early detection and real-time reporting of deep-ocean tsunamis*”, E.N. Bernard, F.I. González, C. Meinig, H.B. Miliburn, *Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, Washington, USA*, 2001
- [10] “*Real-Time Tsunamis Forecasting: Challenges and Solutions*”, V.V. Titov, F.I. González, E.N. Bernard, M.C. Eble, H.O. Mofjeld, J.C. Newman, A.J. Venturato, *Kluwer Academic Publishers, Netherlands*, 25 Settembre 2003

- 
- [11] “*Technology Developments in Real-Time Tsunami Measuring, Monitoring and Forecasting*”, C. Meinig, S.E. Stalin, A.I. Nakamura, F.I. González, H.B. Milburn, *Pacific Marine Environmental Laboratory*, Seattle, Washington, USA, 2006
- [12] “*The NTHMP Tsunameter Network*”, F.I. González, E.N. Bernard, C. Meinig, M.C. Eble, H.O. Mofjeld, S. Stalin, *Pacific Marine Environmental Laboratory*, Seattle, Washington, USA, 2005
- [13] <http://www.idromare.it/struttura.php>
- [14] <http://gsmworld.com/technology/roaming/gsminfo/index.htm>
- [15] <http://www.vliz.be/gauges/map.php>
- [16] [http://www.geocities.com/elidoro/tsunami/ts\\_descrizione.html](http://www.geocities.com/elidoro/tsunami/ts_descrizione.html)
- [17] “*Codice delle comunicazioni elettroniche*”,  
[http://www.comunicazioni.it/binary/min\\_comunicazioni/normativa/codice\\_comunicazioni.pdf](http://www.comunicazioni.it/binary/min_comunicazioni/normativa/codice_comunicazioni.pdf)