

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

R.U.P. : Ing. Salvatore Acquista

OPERA

PORTO DI PALERMO - ARENELLA COMPLETAMENTO MOLO FORANEO PORTO ARENELLA

CUP: I71J19000040005 (OPERA PNRR)
CIG: 9073719DC8

LIVELLO DI PROGETTAZIONE

PROGETTO ESECUTIVO

ELABORATO

RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

PROGETTAZIONE



Direzione tecnica:
ING. ELIO CIRALLI

Coordinamento:
ING. GIANCARLO INSERRA

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:
ING. SALVATORE ACQUISTA

AREA TECNICA:
ING. LEONARDO TALLO

ELABORATO B.01	SCALA --	NS. RIF. B.01_RIM_v001- XXmag2022.docx	COMMESSA - NN. A4 2022ARE - 73	
DATA 20 maggio 2022	REVISIONE 01	REDATTORE VV	CONTROLLO GI	APPROVAZIONE EC

A TERMINI DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO, CON DIVIETO DI RIPRODURLO, ANCHE IN PARTE, O DI RENDERLO NOTO A TERZI SENZA LE NECESSARIE AUTORIZZAZIONI

INDICE DEI CONTENUTI

1	GENERALITÀ	ERRORE. IL SEGNA LIBRO NON È DEFINITO.
1.1	PREMESSA	ERRORE. IL SEGNA LIBRO NON È DEFINITO.
1.2	IL CORPO DOCUMENTALE	ERRORE. IL SEGNA LIBRO NON È DEFINITO.
1.3	FINALITÀ DELL'ELABORATO.....	5
2	CARATTERISTICHE FISICHE DEL PARAGGIO	9
2.1	INQUADRAMENTO DEL PARAGGIO	9
2.2	MORFOLOGIA E BATIMETRIE	9
2.3	FETCH GEOGRAFICO.....	12
2.4	FETCH EFFICACI	12
2.5	VERIFICA DI ADATTABILITÀ DEI DATI ONDAMETRICI DISPONIBILI.....	14
3	COMPONENTI METEOCLIMATICHE MARITTIME	16
3.1	VENTO.....	16
4	CORRENTI	17
4.1	LE CORRENTI DI GRADIENTE	17
4.2	LE CORRENTI DI DERIVA	17
4.3	LA DIREZIONE DELLA CORRENTE	18
4.4	CIRCOLAZIONE GENERALE	18
4.5	CIRCOLAZIONE NEL MAR MEDITERRANEO.....	18
5	CLIMA D'ONDA A LARGO DEL PARAGGIO	20
5.1	PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO	20
5.2	FORMA ANALITICA DELLA PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO.....	20
5.3	PERIODI	22
5.4	DURATA DELLE MAREGGIATE	22
6	EVENTI ESTREMI A LARGO DEL PARAGGIO	24
6.1	STUDI DI SUPPORTO AL PRP DEL 2018	24
7	BASI DI DATI ONDAMETRICI ELABORATE	27
7.1	BOA R.O.N. DI CAPO GALLO	28
7.1.1	Esame dei dati	30
7.1.2	Verifica di adattabilità della base dati acquisita	30
7.1.3	Clima ondoso e durata delle mareggiate	34
7.1.4	Eventi estremi al largo per l'“Approccio A”	34
7.1.5	Mareggiate al largo per l'“Approccio B”	36
7.1.6	Confronto con altri studi.....	37
7.2	SERIE METEOCEAN (1979-2017).....	40
7.2.1	Esame dei dati.....	41
7.2.2	Verifica di adattabilità della base dati acquisita	44
7.2.3	Clima ondoso e durata delle mareggiate	48
7.2.4	Eventi estremi.....	48
7.2.5	Confronto con altri studi.....	49
7.3	CONCLUSIONI.....	50
8	ANALISI DEI LIVELLI IDRICI	52
8.1	LE MAREE.....	52
8.1.1	Indagine storica sui livelli idrici.....	53
8.1.2	Marea astronomica locale	54
8.2	ELEVAZIONE PER VENTO	55



8.3	ELEVAZIONE PER GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA	56
8.4	ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP).....	58
8.5	CAMBIAMENTO CLIMATICO E LIVELLI DEL MARE	60
8.5.1	Previsioni sul livello medio marino	60
8.6	CONSIDERAZIONI FINALI SUI LIVELLI IDRICI DA CONSIDERARE	63
9	TRASFORMAZIONE DEL CLIMA D'ONDA VERSO RIVA.....	65
9.1	LA RIFRAZIONE E LO SHOALING.....	65
9.2	MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO.....	65
9.2.1	Generalità sul modello	65
9.2.2	Equazioni di governo	66
9.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	68
9.4	SIMULAZIONE NUMERICHE ESEGUITE.....	70
9.5	PROPAGAZIONE DELLE ONDE ESTREME DIREZIONALI	70
9.6	PROPAGAZIONE DEL CLIMA MARITTIMO SOPRA SOGLIA ED ANALISI DEGLI ESTREMI OMNIDIREZIONALI.....	70
9.7	FRANGIMENTO	73

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 2-1:	ROTTI DI NAVIGAZIONE DEL RILIEVO MULTIBEAM DEL 2021 (FONTE: ARENA SUB SRL)	9
FIGURA 2-2:	IMMAGINE SATELLITARE CON IL PARAGGIO DELL'ARENELLA (DA GOOGLE EARTH)	10
FIGURA 2-3:	T.3B CARTA MORFOLOGICO-BATIMETRICA (FONTE: ARENA SUB SRL - 2021)	11
FIGURA 2-4:	DIREZIONE DEI VENTI CON FREQUENZE DI OCCORRENZA MAGGIORE DEL 10% (FONTE: MEDATLAS).....	13
FIGURA 2-5:	DISTANZE DI MARE LIBERO PER IL PORTO DELL'ARENELLA	13
FIGURA 2-6:	DIAGRAMMI DEI FETCH GEOGRAFICO ED EFFICACE PER IL PARAGGIO DI ARENELLA.....	15
FIGURA 11-1:	CORRENTI SUPERFICIALI NEI MARI ITALIANI	19
FIGURA 6-1:	ANALISI OMNIDIREZIONALE DELLE ONDE ESTREME (DATI MET.OFFICE, 1991-2002).....	25
FIGURA 6-2:	ROSA DEL MARE NEL PUNTO DI CONTROLLO 2 (PRP 2018)	26
FIGURA 6-3:	LOCALIZZAZIONE DEI PUNTI SOTTOCOSTA IN CUI È STATO TRASFERITO IL CLIMA ONDOSO (PRP 2018).....	26
FIGURA 7-1:	POSIZIONE DELLE STAZIONI DI DATI ONDAMETRICI UTILIZZATE	27
FIGURA 7-2:	FETCH GEOGRAFICI PER LA BOA R.O.N. CAPO GALLO (PALERMO)	28
FIGURA 7-3:	BOA R.O.N. CAPO GALLO, REGIME ONDOSO ANNUALE	29
FIGURA 7-4:	BOA R.O.N. DI CAPO GALLO: ALTEZZE SIGNIFICATIVE (H_{M0}) PER CLASSI DI PERIODO MEDIO (T_M).....	29
FIGURA 7-5:	RON CAPO GALLO, FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI	31
FIGURA 7-6:	RON CAPO GALLO, CONFRONTO TRA I FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI	32
FIGURA 7-7:	RON CAPO GALLO, COEFFICIENTI DI TRASPOSIZIONE KH E KT.....	33
FIGURA 7-8:	BOA R.O.N. CAPO GALLO, CURVE DI PROBABILITÀ $P(H_s > H)$ DEL PARAGGIO E CURVA DELLE DURATE.....	34
FIGURA 7-10:	BOA R.O.N. "CAPO GALLO", EVENTI ESTREMI E RELATIVE DURATE AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO (R).....	35
FIGURA 7-9:	BOA R.O.N. "CAPO GALLO", EVENTI ESTREMI E DURATE PER DATI TEMPI DI RITORNO	35
FIGURA 7-11:	ESEMPIO DI SEQUENZA DI DATI ONDAMETRICI PER SELEZIONE DELLE MAREGGIATE CON METODO POT.....	37
FIGURA 7-12:	ALTEZZE D'ONDA MASSIME ANNUALI AL LARGO: R.O.N. CAPO GALLO, FONTE ENEA 2017	38
FIGURA 7-13:	ALTEZZE D'ONDA AL PICCO DI MAREGGIATA MAGGIORI DI 3.0 M AL LARGO: R.O.N. CAPO GALLO, ENEA 2017	38
FIGURA 7-14:	EVENTI ESTREMI BOA RON CAPO GALLO DA ENEA 2017	39
FIGURA 7-15:	FETCH GEOGRAFICI PER IL PUNTO METEOCEAN 8153	41
FIGURA 7-16:	METEOCEAN 8153, ALTEZZE SIGNIFICATIVE (H_{M0}) PER CLASSI DI PERIODO MEDIO (T_M).....	43
FIGURA 7-17:	METEOCEAN 8153, REGIME ONDOSO ANNUALE	43
FIGURA 7-18:	METEOCEAN 8153, FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI.....	45
FIGURA 7-19:	METEOCEAN 8153, CONFRONTO TRA I FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI.....	46
FIGURA 7-20:	METEOCEAN 8153, COEFFICIENTI DI TRASPOSIZIONE KH E KT	47
FIGURA 7-21:	BOA R.O.N. CAPO GALLO, CURVE DI PROBABILITÀ $P(H_s > H)$ DEL PARAGGIO E CURVA DELLE DURATE.....	48
FIGURA 7-22:	METEOCEAN 8153, EVENTI ESTREMI E DURATE PER DATI TEMPI DI RITORNO	48
FIGURA 7-23:	METEOCEAN 8153, EVENTI ESTREMI E RELATIVE DURATE AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO (R)	49
FIGURA 7-24:	METEOCEAN 8153, EVENTI ESTREMI OMNIDIREZIONALI COL METODO DEI MASSIMI ANNUALI	49
FIGURA 8-1:	STAZIONE MAREOGRAFICA R.M.N. "PALERMO SANTA CHIARA"	53
FIGURA 8-2:	RILEVAMENTI MAREOGRAFICI CONDOTTI A PALERMO (NEL PERIODO 01/11/2014-24/11/2015)	54

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



FIGURA 8-3: MISURE BAROMETRICHE RILEVATE NEL SITO RMN DI PALERMO PER IL PERIODO 2010-2015	56
FIGURA 8-4: IL MEDICANE "ZORBAS", 28/29 SETTEMBRE 2018.....	57
FIGURA 8-5: CLASSIFICAZIONE DELLE TEMPESTE NEL MAR MEDITERRANEO	57
FIGURA 8-6: PROIEZIONI DELLE VARIAZIONI DI TEMPERATURA E LIVELLI IDRICI (FONTE: IPCC AR5, 2014)	61
FIGURA 8-7: PREVISIONI DEI LIVELLI IDRICI PER L'EUROPA PER IL 21° SECOLO (FONTE: EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY)	63
FIGURA 9-1 – DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO	67
FIGURA 9-2: BATIMETRIE DEI FONDALI DEL PARAGGIO IN STUDIO CON UBICAZIONE DEL PUNTO DI CONTROLLO	69
FIGURA 9-3: DOMINIO DI CALCOLO	69

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 6-1: ANALISI DIREZIONALE DELLE ONDE ESTREME (DATI MET.OFFICE, 1991-2002)	25
TABELLA 7-1: CLIMA MARITTIMO, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO PER ALCUNI PERIODI TEMPORALI ALL'ANNO	35
TABELLA 8-1: ELABORAZIONI SUI LIVELLI MARINI GIORNALIERI FILTRATI (BLOOMFIELD), 2001-2014 - (VALORI IN MM)	55
TABELLA 8-2: SOPRALZO DA VENTO – WIND SETUP	55
TABELLA 8-3: EFFETTO DELLA PRESSIONE ATMOSFERICA SUI LIVELLI IDRICI (FONTE: CECW-EH EM 1110-2-1414, USACE	56
TABELLA 8-4: S_{WAVE} AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO	59
TABELLA 8-5: PROIEZIONI DELLE VARIAZIONI DI TEMPERATURA E LIVELLI IDRICI (FONTE: IPCC AR5, 2014).....	61
TABELLA 8-6: PROIEZIONE IN CENTIMETRI DELLA RISALITA DEL LIVELLO DEL MARE ATTESA SU ALCUNE COSTE ITALIANE FONTE: ANTONIOLI ET AL., 2016)	62
TABELLA 8-7: VARIAZIONE DEL LIVELLO DEL MARE ALLA FINE DEL 21° SECOLO: CONFRONTO TRA STUDI DIVERSI (FONTE: KOPP ET AL., 2016)	62
TABELLA 8-8: INNALZAMENTO TOTALE IN FUNZIONE DEL PERIODO DI RITORNO (TDR).....	64
TABELLA 9-1: RISULTATI STWAVE PER ONDE ESTREME DIREZIONALI (TDR=100 ANNI) LETTI NEL PUNTO SOTTOCOSTA.....	71
TABELLA 9-2: ANALISI OMNIDIREZIONALE DELLE ONDE ESTREME (CLIMA SOPRA SOGLIA, STWAVE).....	72



1 Generalità

L'Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sicilia Occidentale, nell'ottica del completamento e della funzionalizzazione della propria offerta portuale, per il Porto dell'Arenella vuole eseguire la definizione dell'opera di sopraflutto secondo la configurazione prevista dal Piano Regolatore Portuale oggi vigente.

La redazione del presente progetto esecutivo è stata affidata alla società di ingegneria Progetti e Opere S.r.l., il cui un direttore tecnico è l'Ing. Elio Ciralli. Quest'ultimo si era già occupato della redazione del precedente livello progettuale (livello definitivo), completamente approvato in ossequio alla normativa dell'epoca.

1.1 Premessa

Il progetto esecutivo, finalità dell'incarico professionale ricevuto, viene redatto sulla scorta dei precedenti livelli di progettazione approvati, compresa la procedura di valutazione ambientale.

1.1.1 Il precedente livello progettuale e le approvazioni

Il progetto definitivo dei lavori di completamento del molo foraneo del Porto dell'Arenella è stato redatto secondo la configurazione del precedente Piano Regolatore Portuale approvato dal Consiglio Superiore dei LL.PP. con voto n.529 del 11.09.1974.

Il progetto è stato approvato dal Comitato Tecnico Amministrativo del Provveditorato Interregionale OO.PP. Sicilia-Calabria ed ha già completato una procedura di verifica di assoggettabilità alla VIA per la quale è stata rilasciata la Determina di non assoggettabilità a VIA con D.G.V.A. del MATTM prot. n. DVA-2010-0024939 del 19/10/2010.

Nelle more del reperimento del finanziamento necessario all'esecuzione dei lavori, fu portata a termine la redazione del nuovo Piano Regolatore Portuale di Palermo che ricomprendeva il Porto dell'Arenella.

Il nuovo Piano Regolatore Portuale eseguì la prevista procedura di Valutazione Ambientale Strategica regionale, per la quale fu emesso apposito D.A. 107/GAB del 29/03/2018 con parere motivato alla procedura integrata V.A.S. - V.Inc.A. "Porto di Palermo - Piano Regolatore Portuale" ai sensi dell'art. 16 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii., condizionato al rispetto delle prescrizioni ed osservazioni, oltre alle misure di mitigazione già previste nel PRP e fatte proprie nel parere n. 73/2018 della C.T.S. regionale.

Al suddetto Decreto seguì l'approvazione *ope legis* del PRP (art. 5, comma 3, Legge 84/94), sancita con il D.D.G. ARTA RS n. 100 del 30/07/2018 in conformità al parere del Consiglio Regionale dell'Urbanistica espresso con il voto n. 93 del 04 luglio 2018.

Il nuovo PRP oltre a inserire il Porto dell'Arenella nell'ambito portuale e a definire la destinazione funzionale, ha disegnato le opere foranee in modo leggermente diverso dal precedente PRP (Cfr. Figura 1-1). Questa leggera variazione, come dimostrato negli studi tecnici di supporto al PRP, migliora la protezione del bacino portuale anche al fine di ridurre l'agitazione residua sotto mareggiata, in modo maggiormente compatibile con la sancita funzione di porto turistico e da diporto.

1.2 Il corpo documentale

Il corpo documentale che costituisce il presente livello di progettazione è quello riportato nella seguente Tabella 1-1. Si raccomanda di attenersi sempre alla versione più recente degli elaborati che, se esistenti, superano le precedenti versioni.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Progetti
CONTRACTING e opere
SUSTAINABLE IDEAS LAB

envi**tekk** environmental technologies
www.envitek.eu



EO 9001

1.3 Finalità dell'elaborato

Lo Studio Idraulico Marittimo deve fornire indicazioni fondamentali ai fini del progetto in questione, e ciò perseguendo finalità molteplici.

Occorre infatti:

- Investigare sotto il punto di vista idraulico marittimo lo stato del paraggio in condizioni di "non intervento", al fine di poter identificare le alternative di progetto ed effettuare i necessari confronti;
- verificare il comportamento marittimistico delle proposte progettuali ed in particolare ponendo l'attenzione su:
 - o la modificazione e la trasformazione dell'onda che si propaga verso riva, in presenza del dispositivo progettato;
 - o l'agitazione residua a tergo del dispositivo di protezione progettato;
 - o l'influenza e gli effetti del dispositivo progettato sull'evoluzione della linea di riva;
 - o fornire tutte le indicazioni necessarie per il calcolo strutturale e geotecnico delle opere connesse al dispositivo prescelto, in funzione delle caratteristiche di rischio accettabile e di funzionalità che l'intervento deve garantire nella sua vita utile.

1.4 Riferimenti normativi

Il presente progetto è stato redatto ai sensi del D.Lgs. 50/2016 e del regolamento ancora oggi vigente (D.P.R. 207/2010 e ss.mm.ii.).

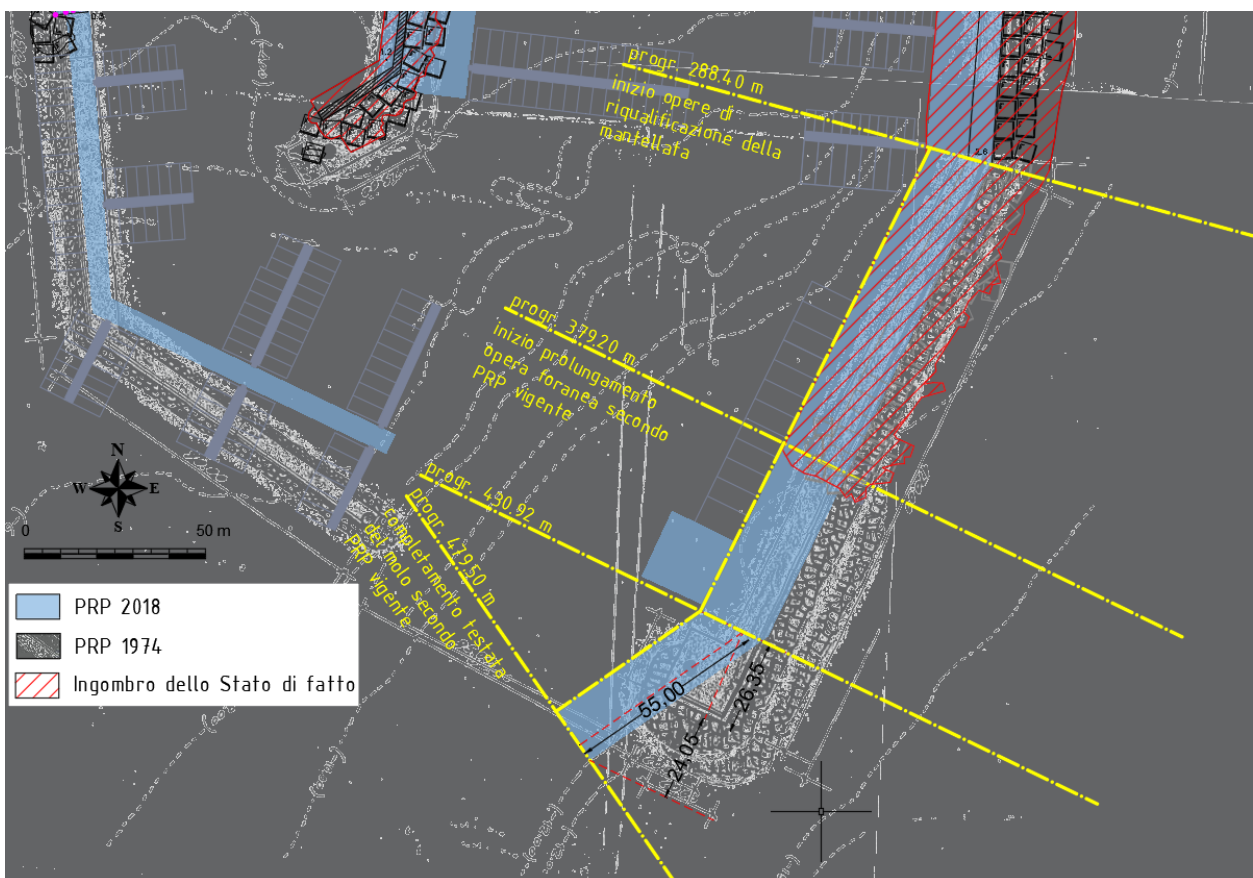


Figura 1-1: Sovrapposizione PRP 1974 - PRP 2018 - Stato di fatto

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Il progetto è stato armonizzato, nel rispetto della legge, con i correnti standard di settore, con particolare riferimento a quelli prodotti dall'Associazione Internazionale di Navigazione (A.I.P.C.N. – P.I.A.N.C.), oggi PIANC.

Esso contiene inoltre uno studio con la descrizione del progetto ed i dati necessari per individuare e valutare i principali effetti che il progetto può avere sull'ambiente, con riferimento al comma 6 dell'art.6 del D.Lgs. 152/2006 così come modificato dall'art. 3 del d.lgs. n. 104 del 2017.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



ELENCO DEGLI ELABORATI DI PROGETTO	
codice	titolo elaborato
EE.00	Elenco elaborati
	A - ELABORATI GENERALI
A .01	Relazione generale
	B - RELAZIONI SPECIALISTICHE
B.01	Relazione idraulica marittima
B.01.01	Relazione idraulica marittima: allegati
B.02	Relazione dell'agitazione residua e dell'agibilità portuale
B.02.01	Relazione dell'agitazione residua e dell'agibilità portuale: allegati
B.03	Relazione sulla dinamica della costa
B.04	Relazione sismica
B.05	Relazione geotecnica
B.06	Relazione sul dimensionamento e la stabilità idraulica
B.07.01	Relazione di calcolo delle strutture
B.07.01	Relazione di calcolo delle strutture: allegati
B.08	Relazione paesaggistica
	Studio Geologico (a cura del dott. Paolo Nania)
B.09 - 1	Relazione geologica
B.09 - 1.1	Geolocalizzazione indagini geognostiche e sismiche
B.09 - 2	Indagini sismiche MASW
B.09 - 3	Indagini sismiche HVSR
B.09 - 4	Elaborazione geotecnica dei test penetrometrici (Spt) eseguiti in foro
B.09 - 5	Raccolta dati stratigrafici e laboratorio geotecnico
B.09 - 5.1	Analisi e prove di laboratorio geotecnico (a cura di CON.GEO Srl)
B.09 - 6	Tavole cartografiche
	RILIEVI TOPOGRAFICI, BATIMETRICI E BIOENOTICI (A CURA DI ARENA SUB SRL)
R.01	Relazione illustrativa dei rilievi batimetrici e bioenotici
R.01.01	Allegato: Processing Report
R.01.02	Allegato: Video subacquei dei transetti (da trasmettere su richiesta)
T.1	Ortofoto e profili di sezioni
T.2	Ortofoto e Piano Quotato
T.3a	Carta morfologico-batimetrica (isobate)
T.3b	Carta morfologico-batimetrica (rilievo ombreggiato color coded)
T.3c	Carta morfologico-batimetrica (rilievo ombreggiato grey-scale)
T.4a	Carta morfologico-batimetrica (isobate) - Spiaggia Vergine Maria
T.4b	Carta morfologico-batimetrica (shaded relief) - Spiaggia Vergine Maria
T.5	Carta dei tipi di fondo (color coded seabed fetures)
T.6	Carta del mosaico acustico Side Scan Sonar
	RELAZIONE ARCHEOLOGICA PREVENTIVA (A CURA DOTT. ARCHEOL. F. FAZIO - ARENA SUB SRL)
VIARCH.01	Relazione archeologica preventiva a seguito dei rilievi
VIARCH.01.01	Relazione archeologica preventiva: Carta del potenziale archeologico
	C - ELABORATI GRAFICI
	C.SF - STATO DI FATTO
C.SF.01.01	Carta nautica - Cartografia IGM - Carta Tecnica Regionale - Ortofoto
C.SF.01.02	Stralcio PRG - Stralci PRP - Stato di completamento
C.SF.01.03	Carta dei vincoli paesaggistici e territoriali
C.SF.02.01	Planimetria e sezioni dello stato di fatto
C.SF.02.02	Inventario visuale
	C.OP - STATO DI PROGETTO
C.OP.01	Planimetria sinottica delle opere in progetto
C.OP.02	Planimetria di dettaglio
C.OP.03	Raffronto SDF - PRP vigente - Opere in progetto
C.OP.04	Piano di tracciamento delle opere
C.OP.05	Sezioni tipo di progetto
C.OP.06	Quaderno delle sezioni di computo
C.OP.07	Particolari costruttivi e arredo portuale
C.OP.08.01	Cassoni cellulari: piante e sezioni
C.OP.08.02	Cassoni cellulari: carpenterie
C.OP.09	Modalità esecutive e fasi costruttive
C.OP.10	Siti di cava e deposito
	D - ELABORATI DEGLI IMPIANTI
D.IE.01	Impianti Elettrici e Illuminotecnici: Relazione descrittiva e di calcolo
D.IE.02	Impianti Elettrici e Illuminotecnici: Schema di Installazione
D.IS.01	Impianti Idrici: Relazione descrittiva e di calcolo
D.IS.02	Impianti Idrici: Schema di Installazione
	E - PIANO DI MANUTENZIONE DELL'OPERA E DELLE SUE PARTI
E.01	Manuale d'uso
E.02	Manuale di manutenzione
E.03	Programma di manutenzione
	F - PIANO DI SICUREZZA E COORDINAMENTO E INCIDENZA DELLA MANODOPERA
F.01	Piano di sicurezza e coordinamento
F.02	Planimetria delle aree di cantiere
	G - ELABORATI ECONOMICI ED AMMINISTRATIVI
G.01	Elenco dei prezzi unitari
G.02	Analisi dei prezzi
G.03	Quadro incidenza della manodopera
G.04	Computo metrico estimativo
G.05	Quadro economico
G.06	Cronoprogramma
G.07	Capitolato speciale d'appalto
G.08	Schema di contratto di appalto
SPA	STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE
VINCA	SCREENING DI INCIDENZA AMBIENTALE

Tabella 1-1: Corpo documentale del progetto

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



2 Caratteristiche fisiche del paraggio

2.1 Inquadramento del paraggio

L'identificazione morfo-sedimentologica del paraggio, secondo la classificazione riportata in "Elementi di Gestione Costiera", ENEA 2003 è:

COSTA ARTICOLATA,

una costa caratterizzata da rilievi montuosi o collinari affacciati direttamente sul mare. Il profilo sottomarino comunemente riproduce quello subaereo e, meno frequentemente, esibisce piattaforme di erosione; il contatto terra-mare è eventualmente rappresentato da seni di spiaggia comunemente in ghiaia e gli apporti solidi provengono da corsi d'acqua ad alto gradiente e da accumuli di frana e crollo della parete dei rilievi.

2.2 Morfologia e batimetrie

Nuove indagini morfo-batimetriche sono state commissionate dall'AdSP ad Arena Sub srl di Messina, che le ha restituite insieme ad altre indagini e studi nell'agosto del 2021.

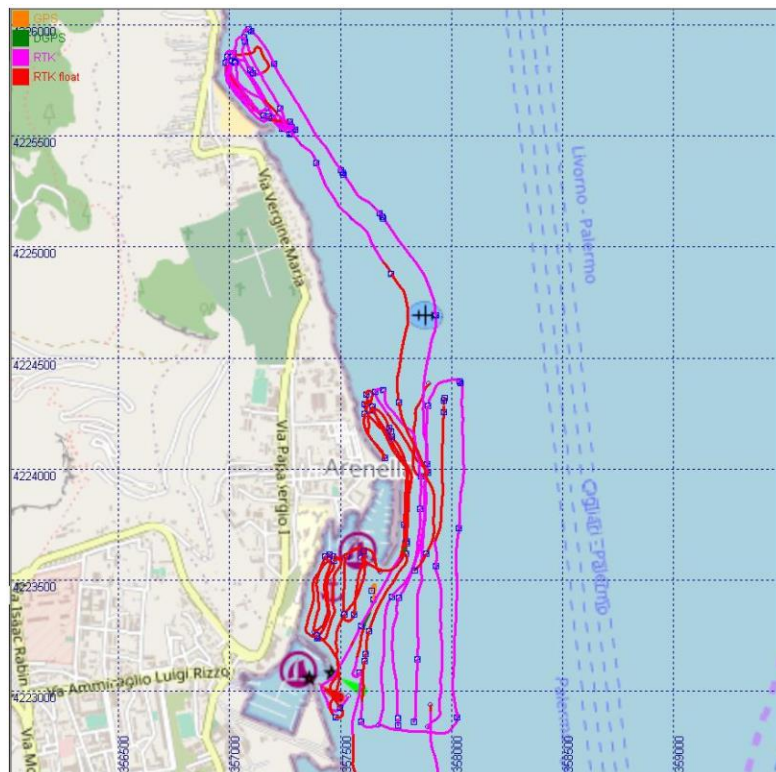


Figura 2-1: Rotte di navigazione del rilievo multibeam del 2021
(Fonte: Arena sub srl)

Le indagini fanno parte del corpo documentale di progetto ed a questo si rimanda.

Il rilievo è stato condotto anche con lo scopo di aggiornare le investigazioni sullo specchio acqueo esistente tra il molo di sopraflutto del porticciolo dell'Acquasanta e il porto dell'Arenella, ritenuto essenziale ai fini della più compiuta descrizione delle trasformazioni del moto ondoso incidente sulle opere in progetto.

È stata inoltre monitorata la spiaggia di Vergine Maria, situata a Nord del porto dell'Arenella, ai fini dell'analisi degli effetti sotto il profilo della dinamica costiera (Cfr la relazione B.04 - Relazione sulla dinamica litoranea locale).

Si evince (Cfr. Figura 2-3) che le opere si disporranno su un fondale intorno ai 12 m slmm, degradante su pendenze dell'ordine del 3.5÷4%, con giacitura non parallela alle isobate, sostanzialmente parallele con andamento NE-SO.

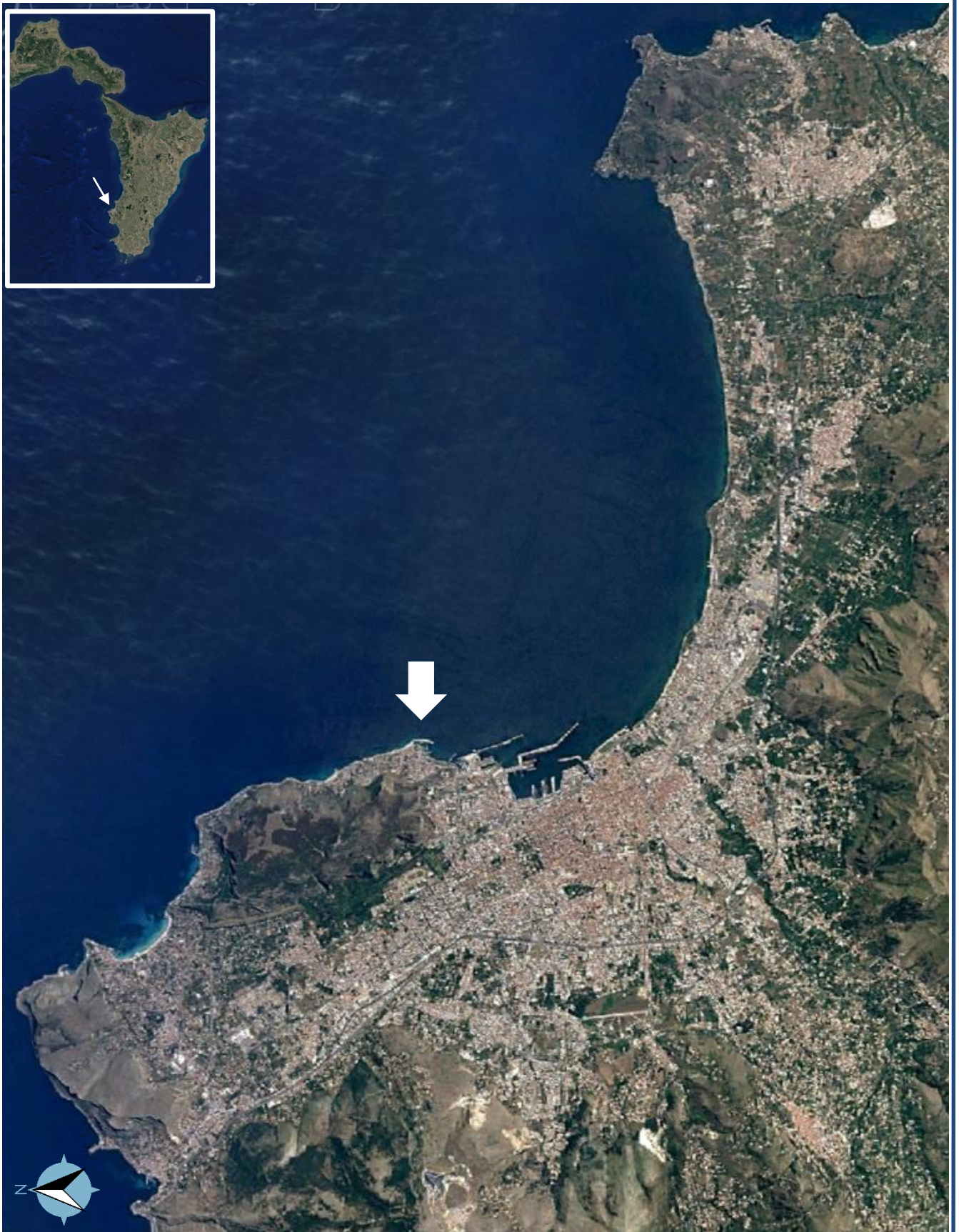


Figura 2-2: Immagine satellitare con il paraggio dell'Arenella (da Google Earth)

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



2.3 Fetch geografico

L'individuazione del bacino di generazione e di propagazione del moto ondoso che interessa il paraggio è una caratterizzazione fondamentale del sito in questione.

Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini semichiusi di estensione limitata come il Mar Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione.

Nel caso dei mari italiani, le lunghezze della traversia geografica che contribuiscono alla determinazione del fetch efficace possono essere limitate ad una estensione massima di 500 km, in ragione delle massime dimensioni delle perturbazioni meteorologiche agenti sul bacino mediterraneo.

L'individuazione dei settori geografici di traversia, che sottendono il paraggio, è stata effettuata su cartografia digitale con apposite routine di calcolo automatico e post-processione grafica.

Il settore di traversia principale individuato per il punto al largo significativo per il paraggio di Arenella è compreso tra la direzione 320°N e 110°N. Le traversie maggiori sono dal settore di NW.

È utile associare a tale visualizzazione una statistica delle distribuzioni di vento che spirano sul campo di generazione ondosa sopra tracciato. Si ricorre alle elaborazioni MEDATLAS da cui si estrae il seguente stralcio tematico su base annuale (cfr. Figura 2-4).

2.4 Fetch efficaci

Il fetch efficace è definito come la porzione di mare che, sotto l'azione diretta del vento, costituisce l'area di generazione dell'evento di moto ondoso, tenendo debito conto delle lunghezze associate a direzioni laterali rispetto a quella principale e quindi anche alla larghezza dell'area di generazione. Di conseguenza la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici. Il calcolo dei fetch efficaci può essere eseguito in base alla seguente relazione indicata da Sverdrup, Munk e Bretshneider (1947) con i successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977 e S.P.M.):

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

- $F_{e,w}$ lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;
- F_i lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i -esima ϕ_i ;
- ϕ_w direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo il paraggio;
- $\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ direzione i -esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;
- θ , ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso, 45° metodo Saville;

- n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n=2$).

Nella figura seguente è rappresentato il diagramma dei fetch efficace del sito in studio.

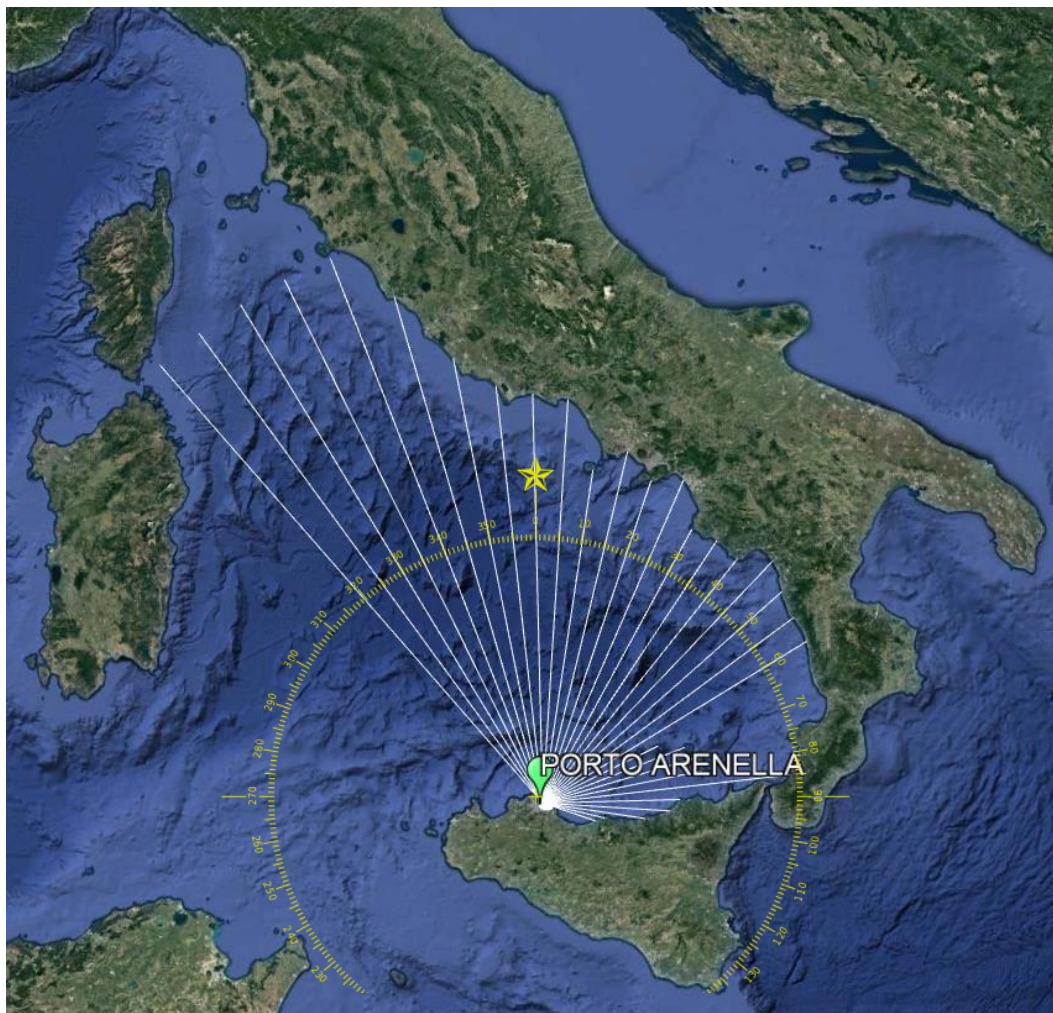


Figura 2-5: Distanze di mare libero per il porto dell'Arenella

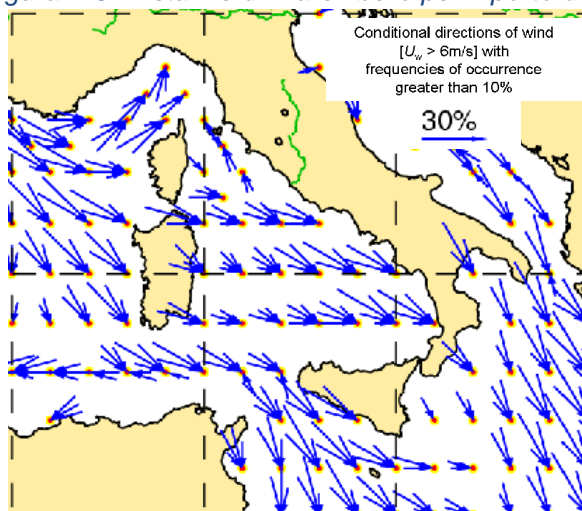


Figura 2-4: Direzione dei venti con frequenze di occorrenza maggiore del 10% (Fonte: MedAtlas)

2.5 Verifica di adattabilità dei dati ondometrici disponibili

È possibile valutare per i dati ondometrici disponibili in un determinato punto geografico la loro adattabilità al sito di interesse, ovvero la necessità o meno di correzione con criteri ragionevoli.

Mentre la modellistica sempre più sofisticata, supportata da adeguata potenza di calcolo, consente di accoppiare dati del vento per ottenere trasposizioni molto affidabili, sono da molti anni in uso metodi per valutare la necessità o meno di trasportare tali dati.

L'ipotesi di base della metodologia seguita consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione), che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate nel punto di misura, abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse (Contini e De Girolamo, 1998).

Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura e a quello di interesse.

Formulazioni di letteratura permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale H_{mo} e il periodo di picco spettrale T_p in funzione della lunghezza del fetch e della velocità del vento, in particolare:

$$\frac{gH_{mo}}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{gT_m}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

dove:

U_A è il fattore di velocità del vento, dipendente in modo non lineare della velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;

F è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Indicando con gli apici O e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura e al punto di trasposizione, fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci F_p e F_o , le precedenti relazioni permettono di stabilire la ricercata corrispondenza tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto O e al punto P per fissata direzione:

$$\frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{T_{mo}^P}{T_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

dove si è ovviamente supposto che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame.

Ne proviene che i rapporti a secondo membro rappresentano due coefficienti:

- KH, utile alla correzione delle altezze significative delle onde,
- KT, utile alla correzione dei periodi delle onde

per ciascuna direzione geografica di provenienza del vento.

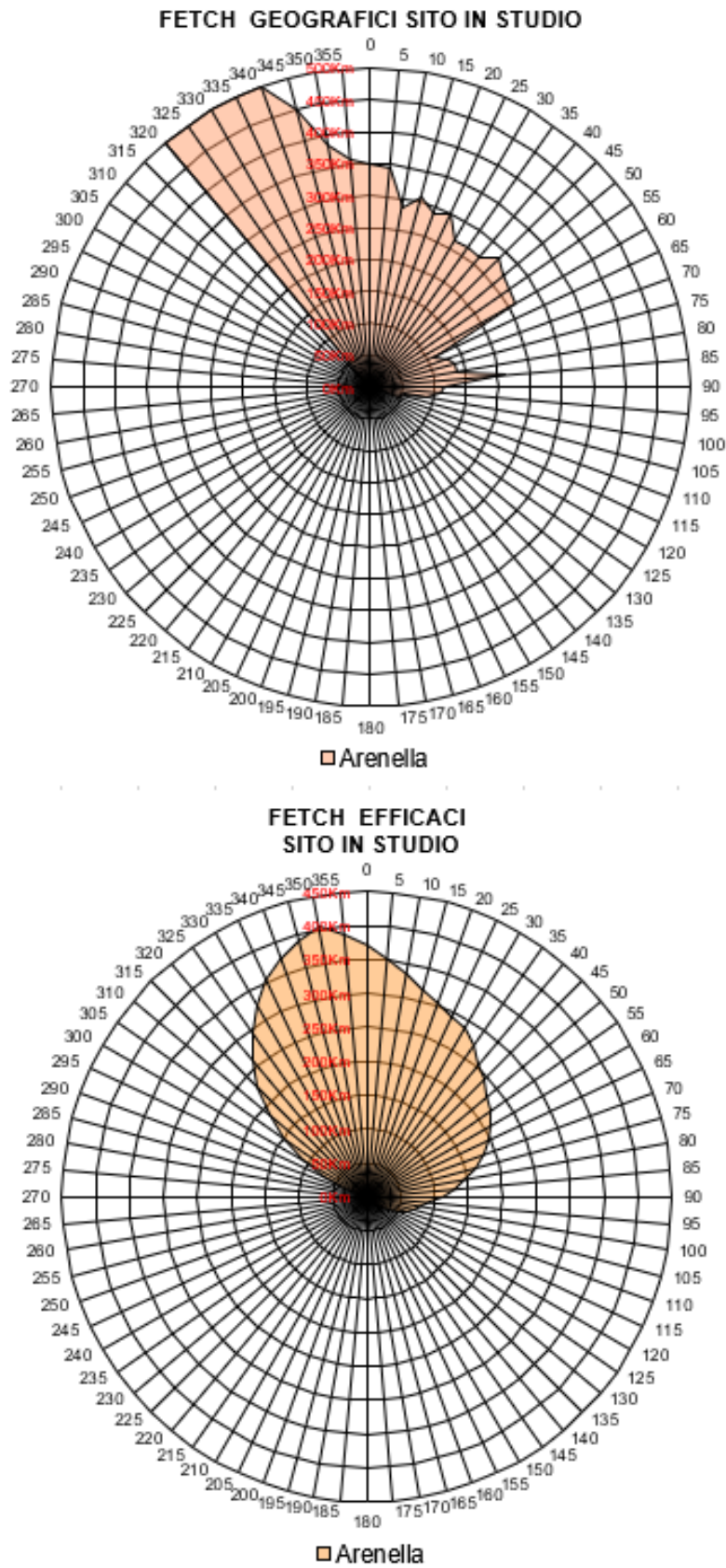


Figura 2-6: Diagrammi dei fetch geografico ed efficace per il paraggio di Arenella

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
 del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



3 Componenti meteorologiche marittime

Tra le componenti meteorologiche che influiscono sul clima marittimo, nel Mar Mediterraneo ed alle latitudini del sito in interesse, sono di rilevante importanza il vento e la pressione atmosferica.

Quest'ultima verrà trattata al fine della determinazione di suoi effetti diretti sui livelli idrici nell'apposito Par. 8.3 a pag. 56.

3.1 Vento

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



4 Correnti

Con il termine correnti marine viene indicato il movimento di massa d'acqua collegato alla marea, al vento o al moto ondoso. Le correnti, di cui il navigante nota solo l'effetto superficiale, esistono lungo tutta la massa d'acqua, e talvolta solo in determinati strati senza causare effetti visibili in superficie; esse si verificano prevalentemente in acque profonde ed in mari aperti.

Inoltre, mentre le correnti di marea hanno un ciclo temporale ben definito, le correnti marine sono permanenti (o stazionarie) oppure stagionali (o semipermanenti). Esistono diversi tipi di correnti marine e possono essere classificate:

- in base alle cause che le creano (correnti di gradiente e correnti di deriva);
- in relazione alla temperatura dell'acqua che si sposta confrontata con la temperatura dell'acqua che la circonda (correnti calde o fredde);
- in relazione alla profondità ove si verificano (superficiali se interessano lo strato d'acqua dalla superficie ai 200 metri; interne se interessano lo strato d'acqua al di sotto dei 200 metri; di fondo se interessano lo strato d'acqua vicino al fondale marino).

Il moto orizzontale della massa d'acqua superficiale (o corrente superficiale), è dovuto all'azione combinata di correnti di gradiente e di deriva, ed è quello di maggior interesse per le analisi idrodinamiche.

Le correnti che interessino seni, baie o foci sono fondamentali ai fini del ricambio idrico e per lo scambio fluido e di sedimenti da e verso il mare aperto.

4.1 Le correnti di gradiente

Sono dovute alla irregolare distribuzione della pressione sulla superficie del mare ed alla differenza di densità di masse d'acqua adiacenti. Queste correnti si generano quando la superficie dell'acqua assume una certa inclinazione, fatto che accade per l'azione del vento, o per la presenza di masse d'acqua contigue di diversa temperatura e salinità.

Le correnti di gradiente dovute a diversa pressione atmosferica ed all'ammassamento dell'acqua dovuto al vento, tendendo a ristabilire l'orizzontalità della superficie marina, sono di intensità modesta, e pressoché irrilevanti ai fini della navigazione in mare aperto. La situazione cambia in prossimità di costa, se il vento che spirava verso la costa è di intensità adeguata, si possono ammassare lungo costa notevoli masse d'acqua che, non potendo rifluire verso il largo a causa del vento contrario, danno luogo a forti correnti che scorrono parallelamente alla costa.

Le correnti di gradiente dovute a differenza di densità si presentano soprattutto negli strati interni della massa d'acqua, e hanno effetto apprezzabile sulla navigazione solo nell'esempio sopra descritto.

4.2 Le correnti di deriva

Sono dovute all'azione di trascinamento creato dall'attrito esistente tra la massa d'aria in movimento e la massa d'acqua superficiale del mare. I forti venti costanti come gli alisei che spirano in Oceano Atlantico, ed i monsoni che spirano nell'oceano indiano, sono la causa di gran parte delle correnti di deriva costanti.

Il vento tende a trascinare lo strato superficiale delle acque marina nella sua stessa direzione, il movimento di deriva si trasmette agli strati inferiori con intensità decrescente e direzione man mano variabile; il movimento inizia con ritardo rispetto al momento di inizio dell'azione del vento e solo gradualmente raggiunge la velocità di regime.



Venti leggeri possono generare deboli correnti di deriva in circa sei ore, sono necessarie ben 48 ore di vento forte perché la relativa corrente di deriva raggiunga la velocità di regime.

L'intensità della corrente di deriva a regime è pari a circa l'1,5 % della velocità del vento che l'ha generata, velocità che dipende anche da altri fattori, ed in particolare dall'ampiezza dello specchio d'acqua libero da ostacoli, denominato fetch, esistente nella direzione di provenienza del vento. Fetch limitati non consentono alla corrente di raggiungere velocità della percentuale sopra indicata, anche se il vento spira dalla stessa direzione per periodi di tempo superiori alle 48 ore.

4.3 La direzione della corrente

Le forze che mettono in movimento sia le correnti di gradiente sia quelle di deriva, tendono a muovere la massa d'acqua in una ben determinata direzione. Nel caso delle correnti di gradiente dal luogo a livello maggiore verso quello a livello minore, nel caso di correnti di deriva nello stesso senso di propagazione del vento (a meno di una differenza di circa 20°). In effetti le direzioni di propagazione sono sensibilmente diverse da quelle sopra descritte; in particolare le correnti che si propagano nell'emisfero Nord subiscono una deviazione verso la destra rispetto alla direzione di propagazione, quelle che si propagano nell'emisfero Sud subiscono una deviazione verso sinistra.

Le deviazioni sono dovute alla rotazione terrestre che genera una particolarissima forza, detta forza di Coriolis, che agisce su tutte le masse in movimento sul pianeta, ed il cui effetto è più sentito quanto più è grande la massa in movimento.

Oltre alla forza di Coriolis influiscono sulla direzione e sulla intensità delle correnti marine anche altri fattori, natura e vicinanza della costa, presenza di golfi o stretti, maggiore o minore distanza tra la superficie del mare ed il fondo.

4.4 Circolazione generale

Le correnti marine così strettamente legate ai fattori meteorologici, sono oggetto di continui studi dai quali è stato possibile ricavare dei "modelli di circolazione", ossia situazioni standard che si verificano in concomitanza con determinate situazioni meteorologiche stagionali. Esistono innumerevoli modelli di circolazione che si applicano ai diversi bacini, da quelli oceanici che hanno validità temporale di mesi, a quelli di piccoli golfi di particolare interesse e validi solo per particolari situazioni di vento o insolazione. In questa sede daremo qualche lineamento generale della circolazione superficiale del Mediterraneo.

4.5 Circolazione nel Mar Mediterraneo

Nel bacino del Mediterraneo le correnti sono solitamente deboli e di direzione variabile. La circolazione superficiale è fortemente influenzata dai venti che al largo possono generare correnti superficiali di intensità fino ai due nodi.

Poiché l'evaporazione dovuta all'effetto del sole è tale da non poter essere compensata dall'apporto di acqua fluviale e piovana, è sempre presente una corrente entrante dallo stretto di Gibilterra. In sostanza il Mediterraneo viene rifornito da acqua oceanica che, dopo aver passato lo stretto di Gibilterra, fluisce verso Est. In realtà in corrispondenza dello stretto la direzione della corrente non è sempre entrante, ma ciò è dovuto alla sovrapposizione alla corrente di gradiente appena descritta, della corrente di marea che in quell'area ha valori sensibili.

La corrente entrante nel Mediterraneo si spinge verso Est dividendosi in un ramo principale ed in altri secondari; il ramo principale, sotto l'effetto della forza di Coriolis, dirige verso destra e si addossa alla costa africana perdendo via via intensità fino ad estinguersi; l'intensità della corrente si mantiene fra 0,8 ed 1 nodo lungo le coste dell'Algeria, quindi diminuisce procedendo verso oriente; nello stretto di Sicilia l'intensità varia tra 0,4 ed 1 nodo. A questo andamento generale si sovrappongono numerose e varie situazioni particolari.

Gli estratti di seguito riportati danno un'indicazione chiara della circolazione superficiale del mediterraneo e della zona d'interesse; le frecce mostrano la direzione media della corrente; in alcuni punti viene riportato il valore in nodi della corrente.

Per maggiore dettaglio si rimanda alle immagini tratte dall' "Atlante delle Correnti Superficiali dei Mari d'Italia", Istituto Idrografico della Marina, riportate negli allegati (Cfr. Elab. B.01.01).



Figura 4-1: Correnti superficiali nei mari italiani

5 Clima d'onda a largo del paraggio

Il clima d'onda di un paraggio può variare notevolmente da stagione a stagione, ma le variazioni sono contenute se si confrontano anni differenti, pertanto una serie storica lunga almeno tre anni lo identifica efficacemente (CEM Part II).

Nel presente capitolo mediante un'analisi statistica e la determinazione della probabilità di superamento per fissata direzione ricaveremo una distribuzione del clima d'onda del paraggio per effettuare le previsioni sulle caratteristiche ondose.

Per i fini del nostro studio si è effettuata un'analisi statistica sia omnidirezionale che direzionale.

5.1 Probabilità di superamento

Per effettuare le previsioni sui parametri ondosi è sufficiente conoscere $P(H_s > h)$, la probabilità di superamento (Boccotti, 2004): essa rappresenta la frazione di tempo in cui l'altezza significativa H_s si mantiene al di sopra di una certa soglia h , nella località in esame. Per cui diventa:

$$P(H_s > h) = \frac{1}{T} \sum \Delta t_i(h)$$

dove $\Delta t_i(h)$ sono le durate di tempo in cui H_s è maggiore di h e T è il tempo totale.

Dalla definizione si capisce che per stimare la $P(H_s > h)$ non è necessario analizzare una per una le mareggiate verificatesi nel periodo. Basta semplicemente contare il numero delle registrazioni in cui l'altezza significativa ha superato la soglia h assegnata e dividere il numero totale delle registrazioni. In estrema sintesi dalla tabella precedentemente descritta si ricava la frequenza cumulata per ogni classe di H_s e quindi si divide per il numero delle registrazioni.

5.2 Forma analitica della probabilità di superamento

Si è proceduto a determinare analiticamente la curva che meglio interpolava i dati di probabilità di superamento omnidirezionale che direzionale.

Una curva che ben interpreta nel dominio dei valori di h la probabilità di superamento è quella di Weibull (Boccotti, 2004):

$$P(H_s > h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w}\right)^u\right]$$

dove u e w sono i parametri della distribuzione e dipendono dalla località in esame.

Per rappresentare graficamente i dati si ricorre alle variabili ausiliarie:

$$X = 100 \ln(2.5h)$$

$$Y = 100 \ln \ln \frac{1}{P}$$

Tali coppie di dati si dispongono secondo una retta del tipo

$$Y = a + bX$$

Una volta individuati i valori dei parametri a e b della retta si possono ricavare direttamente i valori dei parametri u e w della $P(H_s > h)$, con le relazioni

$$u = b$$

e

$$w = \frac{1}{2.5} \exp\left(-\frac{a}{100b}\right)$$

con w in metri.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Pertanto fissando la probabilità di superamento (P) si ricava Hs in quanto:

$$H_s = w \left(\ln \frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{u}}$$

Con considerazioni riportate in Boccotti (2004) è possibile effettuare una valutazione analitica anche della probabilità direzionale dell'altezza significativa, secondo la seguente espressione.

$$P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp \left[- \left(\frac{h}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[- \left(\frac{h}{w_\beta} \right)^u \right]$$

Si tratta della differenza tra due funzioni di Weibull in cui i parametri w_a e w_b dipendono dal settore direzionale in esame, mentre u è quello della probabilità omnidirezionale.

I parametri w_a e w_b devono essere maggiori di zero con:

$w > w_a > w_b$.

Sul piano delle variabili ausiliari è rappresentata da una curva che si dispone parallela alla curva direzionale per le condizioni asintotiche X,Y tendente a $+\infty$.

Di seguito è descritto il procedimento per ricavare i valori di w_a e w_b .

Si fissano due punti sul piano delle variabili ausiliarie $X_1; Y_1$ e $X_2; Y_2$, per cui si suppone debba passare la curva direzionale, in funzione dei dati di occorrenza direzionale: in particolare si individua l'interpolante per coppie X, Y dopo aver effettuato la trasformazione delle variabili h e $P(H_s > h)$ per data direzione.

In particolare se si assume che $h_1 < h_2$ e $P_1 > P_2$ con:

$$P_1 = \exp \left[- \left(\frac{h_1}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[- \left(\frac{h_1}{w_\beta} \right)^u \right]$$

$$P_2 = \exp \left[- \left(\frac{h_2}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp \left[- \left(\frac{h_2}{w_\beta} \right)^u \right]$$

e se si pone che

$$x' = \left[\left(\frac{1}{w_\alpha^u} \right) \right]$$

e

$$y' = \left[\left(\frac{1}{w_\beta^u} \right) \right]$$

il sistema individuato dalle equazioni di P_1 e P_2 diventa un sistema di equazioni non lineari nell'incognite x' y' .

Si introducono due nuove funzioni:

$$f_1(x) = \exp(-h_1 u x) \quad \text{per } x > 0$$

e

$$f_2(x) = P_1 + [\exp(-h_2 u x) - P_2] \wedge ((h_1/h_2)u) \quad \text{per } 0 < x < x_{sup.}$$

in cui $x_{sup.}$ è il valore di x per cui l'argomento dentro la parentesi quadra dell'espressione di $f_2(x)$ si annulla e cioè

$$x_{sup.} = (1/h_2 u) \ln (1/P_2).$$



Si dimostra che il valore di x' detto x'' , se esiste, che risolve il sistema di equazioni non lineari è quello per cui si verifica che:

$$f_1(x'') = f_2(x'')$$

A partire dal valore individuato di x'' è possibile ricavare w_a e w_b tramite le seguenti espressioni:

$$w_\alpha = \left[\left(\frac{1}{x''} \right) \right]^{1/u}$$

e

$$w_b = h_1 \cdot \left[\ln \left[\exp \left(\frac{h_1^u}{w_a^u} \right) - P_1 \right] \right]^{-1/u}$$

Le condizioni da imporre per la verifica dell'esistenza della soluzione è che

$$f_2(0) > f_1(0)$$

da questa condizione discende un'altra, di più immediata intuizione, che prevede che la retta congiungente i punti scelti abbia pendenza minore di u e cioè

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} < u$$

5.3 Periodi

Disponendo dei dati onda metrici, l'analisi dei periodi può compiersi con procedure statistiche di correlazione tra H_s e T_m , ovvero T_p .

È stato dimostrato che le "onde di vento" tendono ad assumere una forma di spettro ben identificabile con forme matematiche. La forma su cui concordano molti autori è quella JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) che si riferisce al caso di alti fondali con valori caratteristici dei parametri in gioco.

È dimostrabile che in tale spettro è estrapolabile un legame H_s - T_p che è rappresentato dalla forma seguente:

$$T_p = 8.5 \pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

Sempre con considerazioni sullo spettro JONSWAPP medio si ottiene:

$$T_m = 0.78 T_p$$

5.4 Durata delle mareggiate

In base all'analisi statistica sul campione di misure ondometriche disponibili è possibile determinare una forma che individui il valor medio della durata delle mareggiate di assegnata altezza significativa. Il procedimento originale che introduce il concetto delle "mareggiate triangolari equivalenti" (Boccotti, 2004) è quello che risulta maggiormente convincente per le calcolazioni in questione.

In particolare con il legame:

$$\bar{D}(h) = \frac{\bar{b}(h)}{1 + u \left(\frac{h}{w} \right)^u}$$

si identifica la "persistenza al di sopra della soglia".

In alcune fasi progettuali è necessario precisare la durata D dello stato di mare convenzionale di progetto. La durata D è ricavabile dalla suddetta persistenza tramite l'espressione seguente:

$$D = 2 \bar{D}(h)$$



6 Eventi estremi a largo del paraggio

Per la verifica delle strutture di opere di difesa portuale o costiera occorre definire uno stato di mare convenzionale di progetto. Tale stato di mare è definibile in funzione del concetto di “tempo di ritorno”, ovvero l’intervallo di tempo medio in cui si verifica consecutivamente lo stesso evento.

Ciò comporta l’analisi statistica degli eventi estremi che si possono verificare nel paraggio. Sono possibili diversi approcci per effettuare tale analisi.

Un approccio molto frequente è il metodo dei massimi annuali (*annual maxima method*), che consiste nel selezionare il massimo valore dell’altezza d’onda registrata per ciascun anno di osservazione. Tale metodo è largamente consolidato e molto utilizzato per lo studio di numerosi fenomeni naturali, in accordo con la classica teoria dei valori estremi. Affinché sia possibile ottenere una serie significativa di dati, è necessario che il numero di anni di osservazione sia sufficientemente elevato. Inoltre, è necessario che non siano presenti interruzioni significative nelle registrazioni annuali, considerando, in particolare, che nei nostri mari, le onde più intense tendono a concentrarsi in determinati periodi dell’anno.

Un ulteriore approccio di successo è quello dei valori sopra soglia (*peak over threshold method*), che consiste nel selezionare gli eventi caratterizzati da valori di altezza d’onda superiori ad un determinato valore di soglia. Rispetto al metodo dei massimi annuali, questo secondo metodo tende a sfruttare maggiormente la numerosità dei dati disponibili. Il campione di dati rappresentativo degli eventi estremi, selezionati mediante uno dei metodi esposti in precedenza, viene successivamente analizzato i modelli probabilistici comunemente utilizzati nelle applicazioni di ingegneria costiera¹, sono state utilizzate le leggi di distribuzione di Gumbel (o Fisher-Tippett di tipo I, FT-I) e di Weibull.

Boccotti (2004) riporta un approccio originale basato sul concetto di mareggiata triangolare equivalente, che è stato utilizzato nel presente studio, e per i cui dettagli si rimanda alla letteratura. L’espressione generale del tempo di ritorno è la seguente:

$$R(H_s > h) = \frac{\bar{b}(h)}{1+u\left(\frac{h}{w}\right)^u} \exp\left(\frac{h}{w}\right)^u$$

Che viene graficizzata come viene riportato in seguito. Stabilito un valore di R viene determinata così l’altezza di soglia h a prescindere dalla direzione di propagazione delle onde.

Entrando quindi nei grafici di probabilità omnidirezionale $P(H_s > h)$ con l’ascissa $h(R)$, a parità di ordinata P si può leggere sulla curva direzionale relativa il corrispondente valore di ascissa h (R; $\Theta_1 < \Theta < \Theta_2$).

6.1 Studi di supporto al PRP del 2018

Il PRP del 2018 è stato supportato dagli studi preparati dal RTP composto dalla scrivente e da Idrotec. Lo studio “A.2 – Studio meteomarinario e morfologico”, ha incluso l’usuale analisi degli eventi estremi del paraggio del sistema portuale di Palermo.

La base dati che è stata utilizzata era una serie storica del UK Metereological Office (Met. Office) dal giugno 1991 al giugno 2002.

¹ Si confrontino, per esempio:

- Goda, Y., 1988. “On the Methodology of Selecting Design Wave Height”, Proceedings of 21st International Conference on Coastal Engineering, Costa del Sol-Malaga, Spain, pp. 899–913.
- Mathiesen, M., Goda, Y., Hawkes, P.J., Mansard, E., Martin, M.J., Peltier, E., Thompson, E.F., Van Vledder, G., 1994. “Recommended Practice for Extreme Wave Analysis”, Journal of Hydraulic Research, 32(6), pp. 803–814.



Il “Met. Office”, partendo da dati di pressione atmosferica acquisiti con continuità, modella dapprima i relativi dati di vento, ottenendo poi, in output al modello EWM (European Wave Model), serie temporali che indicano, ad intervalli di sei ore, altezza d’onda significativa e periodo medio per assegnato settore di provenienza. Il modello è tarato sulla base dei dati di moto ondoso misurati direttamente in varie località significative.

I dati sono riferiti a punti di griglia avente una maglia di 50’ di lato (corrispondenti a 50 miglia nautiche ed a 92.6 km circa).

Per le elaborazioni dei dati Met. Office di interesse per il paraggio in esame si è fatto riferimento al punto della griglia di coordinate 38.5°N – 13.9°E.

Sono stati quindi elaborati dati a disposizione per tutti i settori direzionali, di 10° di ampiezza (ogni settore è rappresentativo di onde che provengono da ± 5° rispetto alla direzione principale), compresi tra le direzioni 0°N e 360°N.

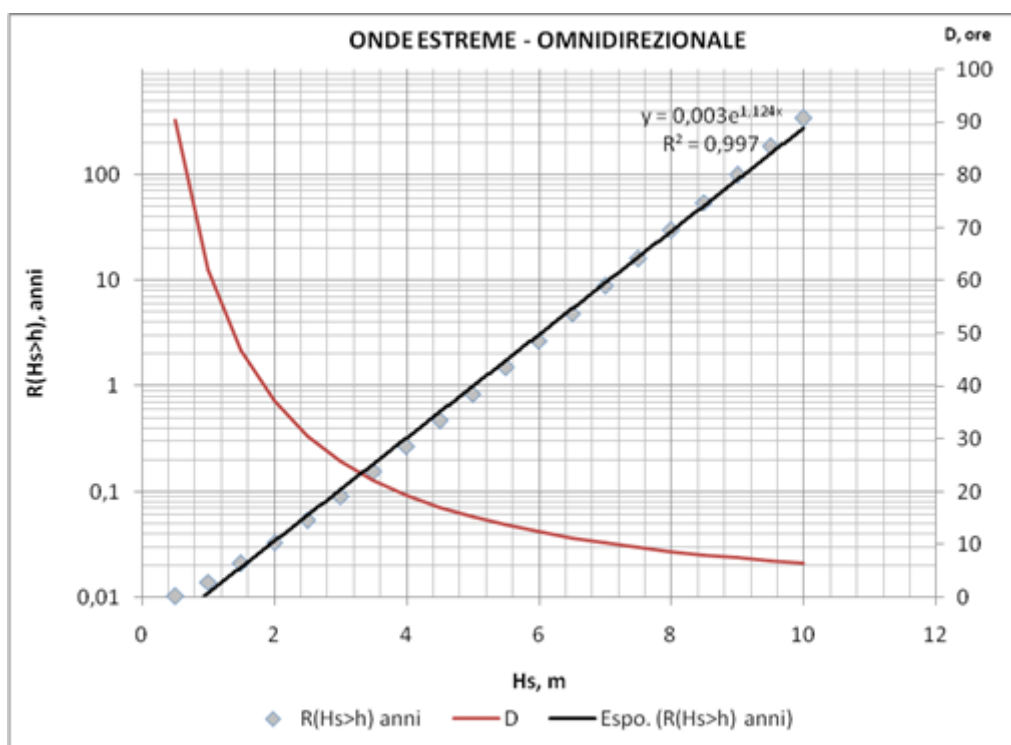


Figura 6-1: Analisi omnidirezionale delle onde estreme (dati Met. Office, 1991-2002)

Tr (anni)	330°		0°		30°		60°		90°	
	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)
2	4.1	9.8	4.2	9.9	3.8	9.4	3.1	8.5	2.7	8.0
5	4.8	10.6	5.0	10.8	4.4	10.2	3.7	9.3	3.2	8.7
10	5.3	11.1	5.6	11.5	4.9	10.7	4.2	9.9	3.5	9.1
50	6.7	12.5	6.9	12.7	6.2	12.1	5.2	11.0	4.4	10.2
100	7.4	13.2	7.5	13.3	6.8	12.6	5.7	11.6	4.8	10.6
150	7.8	13.5	7.9	13.6	7.2	13.0	6.1	12.0	5.0	10.8

Tabella 6-1: Analisi direzionale delle onde estreme (Dati Met. Office, 1991-2002)

Il clima d’onda è stato trasferito sottocosta con l’ausilio del modello di calcolo STWAVE (Cfr. 9.2 a pag. 65) su alcuni punti di controllo di cui uno significativo per il Porto dell’Arenella (punto 2).

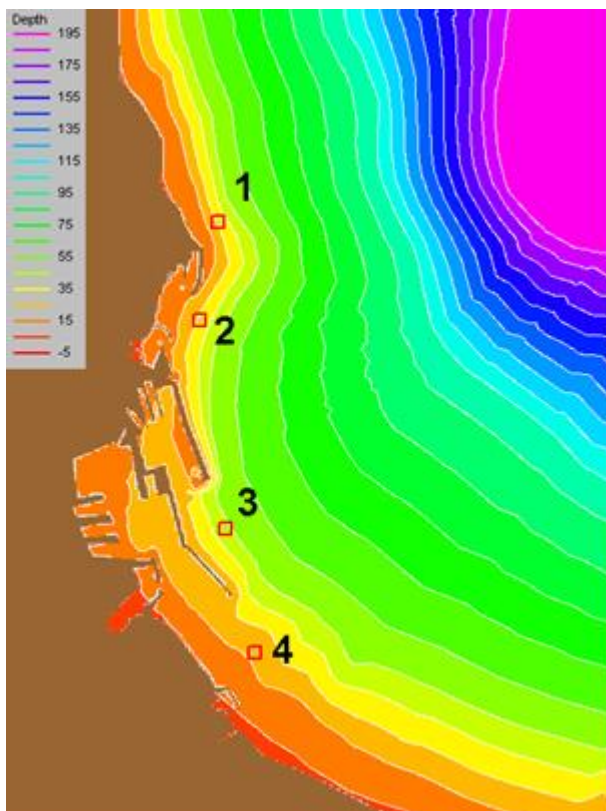


Figura 6-3: Localizzazione dei punti sottocosta in cui è stato trasferito il clima ondoso (PRP 2018)

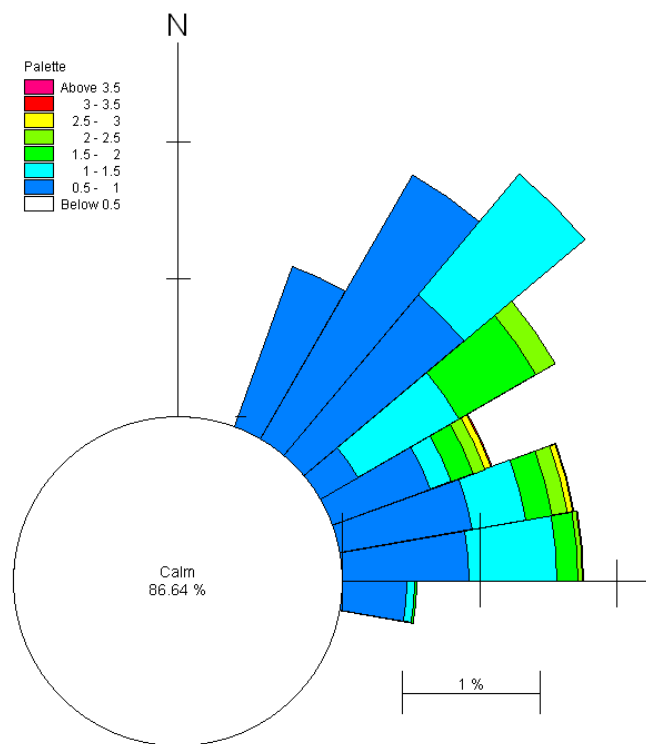


Figura 6-2: Rosa del mare nel punto di controllo 2 (PRP 2018)

7 Basi di dati ondametrici elaborate

In sede di progettazione esecutiva degli interventi, si è voluto affinare ulteriormente la definizione del clima d'onda caratteristico del paraggio alla luce di una sempre maggiore affidabilità delle basi di dati disponibili. Di conseguenza si sono aggiornate le stime degli eventi estremi a cui le opere saranno soggette, confrontando i nuovi risultati con quelli contenuti in studi precedenti da noi condotti o con altri esposti in altri studi.

Per la definizione dello stato ondametrico del paraggio in questione, oltre alle fonti ritenute maggiormente affidabili utilizzate per il progetto definitivo, aggiornate come nel caso della boa R.O.N. a tutte le letture oggi disponibili, è stata acquisita una nuova serie storica di adeguata lunghezza prodotta dal DICCA dell'Università di Genova:

- Dati Boa R.O.N. "Capo Gallo", coordinate 38°15,5'N 13°20,0' E, dal 29/03/2002 al 03/11/2014, con alcune vacanze;
- Dati MeteOcean DICCA, punto 8153, coordinate 38°11,4'N 13°27,3' E dal 01/01/1979 al 31/12/2017.

Nella Figura 7-1 si riporta la disposizione dei punti geografici a cui le fonti si riferiscono rispetto al paraggio in esame.

Di seguito si riporta l'esame delle suddette fonti e la stima di idoneità e l'eventuale adattabilità alle finalità del presente studio.

Solo la serie storica denominata DICCA 8153 è da ritenersi adeguatamente lunga per le analisi statistiche occorrenti ai fini del presente studio (eventi estremi con alti tempi di ritorno ai fini della progettazione esecutiva) e per tale ragione il set dati è stato elaborato e aggiunto per il confronto.

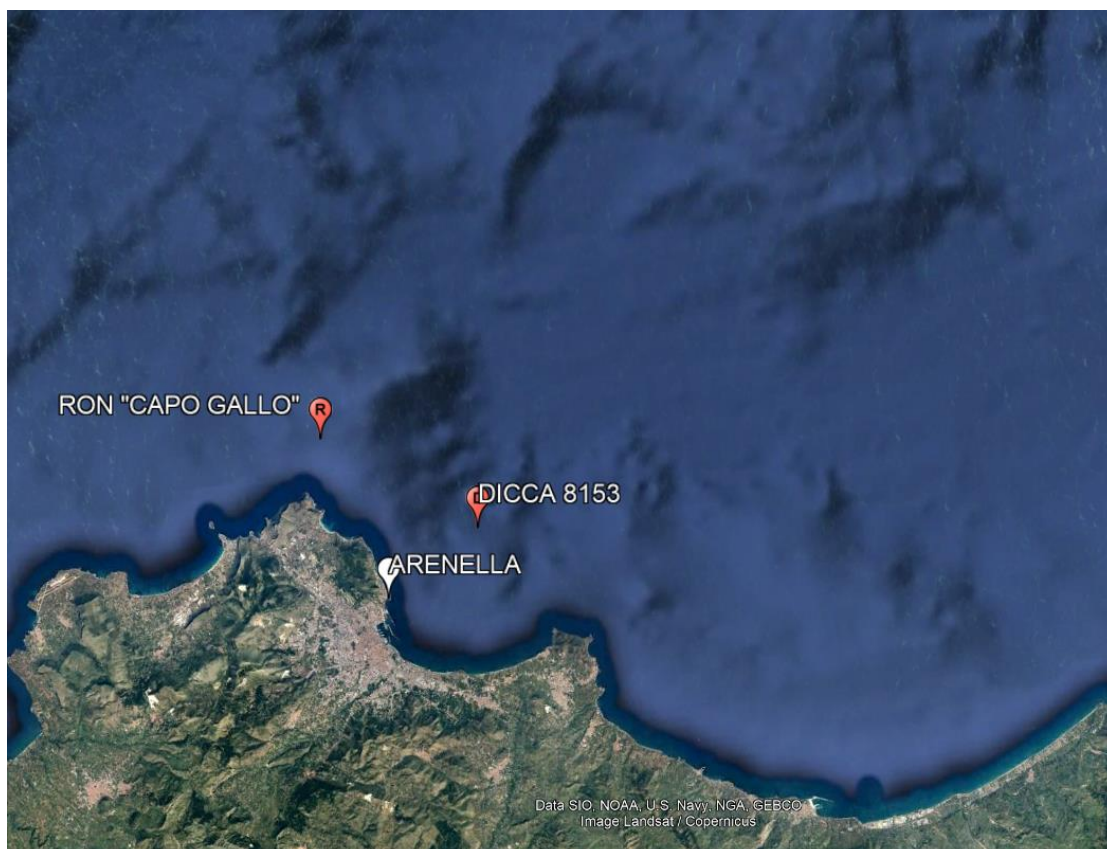


Figura 7-1: Posizione delle stazioni di dati ondametrici utilizzate

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



7.1 Boa R.O.N. di Capo Gallo

La boa RON che meglio si rapporta al campo di generazione del moto ondoso di nostro interesse per il paraggio in esame è quella di Capo Gallo.

La boa di Capo Gallo ha le seguenti caratteristiche:

STAZIONE	CODICE WMO	LATITUDINE	LONGITUDINE	PROFONDITA'
PALERMO	61 209	38°15'.5N	13°20'.0E	125 m

I dati registrati disponibili ricoprono un periodo che va dalle ore 9:00 del 29/03/2002 alle ore 10:00 del 03/11/2014; il totale dei dati disponibili è 143.309.

Occorre evidenziare la che la boa ha avuto delle interruzioni di servizio con alcune vacanze significative ai fini delle statistiche in elaborazione. In almeno sette casi la boa

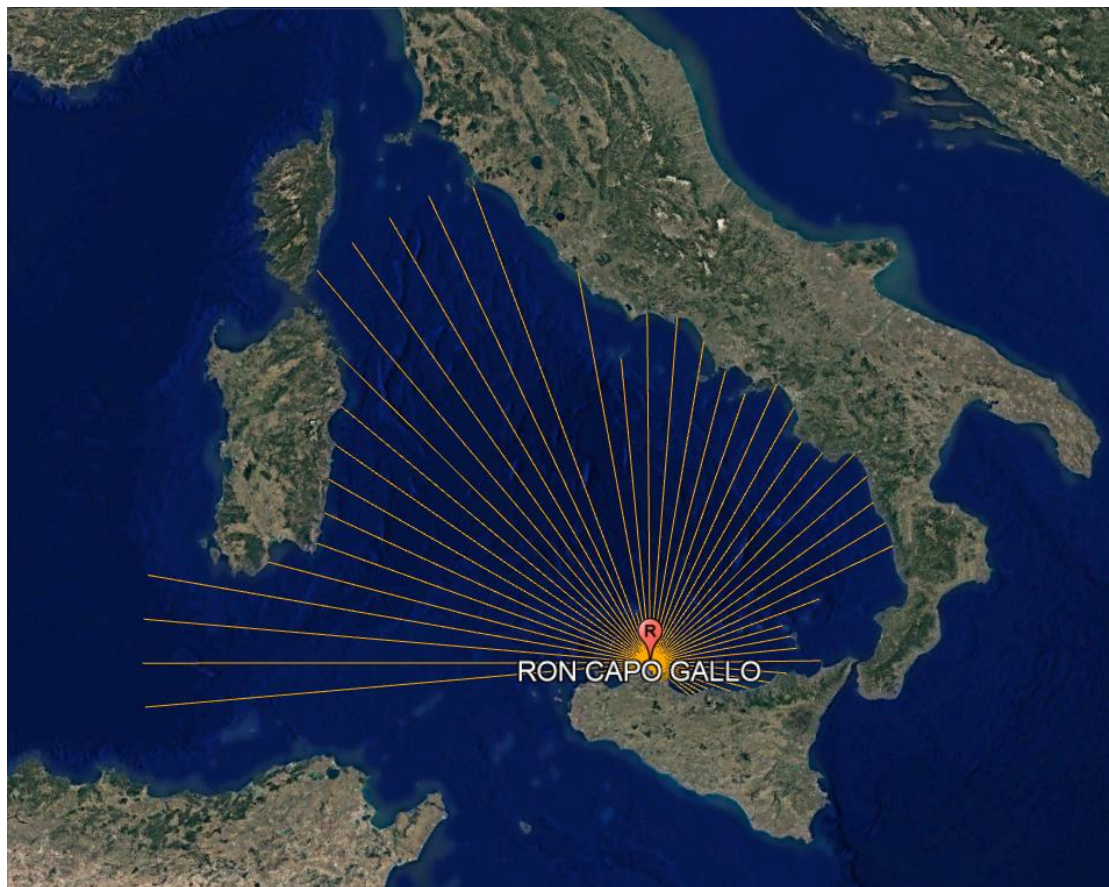


Figura 7-2: Fetch geografici per la Boa R.O.N. Capo Gallo (Palermo)

ha subito interruzioni di rilevamento molto lunghe proprio nel periodo invernale, in cui si verificano le mareggiate maggiori.

Nella figura seguente Figura 7-3 sono rappresentate mediante diagramma polare la frequenza di occorrenza su base annua per settore di provenienza del clima ondoso registrato. Nel diagramma, per ogni direzione di provenienza considerata (24 direzioni ampiezza 15°), è riportata la frequenza percentuale annua di apparizione di ciascuna classe di altezza d'onda.

REGIME ONDOSO ANNUALE

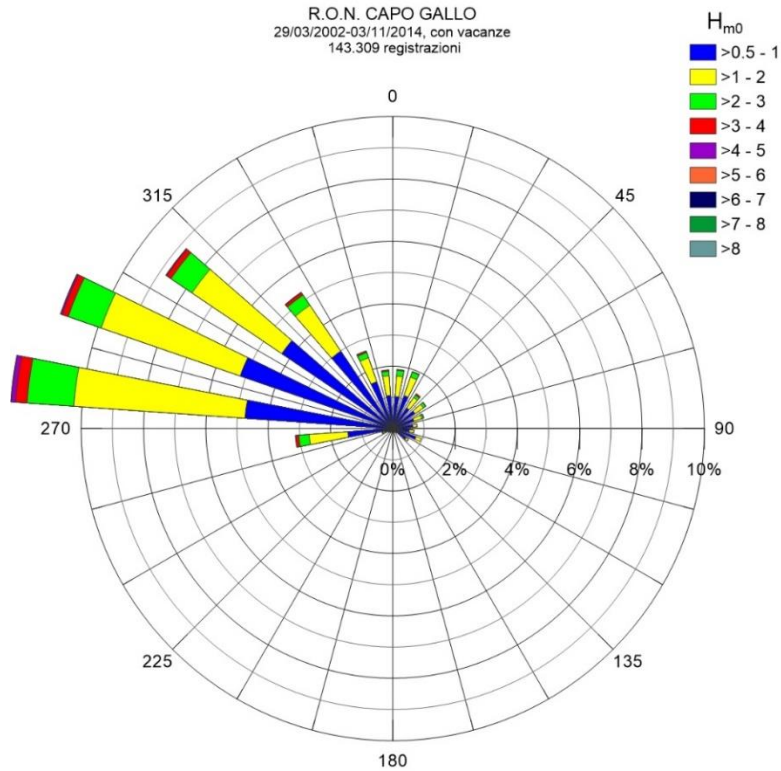


Figura 7-3: Boa R.O.N. Capo Gallo, regime ondoso annuale

**DIAGRAMMA POLARE DELLE ALTEZZE SIGNIFICATIVE H_{m0} (m)
 PER CLASSI DI PERIODO MEDIO T_m (s)**

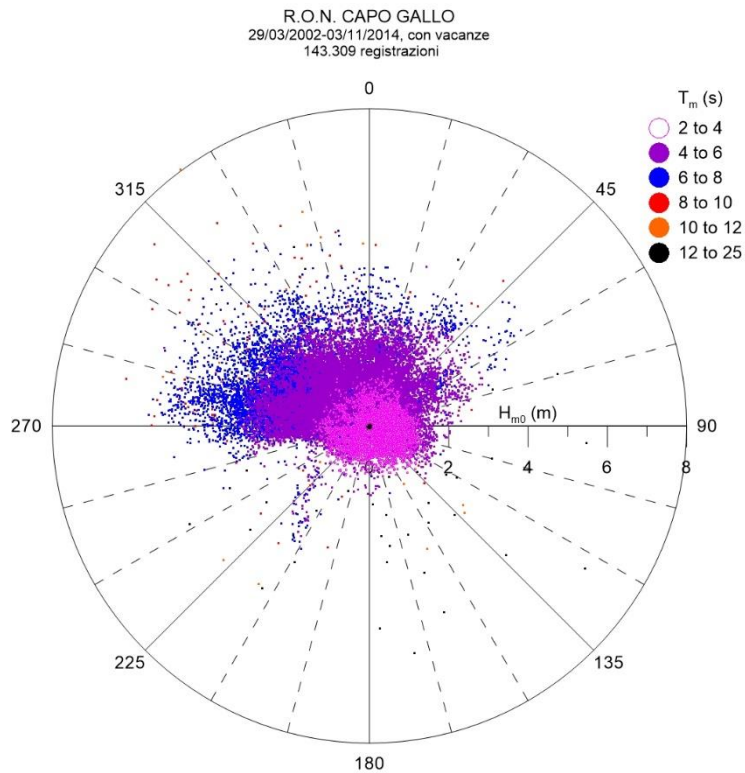


Figura 7-4: Boa R.O.N. di Capo Gallo: altezze significative (H_{m0}) per classi di periodo medio (T_m)

7.1.1 Esame dei dati

Occorre intanto evidenziare che le registrazioni della boa nel suo periodo di esistenza non sono state continue essendosi verificate almeno sette interruzioni di funzionamento di cui la più lunga di quasi un anno e mezzo tra il 2008 ed il 2009. Complessivamente le assenze di registrazioni assommano a 1221 giorni con mancanze in almeno tre stagioni invernali ove si verificano gli eventi più gravosi.

Per quanto riguarda la boa di Palermo, si osserva che i fetch geografici maggiori corrispondono al primo quadrante (0-90°N) e, soprattutto, al quarto quadrante (270-360°N), nel quale viene raggiunto il valore limite di 500 km. I fetch efficaci, evidentemente, presentano un andamento più uniforme rispetto ai fetch geografici, con valori massimi prossimi ai 450 km per le direzioni di Nord-Ovest.

I dati ondametrici di largo utilizzati per il sito di Palermo sono riportati in Figura 7-4 in forma di diagramma di scatter polare.

Per descrivere il clima ondoso medio annuo, i dati ondametrici sono stati suddivisi in classi di altezza significativa e direzione di provenienza, per ciascuna delle quali è stato conteggiato il numero di eventi e derivata la frequenza relativa di apparizione. Le ampiezze delle classi di altezza d'onda e direzione utilizzate sono pari, rispettivamente a 1 m e 15°.

I risultati sono illustrati graficamente nel diagramma polare di tipo *wave rose* di Figura 7-3. Nel grafico, il raggio dei settori circolari associati a ogni classe direzionale è proporzionale alla frequenza relativa di ciascuna classe di altezza d'onda compresa nella classe.

Coerentemente con quanto osservato circa l'esposizione del paraggio, è evidente la prevalenza degli stati di mare provenienti dal quarto quadrante. In particolare, i settori con le maggiori frequenze annue di apparizione, superiori al 10%, sono centrati sulle direzioni 280-290°N. Complessivamente, oltre il 50% delle onde incidenti proviene dai settori 270-320°N.

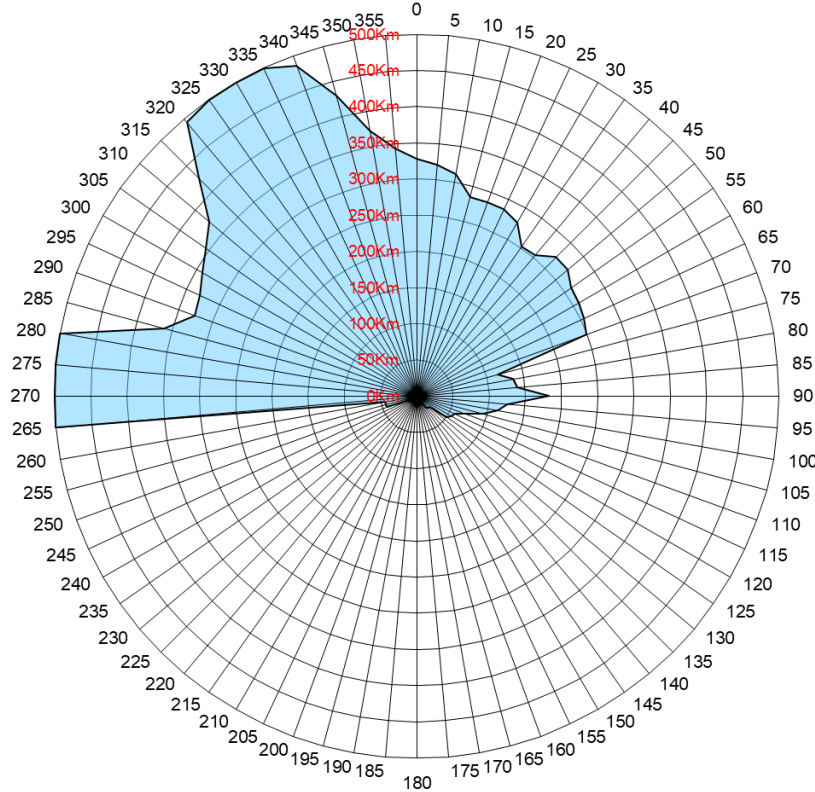
7.1.2 Verifica di adattabilità della base dati acquisita

Con il metodo espresso nel Par. 2.5 a pag. 14 viene effettuata una analisi di rappresentatività e quindi una verifica di adattabilità della base dati al nostro paraggio. Nelle immagini riportate in Figura 7-6 sono rappresentati i confronti tra le distanze di mare libero relative al sito di misura e al paraggio in studio.

Nel settore di traversia di nostro interesse (320°- 0°- 110° N) si nota una sostanziale coincidenza dei fetch efficaci, con coefficienti di trasposizione prossimi all'unità per la generalità delle direzioni.

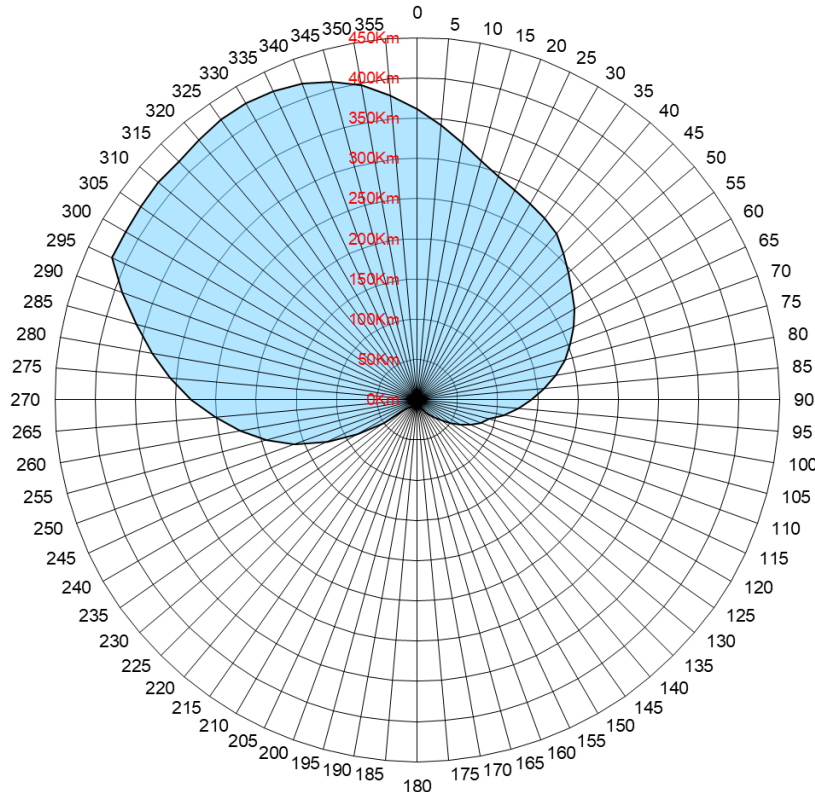
Rispetto al paraggio in interesse, la boa riveste quindi un livello di rappresentatività notevolissimo. Purtroppo la limitatezza della serie storica e discontinuità dei dati registrati non ne consente l'uso completamente soddisfacente ai fini del presente studio relativamente all'estrapolazione di eventi estremi con alti tempi di ritorno, rimanendo certamente rappresentativa ai fini della determinazione del clima ondametrico.

FETCH GEOGRAFICI SITO DI MISURA



□ R.O.N. "Capo Gallo", 38°15'5"N 13°20'E

FETCH EFFICACI SITO DI MISURA



□ R.O.N. "Capo Gallo", 38°15'5"N 13°20'E

Figura 7-5: RON Capo Gallo, fetch geografici ed efficaci

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE

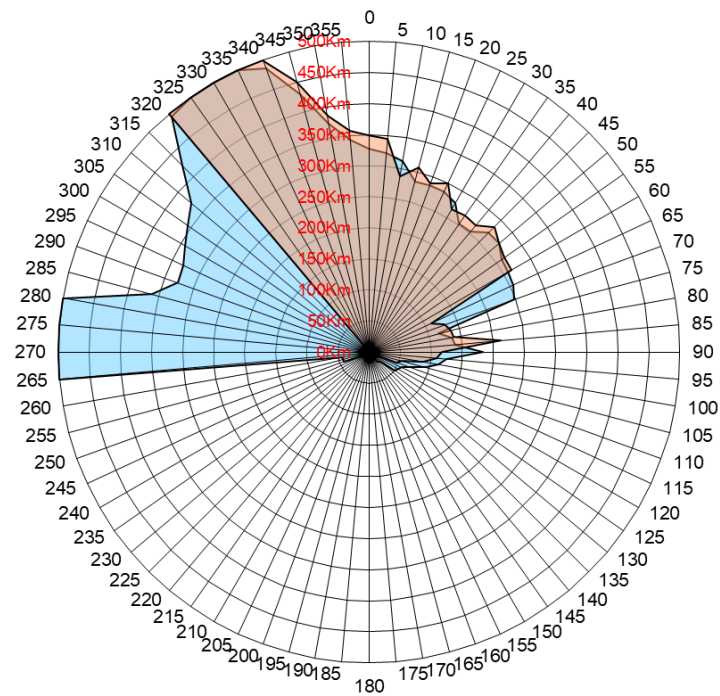


Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE

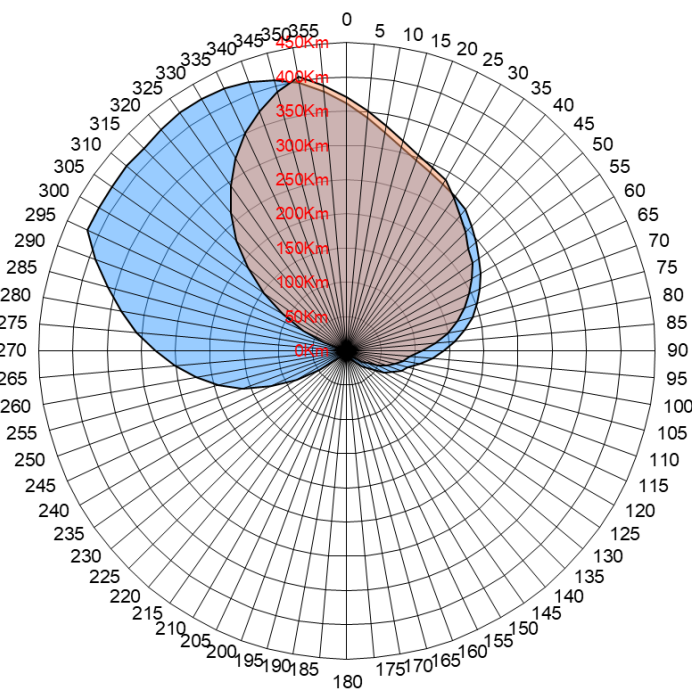


CONFRONTO TRA I FETCH GEOGRAFICI



■ R.O.N. "Capo Gallo", 38°15'5"N 13°20'E
 ■ Arenella

CONFRONTO TRA I FETCH EFFICACI



■ R.O.N. "Capo Gallo", 38°15'5"N 13°20'E
 ■ Arenella

Figura 7-6: RON Capo Gallo, confronto tra i fetch geografici ed efficaci

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE

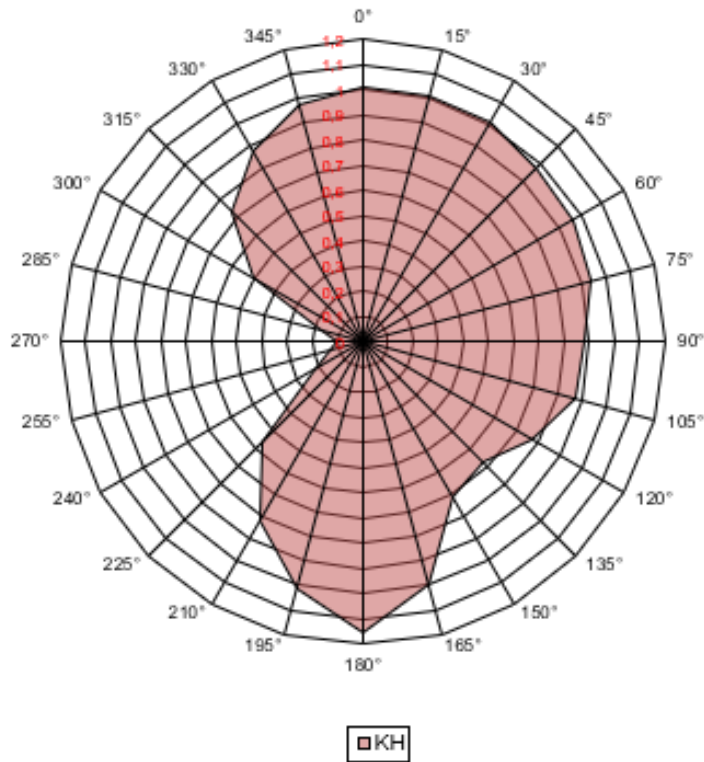


Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



COEFFICIENTE DI TRASPOSIZIONE KH



COEFFICIENTE DI TRASPOSIZIONE KT

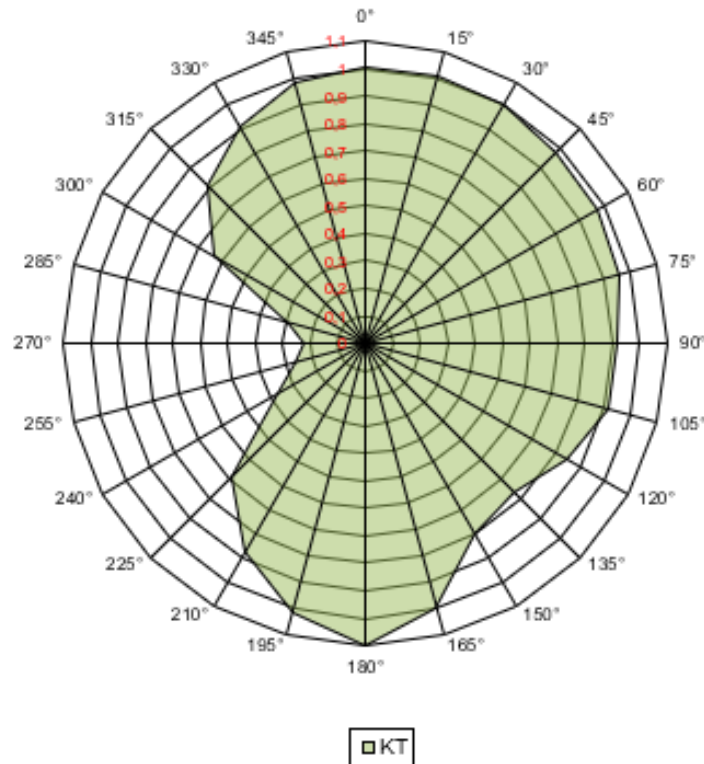


Figura 7-7: RON Capo Gallo, coefficienti di trasposizione KH e KT

7.1.3 Clima ondoso e durata delle mareggiate

Coi metodi precedentemente decritti, tratti da Boccotti (2004), sono state elaborate e tracciate le curve di probabilità di superamento $P(H_s > h)$ sia omnidirezionali che direzionali per il settore di traversia del paraggio in esame. Inoltre è stata elaborata e tracciata la curva delle durate delle mareggiate di dato H_s .

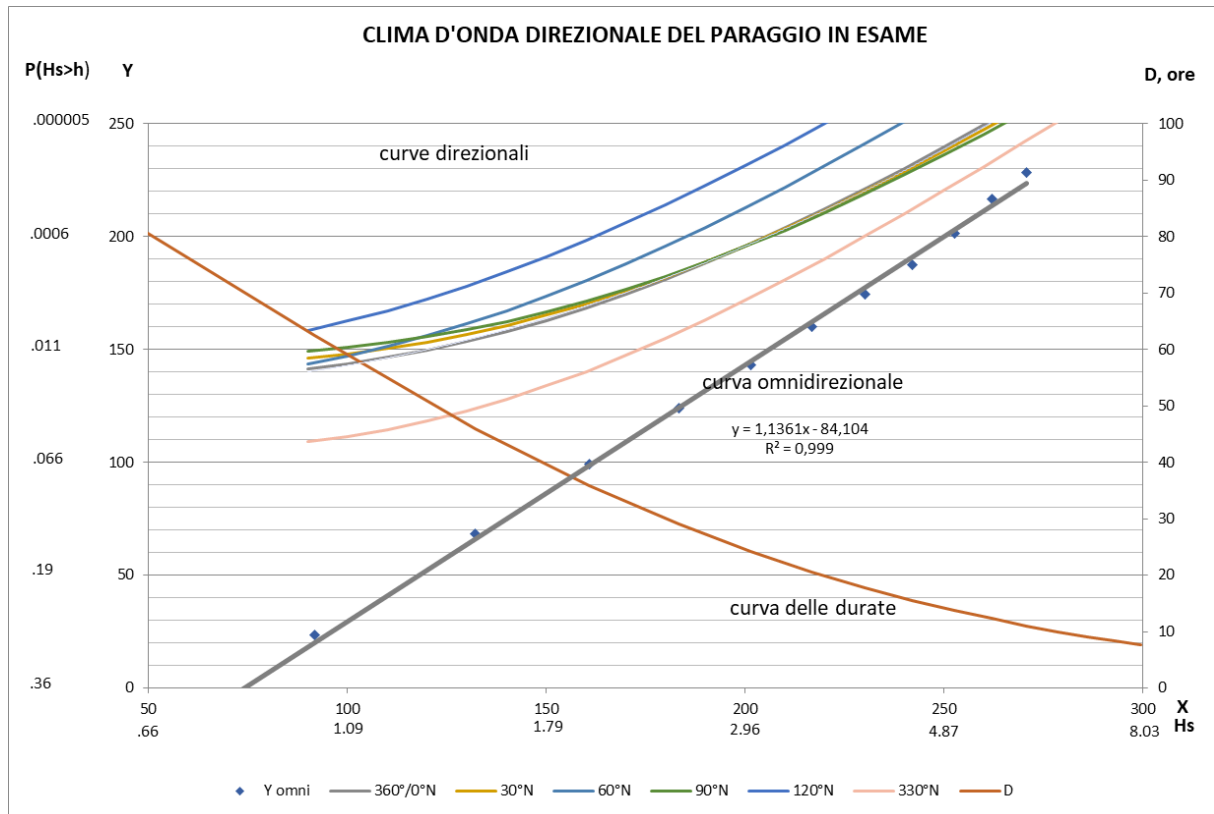


Figura 7-8: Boa R.O.N. Capo Gallo, curve di probabilità $P(H_s > h)$ del paraggio e curva delle durate

7.1.4 Eventi estremi al largo per l'“Approccio A”

Come riportato nell'introduzione al presente studio, il parere del CTA n. 531/10 del 16/03/2010, richiedeva che l'analisi degli eventi estremi finalizzata alla stima dell'altezza d'onda significativa di progetto venisse condotta con un:

Approccio A: trasponendo sottocosta direttamente gli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno individuati mediante l'analisi statistica direzionale al largo.

Il metodo è quello universalmente adottato per cui si è proceduto sempre con il metodo tratto da Boccotti (2004) sono state elaborate e tracciate le curve $R(H_s > h)$ che fornisce gli eventi estremi per dato tempo di ritorno R .

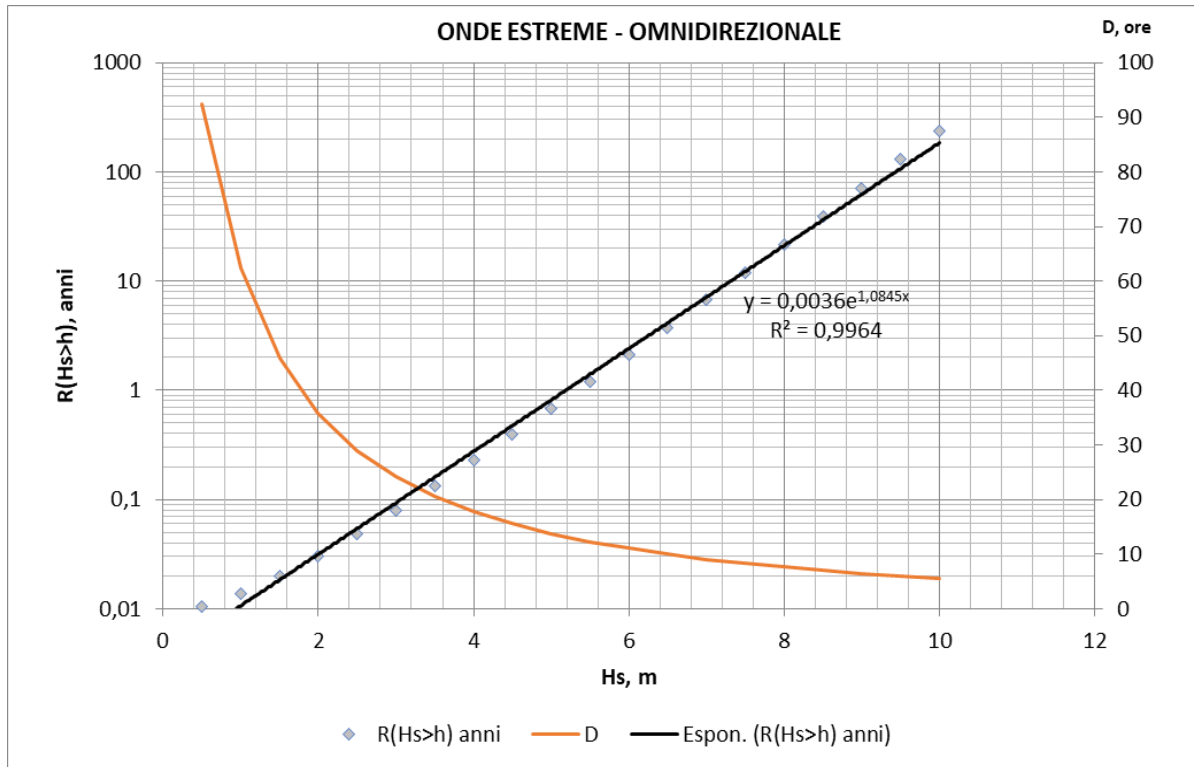


Figura 7-9: Boa R.O.N. "Capo Gallo", eventi estremi e relative durate al variare del tempo di ritorno (R)

TdR yr	330°N			360°/0°N			30°N			60°N			90°N			120°N			OMNI		
	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D
1	4.3	8.9	16	3.4	7.8	21	3.4	7.9	21	2.7	7.1	27	3.4	7.9	21	2.2	6.3	33	5.2	9.7	13
2	4.9	9.4	14	3.9	8.5	18	4.0	8.5	18	3.2	7.6	23	4.1	8.6	17	2.6	6.8	28	5.8	10.3	11
5	5.6	10.1	12	4.7	9.2	15	4.8	9.3	15	3.8	8.3	19	4.8	9.4	14	3.1	7.5	24	6.7	11.0	10
10	6.2	10.6	11	5.2	9.7	13	5.3	9.8	13	4.2	8.7	17	5.4	9.9	13	3.4	7.9	21	7.3	11.5	9
20	6.7	11.0	10	5.7	10.1	12	5.8	10.3	11	4.6	9.2	15	6.0	10.4	11	3.8	8.3	19	8.0	12.0	8
30	7.0	11.3	9	5.9	10.4	11	6.1	10.6	11	4.9	9.4	14	6.3	10.7	10	4.0	8.5	18	8.3	12.3	7
50	7.3	11.6	9	6.3	10.7	10	6.5	10.9	10	5.2	9.7	13	6.7	11.0	10	4.3	8.8	16	8.8	12.6	7
70	7.6	11.7	8	6.5	10.9	10	6.7	11.1	10	5.3	9.9	13	6.9	11.2	9	4.5	9.0	16	9.1	12.9	6
100	7.8	11.9	8	6.8	11.1	9	7.0	11.3	9	5.5	10.0	12	7.2	11.4	9	4.6	9.2	15	9.4	13.1	6
120	7.9	12.0	8	6.9	11.2	9	7.1	11.4	9	5.6	10.1	12	7.3	11.5	9	4.7	9.3	15	9.6	13.2	6

Figura 7-10: Boa R.O.N. "Capo Gallo", eventi estremi e durate per dati tempi di ritorno

Per alcune esigenze calcolistiche occorrono informazioni sul clima marittimo tramite le probabilità di superamento per specifiche durate temporali, come riportato nella tabella seguente.

Tabella 7-1: Clima marittimo, probabilità di superamento per alcuni periodi temporali

h(m) SUPERATA PER T ALL'ANNO P(Hs>h)							
T	330°N	360°/0°	30°N	60°N	90°N	120°N	OMNI
12 ore	3.6	2.7	2.7	2.2	2.7	1.7	4.44
1 gg	3.2	2.3	2.2	1.9	2.2	1.43	4.02
2 gg	2.7	1.9	1.8	1.5	1.7	1.16	3.6
5 gg	2.1	1.2	1.0	1.1	0.8	0.77	3.03

7.1.5 Mareggiate al largo per l'“Approccio B”

Il parere del CTA n. 531/10 del 16/03/2010, richiedeva inoltre che l'analisi degli eventi estremi finalizzata alla stima dell'altezza d'onda significativa di progetto venisse condotta anche con un:

- *Approccio B: trasponendo sottocosta tutti gli eventi di mareggiata sopra soglia (da individuare in relazione alle registrazioni disponibili) e successivamente effettuare la statistica degli eventi estremi direttamente sottocosta, assumendo come onda di progetto quella omnidirezionale.*

L'approccio richiesto è quello che in letteratura è detto “dei valori sopra soglia” (peak over threshold method - POT), che consiste nel selezionare, nella serie storica disponibile, gli eventi di mareggiata caratterizzati da valori di altezza d'onda superiori ad un determinato valore di soglia. Rispetto al metodo dei massimi annuali, questo metodo tende a sfruttare maggiormente la numerosità dei dati disponibili, pur rimanendo inalterato il fatto che la stima degli eventi estremi con alti tempi di ritorno risulta sempre gravata da forti incertezze se la serie storica non è sufficientemente lunga².

Nel caso del moto ondoso, considerata la natura del fenomeno, gli eventi a cui viene applicato il metodo dei valori sopra soglia vengono identificati con le “mareggiate”, identificate da una sequenza di registrazioni temporali che soddisfano determinati requisiti. Considerazioni teoriche ed empiriche suggeriscono, per l'individuazione della mareggiata, i seguenti criteri:

- presenza di onde con altezza significativa $H_m > 1.0$ m per almeno 12 ore consecutive;
- riduzione dell'altezza d'onda significativa a valori $H_m < 1.0$ m per meno di 6 ore consecutive;
- direzione di provenienza delle onde compresa in settore direzionale di ampiezza massima $\pm 30^\circ$ rispetto alla direzione iniziale.

A ciascuna mareggiata, definita in base ai criteri precedenti, viene associato un unico valore di altezza, periodo e direzione, corrispondente al picco di mareggiata, ovvero alla registrazione con il massimo relativo di altezza significativa.

È necessario, inoltre, per garantire l'indipendenza tra due mareggiate consecutive, che i loro valori di picco siano sufficientemente distanziati nel tempo; considerazioni di carattere statistico suggeriscono di considerare un intervallo minimo tra due picchi consecutivi compreso tra due e quattro giorni.

La scelta del valore di soglia, evidentemente, condiziona in modo determinante il campione di dati e, conseguentemente, le stime dei valori estremi attesi. Se si sceglie una soglia molto bassa, si ottiene un campione numeroso, in cui però sono presenti dati che potrebbero non essere propriamente riconducibili ad eventi “estremi”. Se, invece, la soglia è molto alta, si rischia di ottenere un campione troppo poco numeroso ai fini dell'analisi. Ai fini del presente studio, tenendo conto di entrambe le esigenze con i metodi di ausilio alla scelta delle soglie per le analisi POT riportati in letteratura, tenuta in opportuno conto la frammentarietà e le lacune della serie disponibile, si è scelto un valore di soglia pari a 3.0 m.

² Estrapolazioni oltre 2-3 volte la lunghezza temporale della serie storica sono scarsamente affidabili (Cfr., p.es., par. II-8-5, punto g, del C.E.M. USACE)



A scopo di esempio, in Figura 7-13 è illustrata una sequenza di dati ondametrici nella quale si possono distinguere vari eventi di mareggiata, definiti in base ai criteri esposti in precedenza. Sono, inoltre, evidenziati i valori di altezze al colmo di mareggiata superiori alla soglia prefissata di 3.0 m.



Figura 7-11: Esempio di sequenza di dati ondametrici per selezione delle mareggiate con metodo POT

7.1.6 Confronto con altri studi

Le sopraesposte elaborazioni sono state confrontate anche con i risultati di uno studio condotto sui medesimi dati ondametrici, contenuto nella pubblicazione dell'ENEA RT/2017/23/ENEA F. Pasanisi, C. Tebano "Caratterizzazione del Clima Ondoso al Largo di Due Siti Costieri Siciliani". I risultati del confronto tra i diversi metodi utilizzati sono tuttavia confortanti.

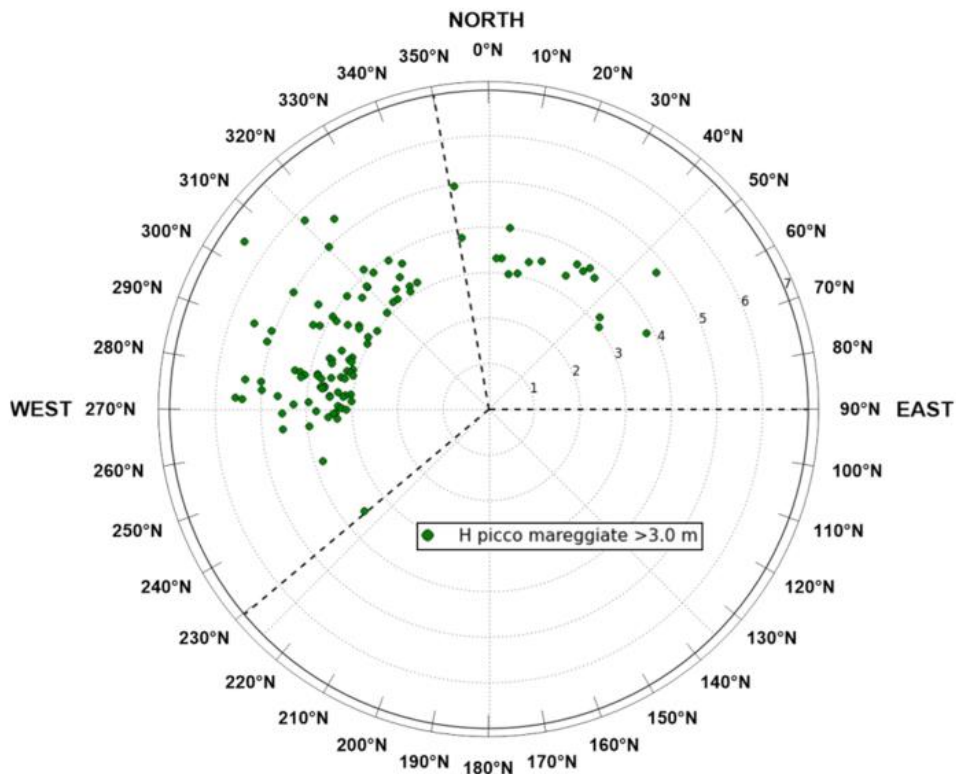


Figura 7-13: Altezze d'onda al picco di mareggiata maggiori di 3.0 m al largo: R.O.N. Capo Gallo, ENEA 2017

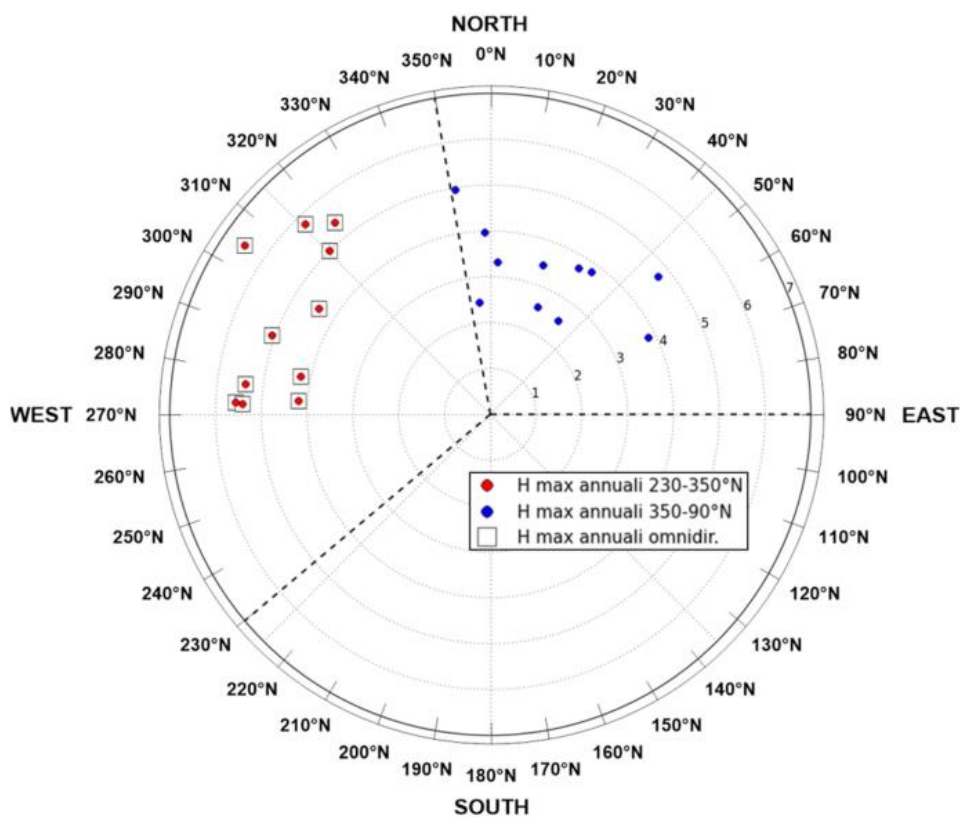


Figura 7-12: Altezze d'onda massime annuali al largo: R.O.N. Capo Gallo, fonte ENEA 2017

PALERMO - massimi annuali 230-350°N/omnidir. - altezze d'onda previste H_m [m]					
T_R [anni]	Gumbel	Weibull $k=0.75$	Weibull $k=1.00$	Weibull $k=1.40$	Weibull $k=2.00$
1.0	4.71	4.74	4.68	4.65	4.66
2.0	5.32	5.10	5.18	5.28	5.36
5.0	5.92	5.73	5.85	5.93	5.96
10.0	6.34	6.27	6.35	6.36	6.32
20.0	6.75	6.87	6.85	6.76	6.64
22.0	6.81	6.96	6.92	6.81	6.68
25.0	6.88	7.08	7.01	6.88	6.73
30.0	6.99	7.25	7.14	6.98	6.81
50.0	7.28	7.73	7.51	7.25	7.01
PALERMO - mareggiate $H>3.0$ m omnidir. - altezze d'onda previste H_m [m]					
T_R [anni]	Gumbel	Weibull $k=0.75$	Weibull $k=1.00$	Weibull $k=1.40$	Weibull $k=2.00$
1.0	4.94	4.87	4.98	4.99	4.93
2.0	5.34	5.46	5.49	5.40	5.25
5.0	5.87	6.31	6.16	5.90	5.62
10.0	6.27	7.00	6.67	6.25	5.87
20.0	6.66	7.72	7.18	6.60	6.10
22.0	6.72	7.82	7.25	6.64	6.14
25.0	6.79	7.96	7.35	6.71	6.18
30.0	6.89	8.15	7.48	6.79	6.24
50.0	7.18	8.72	7.86	7.03	6.39
PALERMO - mareggiate $H>3.0$ m 230-350°N - altezze d'onda previste H_m [m]					
T_R [anni]	Gumbel	Weibull $k=0.75$	Weibull $k=1.00$	Weibull $k=1.40$	Weibull $k=2.00$
1.0	4.91	4.80	4.93	4.96	4.93
2.0	5.33	5.40	5.46	5.39	5.26
5.0	5.89	6.27	6.16	5.92	5.66
10.0	6.30	6.98	6.69	6.30	5.93
20.0	6.71	7.72	7.22	6.66	6.18
22.0	6.77	7.82	7.30	6.71	6.21
25.0	6.84	7.96	7.39	6.77	6.25
30.0	6.95	8.17	7.53	6.87	6.32
50.0	7.26	8.75	7.93	7.12	6.48
PALERMO - massimi annuali 350-90°N - altezze d'onda previste H_m [m]					
T_R [anni]	Gumbel	Weibull $k=0.75$	Weibull $k=1.00$	Weibull $k=1.40$	Weibull $k=2.00$
1.0	3.01	3.06	2.99	2.95	2.96
2.0	3.74	3.48	3.58	3.69	3.79
5.0	4.46	4.22	4.37	4.46	4.50
10.0	4.95	4.86	4.96	4.98	4.93
20.0	5.44	5.57	5.55	5.45	5.31
22.0	5.50	5.67	5.64	5.51	5.36
25.0	5.59	5.81	5.75	5.60	5.42
30.0	5.72	6.01	5.90	5.71	5.51
50.0	6.07	6.58	6.34	6.04	5.75
PALERMO - mareggiate $H>3.0$ m 350-90°N - altezze d'onda previste H_m [m]					
T_R [anni]	Gumbel	Weibull $k=0.75$	Weibull $k=1.00$	Weibull $k=1.40$	Weibull $k=2.00$
1.0	3.61	3.47	3.52	3.58	3.64
2.0	3.98	3.82	3.91	3.98	4.02
5.0	4.41	4.36	4.43	4.44	4.41
10.0	4.72	4.82	4.82	4.75	4.65
20.0	5.03	5.32	5.21	5.04	4.87
22.0	5.07	5.39	5.26	5.08	4.90
25.0	5.13	5.49	5.34	5.13	4.94
30.0	5.21	5.63	5.44	5.20	4.99
50.0	5.43	6.03	5.73	5.40	5.13

Figura 7-14: Eventi estremi boa RON Capo Gallo da ENEA 2017

COMMITTENTE

PROGETTAZIONE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale



Progetti
e opere
CONTRACTING
SUSTAINABLE IDEAS LAB

envitek
environmental technologies
www.envitek.eu



7.2 Serie MeteOcean (1979-2017)

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale (D.I.C.C.A.) dell'Università di Genova ha creato il gruppo MeteOcean il quale ha effettuato una re-analisi delle condizioni atmosferiche e delle onde, producendo un database hindcast che va dal gennaio 1979 alla fine di dicembre 2017 sul dominio impiegato per le simulazioni di condizioni atmosferiche e delle onde.

Le re-analisi meteorologiche sono state sviluppate sul sistema di previsione climatica NCEP, CFSR per il periodo da gennaio 1979 a dicembre 2010 e CFSv2 per il periodo da gennaio 2011 a dicembre 2017.

La catena di modelli numerici utilizzata consiste in un modello meteorologico per la rianalisi e la simulazione di venti e campi atmosferici e in un modello di terza generazione per la descrizione della formazione e propagazione del vento e delle onde ondose nel bacino del Mediterraneo.

La forzante del vento impiegata nelle simulazioni è stata fornita dai campi di vento a 10 m ottenuti utilizzando il modello non idrostatico in mesoscala WRF-ARW versione 3.3.1 (Skamarock et al., 2008).

Un unico dominio computazionale è stato implementato per il modello WRF, coprendo l'intero Mediterraneo con una griglia conforme alla Lambert di circa 10 km.

Le condizioni iniziali e al contorno per le simulazioni atmosferiche con il modello WRF sono state fornite dalla banca dati CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (Saha et al., 2010). L'uso della reanalisi CFSR per la modellazione di onde ha dimostrato di essere in grado di confrontarsi bene con le misurazioni, seppur si registrino delle sottostime delle ondate maggiori (es. Chawla et al., 2013; Cox et al., 2011; Splinder et al., 2011).

La ri-analisi delle condizioni dell'onda si basa sul modello ondometrico di terza generazione WavewatchIII, versione 3.14 (Komen et al., 1994; Tolman, 2009), per la descrizione della generazione d'onda e dei processi di evoluzione del campo d'onda.

Seguendo il set-up impiegato per le simulazioni eoliche, la WWIII è stata implementata nel bacino del Mediterraneo su una griglia regolare (di seguito R10) con una risoluzione di $0,1273 \times 0,09$ gradi, corrispondente a quasi 10 km alla latitudine di 45° N e i dati ETOPO1 sono stati utilizzati per l'interpolazione sulla griglia computazionale della batimetria.

Il modello è stato forzato con i campi del vento ottenuti dal modello atmosferico con un passo temporale orario.

La validazione dell'hindcast è stata sviluppata attraverso il confronto tra i risultati numerici e le osservazioni sulla boa d'onda, utilizzando parametri integrati come l'altezza significativa dell'onda H_s , il periodo d'onda medio T_m e la direzione media di propagazione θ_m (si veda Mentaschi et al., 2013; Mentaschi et al., 2015).

Le analisi delle simulazioni di re-analisi vengono registrate ogni ora in tutti i punti della griglia di calcolo sia per le grandezze meteorologiche che per quelle d'onda.

Viene espressamente indicato dagli autori che il set di dati di hindcast può essere utilizzato per svolgere ricerche e studi nel campo dell'ingegneria costiera e oceanica. La disponibilità di una serie temporale estesa con una buona risoluzione spaziale consente infatti di avere una conoscenza dettagliata e affidabile del clima ondoso in qualsiasi punto del dominio numerico (Mar Mediterraneo). È quindi possibile eseguire tutti i tipi di analisi sui dati delle onde per gli scopi di ingegneria marittima, dalla progettazione della struttura offshore agli studi sulla morfodinamica costiera.

Il punto della griglia che è stato utilizzato è identificato 8153, di seguito le caratteristiche.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



STAZIONE	CODICE WMO	LATITUDINE	LONGITUDINE	PROFONDITA'
METEOCEAN 8153		38.190000 N	13.454700 E	649.9 m

I dati orari con frequenza oraria vanno dal 01/01/1979 al 31/12/2017 per un totale di 341.875 records.

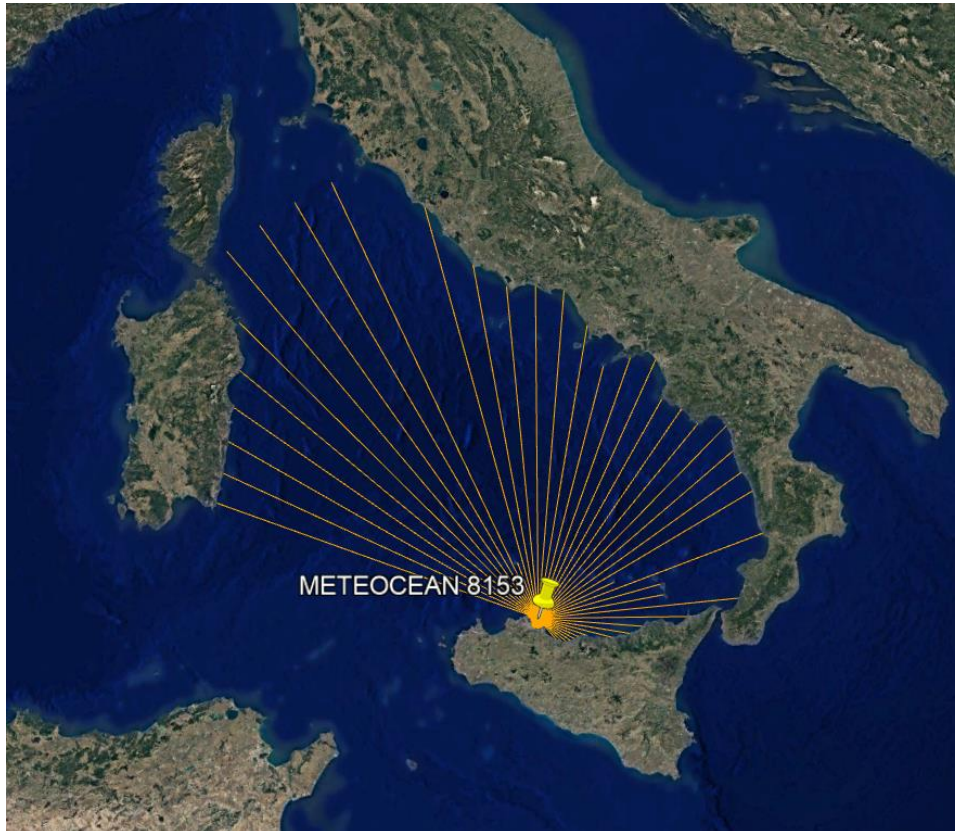


Figura 7-15: Fetch geografici per il punto MeteOcean 8153

7.2.1 Esame dei dati

Per quanto riguarda il punto della griglia MeteOcean in esame, si osserva che i fetch geografici maggiori corrispondono al primo quadrante (0-90°N) e, soprattutto, al quarto quadrante (270-360°N), nel quale viene raggiunto il valore limite di 500 km. I fetch efficaci, evidentemente, presentano un andamento più uniforme rispetto ai fetch geografici, con valori massimi prossimi ai 400 km per le direzioni di Nord-Ovest.

I dati ondametrici di largo utilizzati per il sito di Palermo sono riportati in Figura 7-16 in forma di diagramma di scatter polare.

Per descrivere il clima ondoso medio annuo, i dati ondametrici sono stati suddivisi in classi di altezza significativa e direzione di provenienza, per ciascuna delle quali è stato conteggiato il numero di eventi e derivata la frequenza relativa di apparizione. Le ampiezze delle classi di altezza d'onda e direzione utilizzate sono pari, rispettivamente a 1 m e 15°.

I risultati sono illustrati graficamente nel diagramma polare di tipo wave rose di Figura 7-17. Nel grafico, il raggio dei settori circolari associati a ogni classe direzionale è proporzionale alla frequenza relativa di ciascuna classe di altezza d'onda compresa nella classe.

Risulta evidente la prevalenza degli stati di mare provenienti dal quarto e dal primo quadrante. In particolare, i settori con le maggiori frequenze annue di apparizione,

COMMITTENTE

PROGETTAZIONE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale



superiori al 10%, sono centrati sulle direzioni 315-345°N. Complessivamente, oltre il 50% delle onde incidenti proviene dai settori del quarto quadrante.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



REGIME ONDOSO ANNUALE

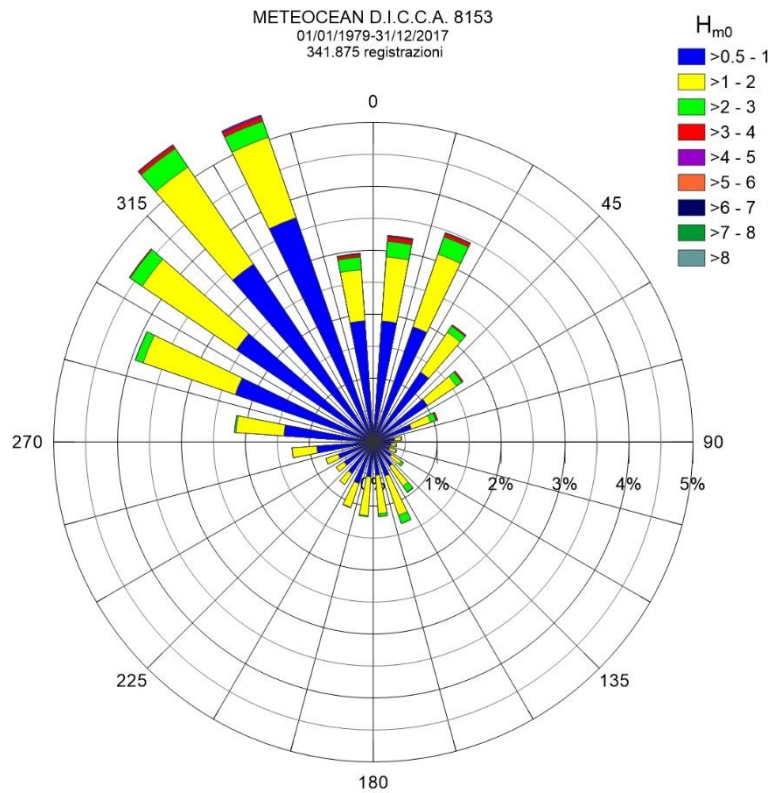


Figura 7-17: MeteOcean 8153, regime ondoso annuale

**DIAGRAMMA POLARE DELLE ALTEZZE SIGNIFICATIVE H_{m0} (m)
 PER CLASSI DI PERIODO MEDIO T_m (s)**

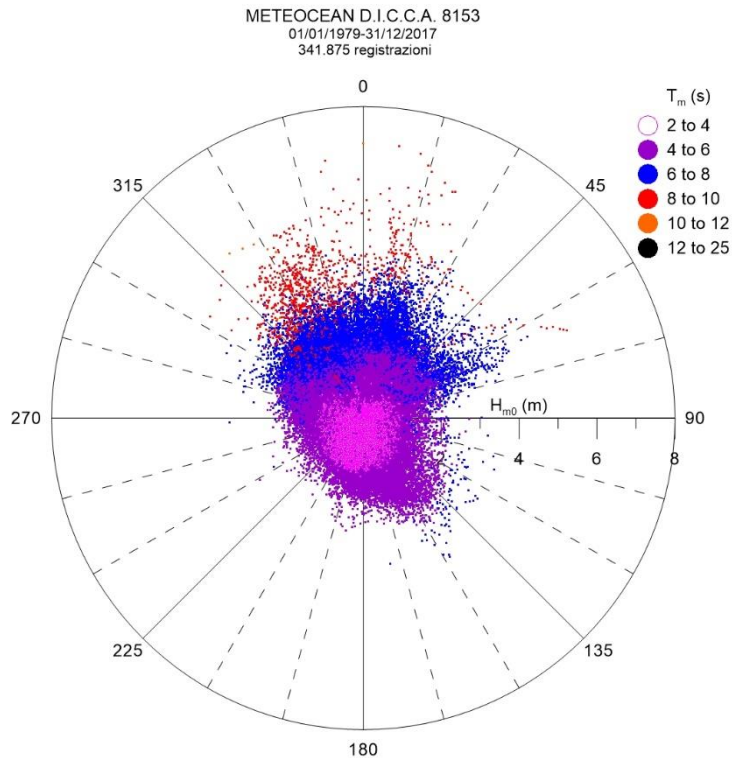


Figura 7-16: MeteOcean 8153, altezze significative (H_{m0}) per classi di periodo medio (T_m)

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
 del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



7.2.2 Verifica di adattabilità della base dati acquisita

Con il metodo espresso nel nel Par. 2.5 a pag. 11 viene effettuata una analisi di rappresentatività e quindi una verifica di adattabilità della base dati al nostro paraggio.

Nelle immagini riportate in Figura 7-19 sono rappresentati i confronti tra i diagrammi dei fetch geografici ed efficaci relativi al sito di misura e al paraggio in studio.

Nel settore di traversia di nostro interesse (320° - 0° - 110° N) si nota una sostanziale coincidenza delle distanze di mare libero, con coefficienti di trasposizione prossimi all'unità per la generalità delle direzioni.

Rispetto al paraggio in interesse, il punto della griglia riveste quindi un livello di rappresentatività notevolissimo.

La lunghezza della serie storica consente senz'altro una estrapolazione di valori estremi per alti tempi di ritorno, pur con le limitazioni di rappresentatività del clima reale intrinseche dei metodi di *wave hindcasting*.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



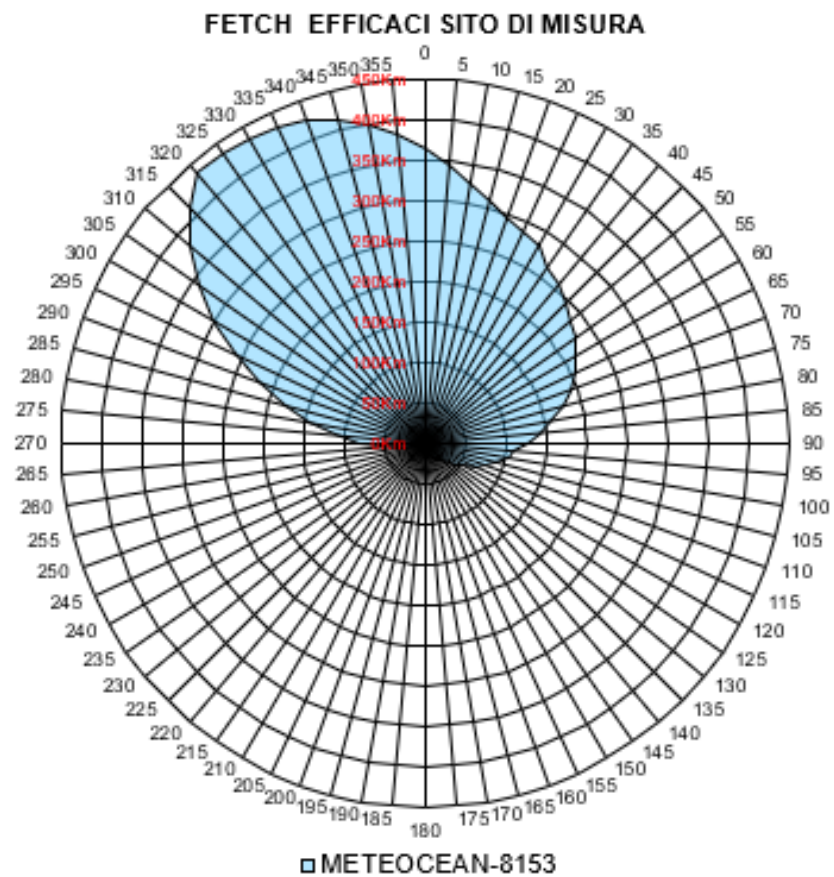
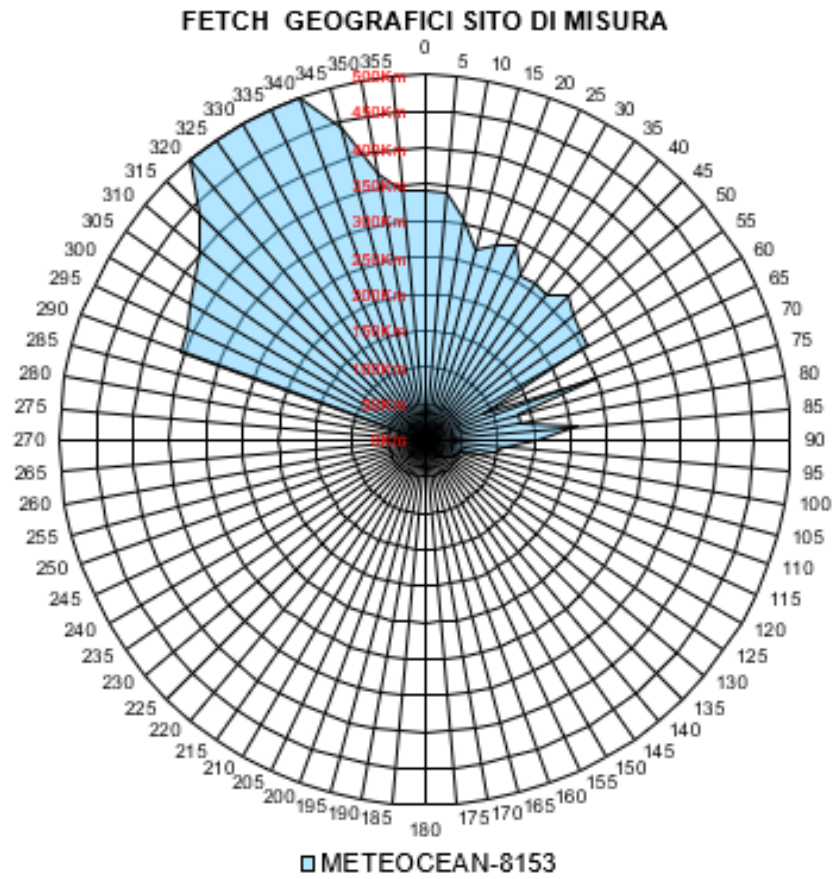


Figura 7-18: Meteocean 8153, fetch geografici ed efficaci

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



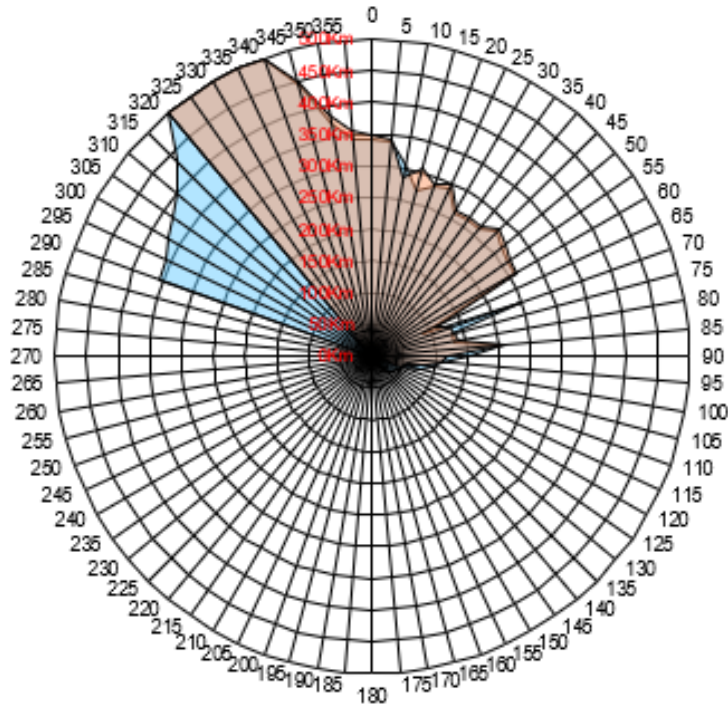
Progetti
CONTRACTING
e opere
SUSTAINABLE IDEAS LAB

envi**tekk** environmental technologies
www.envitek.eu



EO 9001

CONFRONTO TRA I FETCH GEOGRAFICI



CONFRONTO TRA I FETCH EFFICACI

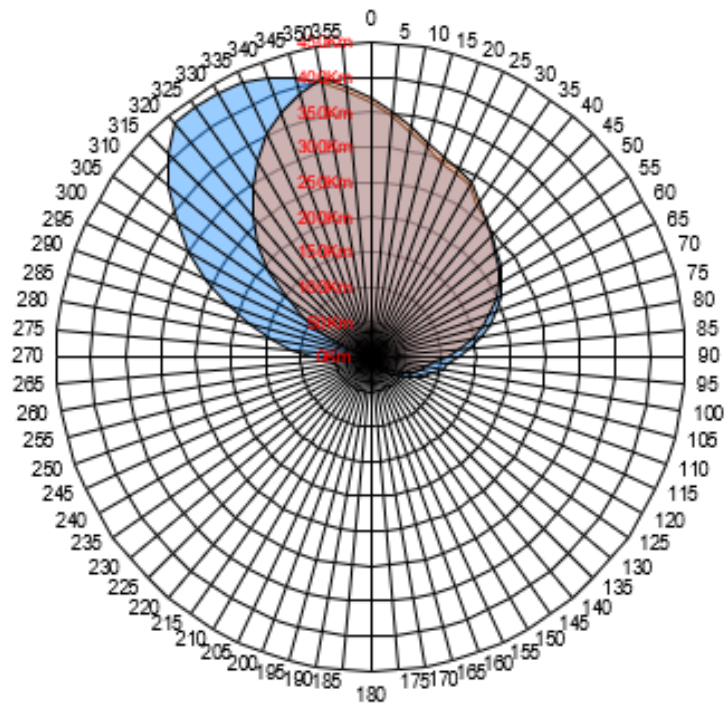


Figura 7-19: Meteocean 8153, confronto tra i fetch geografici ed efficaci

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE

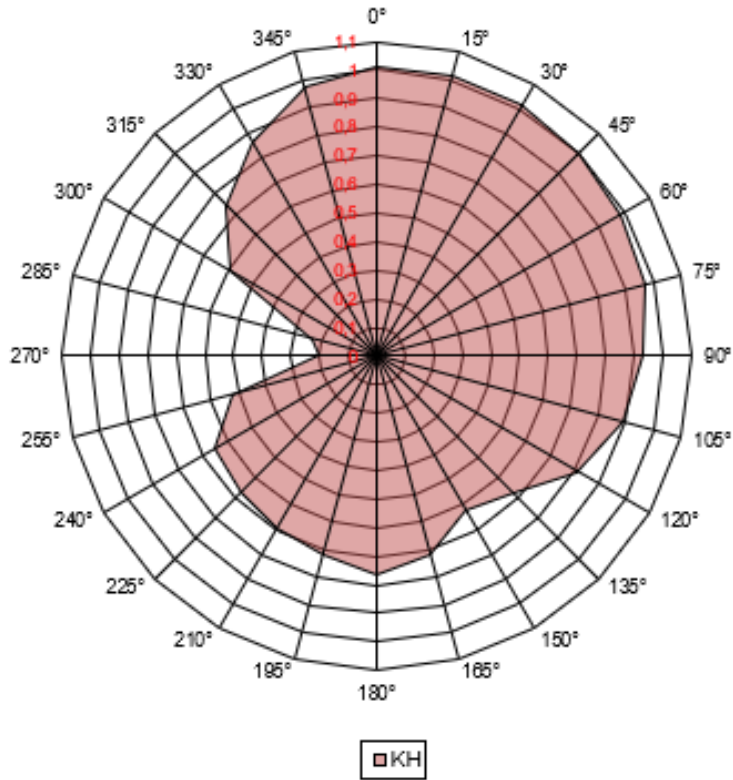


Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



COEFFICIENTE DI TRASPOSIZIONE KH



COEFFICIENTE DI TRASPOSIZIONE KT

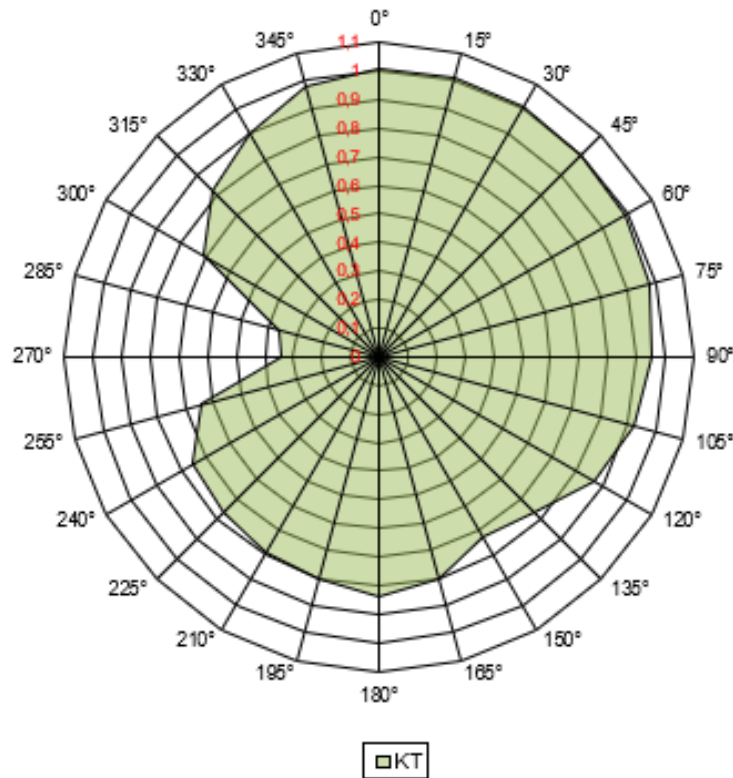


Figura 7-20: Meteocean 8153, coefficienti di trasposizione KH e KT

B.01 - RELAZIONE IDRAULICA MARITTIMA

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
 del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



7.2.3 Clima ondoso e durata delle mareggiate

Coi metodi precedentemente decritti, tratti da Boccotti (2004), sono state elaborate e tracciate le curve di probabilità di superamento $P(H_s > h)$ sia omnidirezionali che direzionali per il settore di traversia del paraggio in esame. Inoltre è stata elaborata e tracciata la

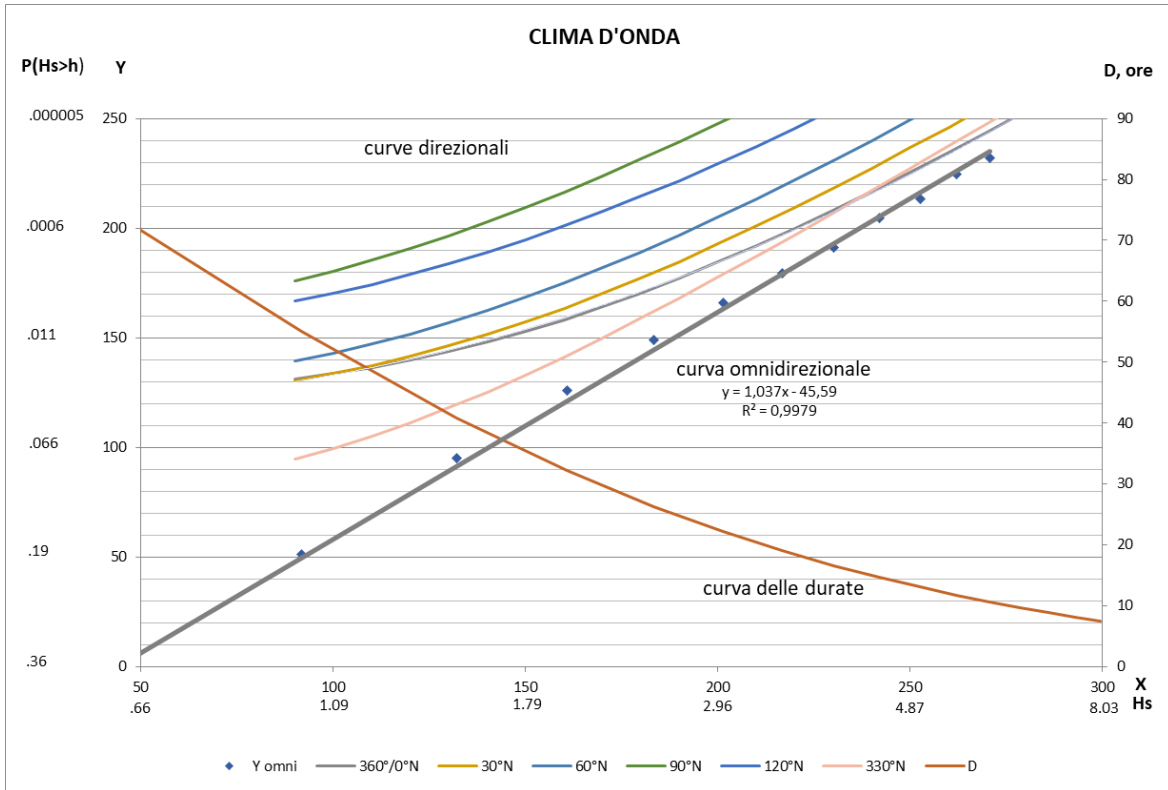


Figura 7-21: Boa R.O.N. Capo Gallo, curve di probabilità $P(H_s > h)$ del paraggio e curva delle durate

curva delle durate delle mareggiate di dato H_s .

7.2.4 Eventi estremi

Sempre con il metodo tratto da Boccotti (2004) sono state elaborate e tracciate le curve $R(H_s > h)$ che fornisce gli eventi estremi per dato tempo di ritorno R.

TdR yr	330°N			360°/0°N			30°N			60°N			90°N			120°N			OMNI		
	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D	Hs	Tp	D
1	2.7	7.0	24.3	3.4	7.9	19.5	3.0	7.4	21.8	2.6	6.9	25.4	1.4	5.1	42.8	1.8	5.7	35.6	4.1	8.6	16.3
2	3.1	7.5	21.6	4.0	8.5	16.7	3.5	8.0	18.9	3.0	7.4	21.9	1.7	5.6	36.9	2.1	6.2	30.2	4.6	9.1	14.4
5	3.6	8.0	18.7	4.7	9.2	14.1	4.1	8.7	16.0	3.6	8.1	18.6	2.1	6.1	31.1	2.6	6.9	25.2	5.2	9.7	12.5
10	3.9	8.4	17.0	5.2	9.7	12.6	4.6	9.1	14.3	4.0	8.5	16.6	2.4	6.5	27.7	3.0	7.4	22.3	5.7	10.2	11.3
20	4.2	8.8	15.5	5.7	10.1	11.3	5.0	9.6	13.0	4.4	8.9	15.0	2.6	6.9	25.0	3.3	7.8	20.0	6.2	10.6	10.2
30	4.4	9.0	14.8	5.9	10.4	10.7	5.3	9.8	12.3	4.6	9.2	14.2	2.8	7.1	23.6	3.5	8.0	18.8	6.5	10.8	9.7
50	4.7	9.2	14.0	6.3	10.7	10.0	5.6	10.1	11.5	4.9	9.4	13.3	3.0	7.4	22.1	3.8	8.3	17.6	6.8	11.1	9.1
70	4.9	9.4	13.4	6.5	10.9	9.6	5.8	10.3	11.1	5.1	9.6	12.8	3.1	7.5	21.2	3.9	8.5	16.8	7.1	11.3	8.7
100	5.0	9.6	12.9	6.7	11.1	9.2	6.0	10.4	10.6	5.3	9.8	12.3	3.3	7.7	20.3	4.1	8.6	16.1	7.3	11.5	8.4
120	5.1	9.6	12.7	6.9	11.2	9.0	6.1	10.5	10.4	5.4	9.9	12.0	3.3	7.8	19.9	4.2	8.7	15.7	7.4	11.6	8.2

Figura 7-22: MeteOcean 8153, eventi estremi e durate per dati tempi di ritorno

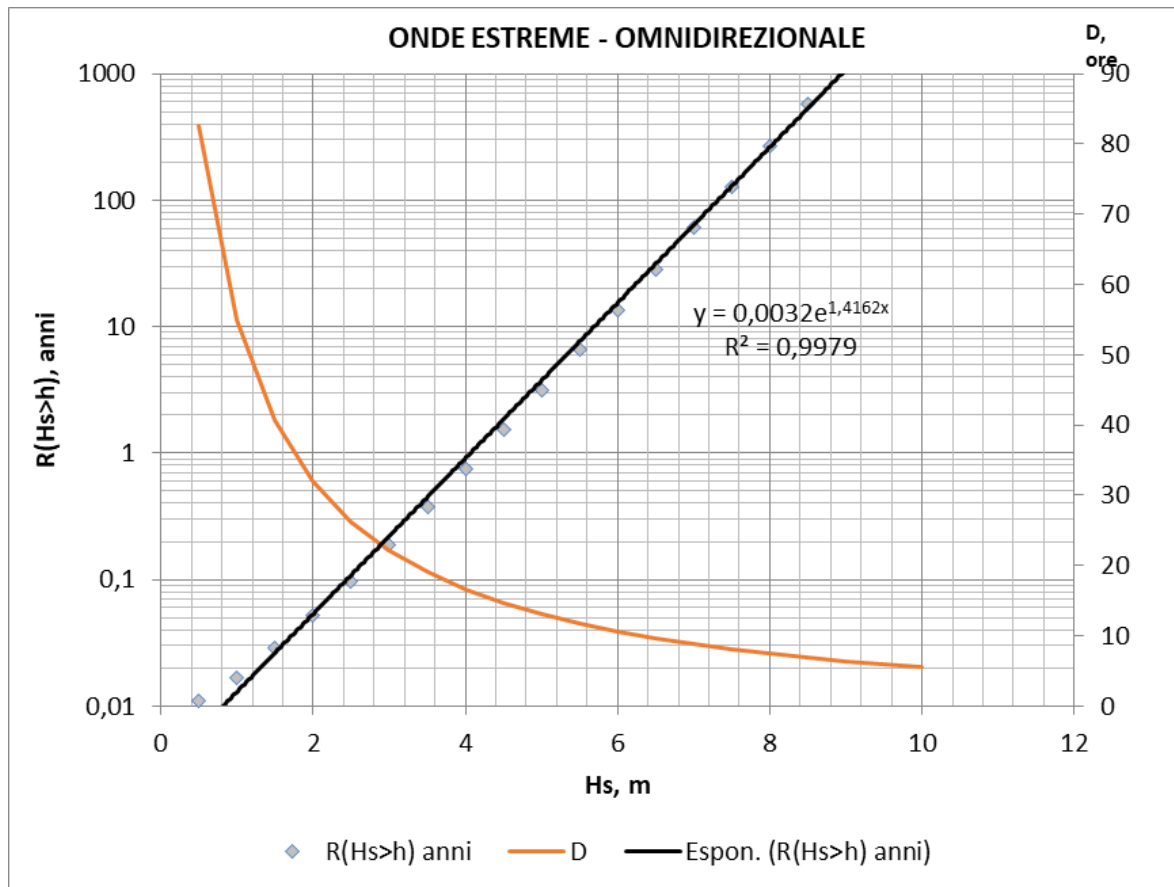


Figura 7-23: MeteOcean 8153, eventi estremi e relative durate al variare del tempo di ritorno (R)

7.2.5 Confronto con altri studi

Al fine di una verifica ulteriore ai sono voluti stimare gli eventi estremi omnidirezionali anche col noto metodo dei massimi annuali (*annual maxima method*) per cui si rimanda

Extremal Significant Wave Height Analysis

N: 39 NU: 1
 NT: 39 K: 39
 Lambda: 1.00 Mean: 4.55
 Standard deviation: 0.95

	Weibull Distribution				
	FT-I	k=0.75	k=1.00	k=1.40	k=2.0
Correlation:	0.99	0.91	0.95	0.98	0.99
Sum square of residuals:	0.08	0.62	0.37	0.13	0.06
Return Period (Yr)	Hs(m)	Hs(m)	Hs(m)	Hs(m)	Hs(m)
2	4.40	4.22	4.26	4.34	4.44
5	5.25	4.94	5.12	5.26	5.34
10	5.82	5.60	5.77	5.86	5.85
25	6.53	6.58	6.64	6.57	6.43
50	7.06	7.38	7.29	7.06	6.81
73	7.35	7.84	7.64	7.33	7.00
100	7.59	8.24	7.94	7.54	7.15

Figura 7-24: MeteOcean 8153, eventi estremi omnidirezionali col metodo dei massimi annuali

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Progetti e opere
 CONTRACTING
 SUSTAINABLE IDEAS LAB



www.envitek.eu



EO 9001

a Goda (1988). Ci si è avvalsi dell'ausilio dell'apposita routine ACES, prodotta dal CERC-USACE.

È stato notato che la distribuzione di Weibull con $k=0.75$ presenta l'anomalia del più alto coefficiente di correlazione insieme al più alto valore per la somma dei quadrati residui, pertanto la distribuzione viene tralasciata perché poco significativa.

Stante le incertezze intrinseche del metodo, considerando che i valori di correlazione delle restanti distribuzioni sono molto vicini, come anche suggerito nelle Technical Reference di ACES, i risultati possono essere mediati.

Dal confronto effettuato si è potuta riscontrare una buona rispondenza tra i risultati ottenuti con metodi statistici diversi.

7.3 Conclusioni

Valga intanto ricordare che a tutt'oggi non esiste un sistema per la identificazione degli stati reali del mare che sia assolutamente affidabile e preciso. Ciascuno dei metodi attualmente disponibili e utilizzati, che sfruttino misure dirette o calcolazioni indirette degli stati ondametrici, presenta criticità e punti di debolezza. Da qui margini di errore nell'individuazione degli stati da prendere in considerazione per i progetti, che l'ingegnere costiero esperto può solamente minimizzare, ma non certo eliminare. Per tale ragione si confrontano basi dati ottenuti con metodi diversi al fine di valutare di volta in volta con giudizio esperto quali siano i valori da considerare secondo le finalità ingegneristiche del caso.

Nel caso in specie il confronto tra la serie storica fornita dalla boa R.O.N. "Capo Gallo" e la serie storica di *wave hindcasting* ottenuta dalle elaborazioni MeteOcean del DICCA di Genova consente le seguenti considerazioni:

- I "punti di misura" della boa R.O.N. e del punto 8153 MeteOcean sono molto prossimi e ben indicativi dello stato di mare al largo dell'Arenella;
- La direzionalità del clima vede una prevalenza delle mareggiate maggiori da W-NW per la boa di Capo Gallo e da NW-N per il punto MeteOcean, ciò probabilmente dovuto ad una certa schermatura di quest'ultimo ad Ovest;
- I massimi eventi registrati nei due punti di misura si discostano alquanto; la boa R.O.N., nel suo periodo di funzionamento di 12 anni, con mancanze in cinque inverni, ha registrato un evento massimo di 8,03 m da 324°N (anche se possono nutrirsi dubbi di corretto funzionamento su tale registrazione "isolata"); MeteOcean 8153 nella serie continua di 39 anni, riporta un evento massimo di 7.05 m da 8°N.
- Si nota uno scostamento significativo nell'elaborazione degli eventi estremi omnidirezionali con valori sensibilmente maggiori nella serie RON.
- Sulle analisi dei valori estremi direzionali si notano scostamenti sensibili, sempre con valori maggiori per la serie RON, nelle direzioni 330°N e 90°N, probabilmente per le differenze negli effetti di ridosso, sopra dette.

Gli studi condotti (cfr. "Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea", L. Mentaschi et al., Ocean Modelling 90 (2015) 82–94 e "Comparing different extreme wave analysis models for wave climate assessment along the Italian coast", L. Sartini et al., Coastal Engineering 100 (2015) 37–47) riportano una tendenza alla sottostima del modello di hindcasting rispetto alle misure dirette, che, per i valori più alti di H_s , possono arrivare al 15% e oltre. È da notare che quando le onde diventano grandi la base statistica è piccola e quindi anche la valutazione di queste tendenze è poco affidabile.

Trattandosi del caso di un progetto esecutivo di una opera marittima di una certa rilevanza il criterio di scelta dello stato di mare convenzionale di progetto deve essere improntato alla cautela.

Per tale ragione, nonostante la relativa brevità della serie storica e le fallanze, vengono preferiti e scelti i valori degli eventi estremi analizzati sulla serie della boa R.O.N. di Capo Gallo. L'affidabilità delle estrapolazioni per tempi di ritorno maggiori, che sarebbe di per sé non alta per la brevità della serie storica, viene indirettamente incrementata proprio dalle analisi condotte sulla serie MeteOcean DICCA, ben più lunga, che, considerata la intrinseca sottostima sopra riportata, porterebbe a conclusioni non troppo diverse.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



8 Analisi dei livelli idrici

I livelli idrici del sito in un determinato momento nel paraggio in esame possono avere un ruolo determinante nell'attività di studio e di analisi marittimistica dei siti e delle strutture. Tali livelli infatti, influenzando la meccanica delle onde che si propagano, possono determinare condizioni più o meno gravose rispetto a quelle riferite al livello medio del mare, che, se non prese in opportuna considerazione, possono portare a risultati falsati ed erronei.

Valga pensare al fenomeno del frangimento, certamente connesso, tra l'altro, alla profondità del fondale su cui l'onda evolve. Considerazioni superficiali sui livelli idrici effettivamente verificabili possono portare ad onde frangenti sottostimate, con gravi conseguenze sul calcolo strutturale delle opere, come è avvenuto in una cospicua casistica.

Deve considerarsi che i livelli idrici effettivi in un sito sono condizionati essenzialmente da:

- *marea*
- *storm surge*, ovvero dalla combinazione di effetti meteorologici connessi alla tempesta, tra cui l'elevazione da gradiente di pressione, dal *wind stress* e dal *wave setup*

La combinazione degli effetti delle suddette componenti è una caratteristica peculiare dei luoghi e differente tempesta per tempesta, per cui, ai fini di studio, l'unica previsione fattibile prende le mosse da considerazioni di tipo statistico e con tecniche basate sulla *life-cycle analysis*.

Considerando che per ogni tempesta vi sarà una condizione di modificazione del livello idrico, dettata dalla presenza di un certo *storm surge* e del livello di marea insistente in quel dato istante, per le calcolazioni ingegneristiche occorrerà definire quale condizione è più utile prendere in considerazione per il tipo di analisi in questione.

Per il sito in esame esistono basi dati (pressione, altezze d'onda, velocità del vento) utilizzabili per l'elaborazione statistica dei livelli idrici al di fuori di quelli determinati dalla marea di cui si dirà appresso.

Assume invece rilevanza sempre crescente la considerazione degli effetti del cambiamento climatico, su cui c'è ammissione concorde circa le influenze dirette sulle zone costiere.

8.1 Le maree

Le maree hanno una influenza notevolissima sulle escursioni dei livelli idrici che in alcuni casi possono raggiungere diversi metri. Sulle coste della Sicilia il fenomeno presenta escursioni di alcune decine di centimetri.

Anche per questa grandezza è in genere difficile la disponibilità di dati immediatamente locali per periodi di tempo sufficientemente lunghi per una analisi completa. Viepiù che nel caso delle maree la configurazione orografica del sito riveste un ruolo determinante nell'elevazione locale del livello idrico.

Di solito ci si affida quindi a:

- misure mareografiche in siti vicini a quello in esame;
- analisi numeriche con modelli di calcolo che descrivano, con le dovute semplificazioni la fisica del fenomeno;
- osservazioni *in situ*, importanti e spesso determinanti ai fini dell'individuazione corretta delle possibili escursioni massime e minime.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Si evidenzia che non esiste un mareografo installato nella zona in studio essendo il più vicino quello installato dentro il Porto di Palermo.

8.1.1 Indagine storica sui livelli idrici

Si fa riferimento al mareografo appartenente alla rete R.M.N. più vicino che è quello di Palermo e di cui si riporta di seguito il diagramma delle oscillazioni dei livelli idrici derivanti dai rilievi disponibili.

Deve intanto segnalarsi che i dati sulla escursione dei livelli idrici, come letti da un mareografo, sono strettamente dipendenti dalle condizioni orografiche del sito ove il mareografo è installato (verosimilmente all'interno di porti) ed includono, almeno in parte, una componente di tipo climatico atmosferica, denominata *storm surge*.



Figura 8-1: Stazione Mareografica R.M.N. "Palermo Santa Chiara"

dal suolo), di un sensore barometrico, di un sensore di temperatura dell'aria, e di un sensore di temperatura dell'acqua, oltre ad un sensore di umidità relativa. Inoltre 10 stazioni sono state dotate di una sonda multiparametrica per la valutazione della qualità dell'acqua. I parametri misurati sono i seguenti: temperatura dell'acqua, pH, conducibilità e redox.

Tutte le stazioni sono dotate di un sistema locale di gestione e memorizzazione dei dati e di un apparato di trasmissione (UMTS) in tempo reale alla sede centrale del SMN a Roma. Inoltre in 9 stazioni strategiche per la misura di fenomeni particolari (onde anomale) è presente un secondo sistema di trasmissione dati via satellite con tecnologia

Per tutte le stazioni della rete mareografica RMN dal mese di Gennaio 2010 al completamento dell'attività di aggiornamento e potenziamento, il parametro di livello idrometrico pubblicato viene monitorato con un nuovo sensore di livello a microonde (radar) con precisione millimetrica. Il sensore radar è installato in coppia con un secondo sensore di livello a galleggiante basato su tecnologia "shaft-encoder" (con la funzione di back-up) e inoltre è mantenuto in funzione il sensore idrometrico storico ad "ultrasuoni" presente nella RMN dal 1998.

Dal confronto delle misure di questi 3 sensori, di cui quello ad ultrasuoni usato come verifica, ISPRA è in grado di ottenere una precisa taratura del sensore radar tale da garantire una perfetta continuità delle serie dati di livello.

Ogni sensore di livello è riferito ad una staffa mareografica la cui quota è stata determinata facendo riferimento alla rete altimetrica realizzata dall'I.G.M e per precisione collegandosi al più vicino caposaldo IGM. Le stazioni sono dotate anche di un sensore anemometrico (velocità e direzione del vento a 10 metri

IRIDIUM che garantisce il collegamento anche in presenza di situazioni di black-out del sistema UMTS.

Da quando la nuova Rete Mareografica Nazionale è pienamente operativa, il SMN 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 sono disponibili, il SMN ha inoltre provveduto ad effettuare un'operazione di recupero e riorganizzazione dei dati storici della rete preesistente, in forma digitale, in modo da poter affiancare alle osservazioni storiche quelle rilevate dalla nuova rete nazionale.

La stazione di Palermo Santa Chiara è ubicata come in figura e dista 1,7 mn dal sito di progetto. Per tale ragione le misure meteorologiche e dei livelli idrici sono da ritenere molto rappresentative per gli interessi del progetto.

Purtroppo la serie storica è discontinua, per problemi legati al funzionamento della strumentazione mareografica. I dati più recenti che risultano disponibili vanno dal 01/01/2010 al 24/11/2015.

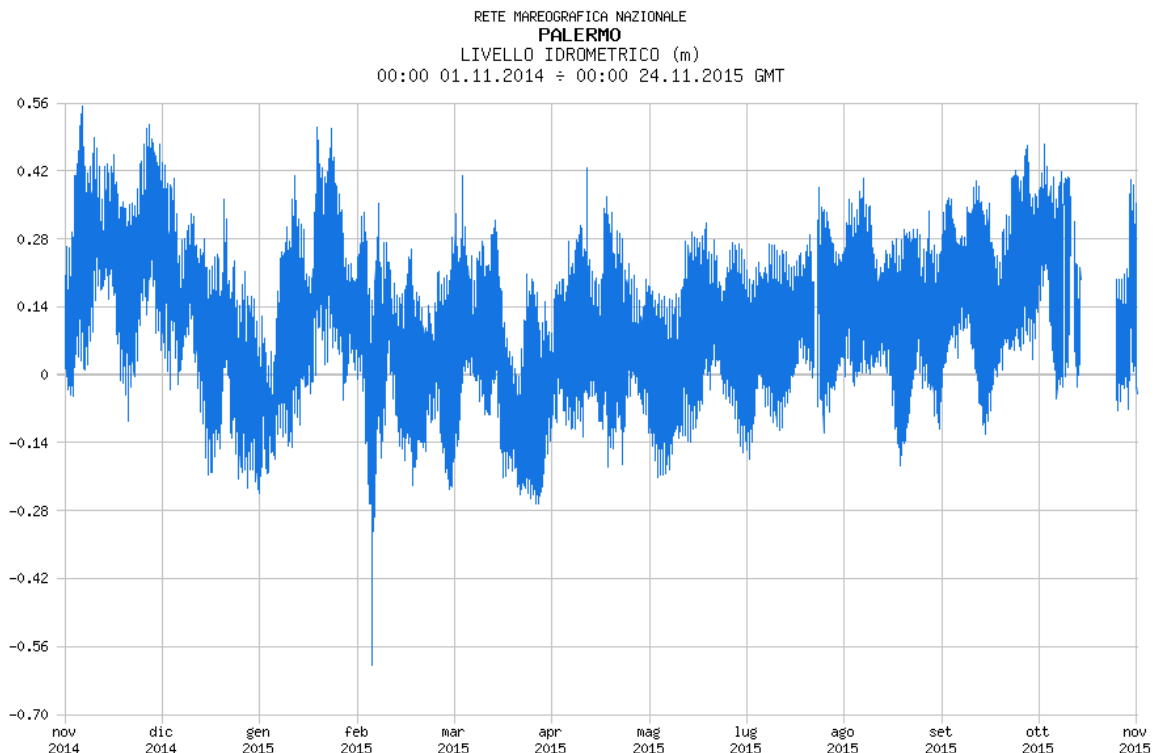


Figura 8-2: Rilevamenti mareografici condotti a Palermo (nel periodo 01/11/2014-24/11/2015)

Dai dati disponibili ed opportunamente elaborati, si osserva che il range di variazione del livello idrico per il sito di riferimento, nel periodo di osservazione, varia tra $-0,59$ e $+0,66$ m. Non è dato conoscere il livello di affidabilità di quanto riportato nell'output grafico del sito <https://www.mareografico.it>.

8.1.2 Marea astronomica locale

Come è noto il livello idrometrico registrato come dato grezzo subisce una serie di sofisticate elaborazioni per la validazione e la definizione della componente di marea astronomica e del residuo meteorologico (scostamenti di livello legati principalmente a vento e pressione atmosferica).

Si sono quindi estratti ed elaborati i dati giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield nel periodo 2001-2014.

Il massimo valore di marea registrato nel periodo è pari a 396 mm ed il minimo è stato -205 mm rispetto al livello medio del mare. La media delle medie annuali è di 96 mm.

Tabella 8-1: Elaborazioni sui livelli marini giornalieri filtrati (Bloomfield), 2001-2014 - (valori in

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
max	285	346	353	292	224	274	227	257	396	387	280	363	341	337
min	-59	-147	-133	-152	-205	-113	-101	-189	-72	-63	-121	-174	-61	-46
media	87	82	82	77	65	73	85	88	123	182	90	76	131	129

MASSIMO 396

MINIMO -205

MEDIE
 MAX 182
 MEDIA 98
 MIN 65

8.2 Elevazione per vento

L'azione del vento radente sugli specchi idrici comporta una leggera inclinazione degli stessi, montante nel verso della velocità dello stesso, denominata *wind setup*. Seguendo le indicazioni del manuale CECW-EH EM 1110-2-1414 del U.S. Corps of Engineers, nei bacini chiusi, di semplice forma con dimensioni comparabili è stato stimato che l'innalzamento del livello idrico rispetto al l.m.m. può essere fornito dalla:

$$S_w = U^2 F / (404.41 d)$$

Con:

- $S_w(m)$, detto Wind Setup, che rappresenta l'innalzamento del livello rispetto al l. m. m.;
- $U(m/s)$, velocità del vento (massima registrata alla quota di 10 metri);
- $F(km)$, fetch;
- $Z(m)$, profondità media dei fondali sul fetch.

Per il sito di interesse per stimare il wind setup si è scelto di considerare il settore di traversia ed i fetch efficaci, su cui si è considerato spirare un vento su scala Beaufort corrispondente alle mareggiate stimate al variare del tempo di ritorno. È stato quindi possibile effettuare un'analisi al variare del periodo di ritorno R , dell'aliquota dell'elevazione del livello marino dovuto al vento, S_w . Di seguito viene riportata la tabella riepilogativa dei valori ottenuti.

Tabella 8-2: Sopralzo da vento – Wind setup

SOPRALZO DA VENTO - WIND SETUP						
TdR anni	330°N	360°/0°N	30°N	60°N	90°N	120°N
1	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02
2	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.03
5	0.09	0.07	0.07	0.05	0.07	0.03
10	0.10	0.08	0.08	0.06	0.08	0.04
20	0.11	0.09	0.09	0.06	0.09	0.05
30	0.12	0.09	0.10	0.07	0.10	0.05
50	0.13	0.10	0.11	0.08	0.11	0.06
70	0.13	0.11	0.11	0.08	0.12	0.06
100	0.14	0.11	0.12	0.09	0.12	0.07
120	0.14	0.12	0.12	0.09	0.13	0.07

8.3 Elevazione per gradienti di pressione atmosferica

I gradienti di pressione, tra il centro della tempesta e le zone periferiche provocano dislivelli idrici.

L'elevazione prodotta dalle variazioni di pressione atmosferica dovute ad una tempesta sono state oggetto di rilevamenti sul campo da parte del CERC. Valori di innalzamento del livello del mare riferito a quello per la pressione atmosferica di 1013 mbar, possono ricavarsi in secondo la metodologia indicata nel manuale CECW-EH EM 1110-2-1414.

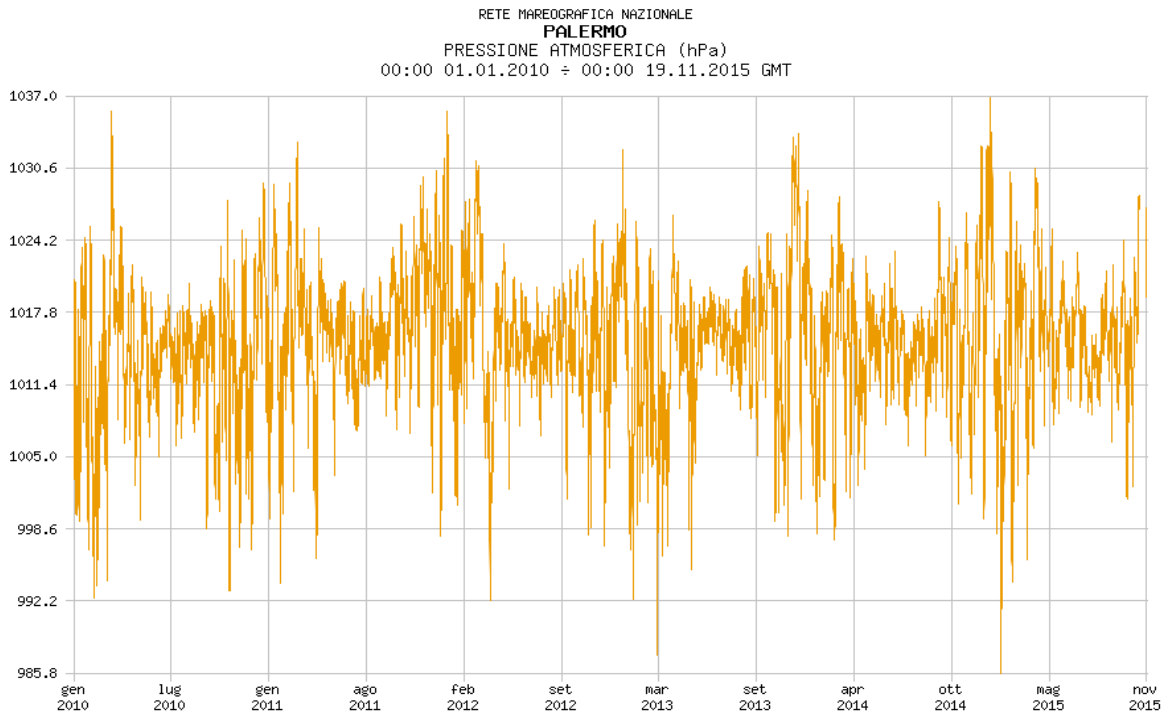


Figura 8-3: Misure barometriche rilevate nel sito RMN di Palermo per il periodo 2010-2015

Tabella 8-3: Effetto della pressione atmosferica sui livelli idrici (Fonte: CECW-EH EM 1110-2-1414. USACE)
Atmospheric Pressure Effect on Water Level

Storm Central Pressure mb	Pressure in. of Hg	Water Level Rise* ft
900	26.58	3.78
910	26.87	3.45
920	27.17	3.11
930	27.46	2.78
940	27.76	2.44
950	28.05	2.11
960	28.35	1.77
970	28.64	1.44
980	28.94	1.10
990	29.23	0.77
1000	29.53	0.43

*Relative to water level for atmospheric pressure of 1013 millibars = 29.91 inches of Hg.

I dati di pressione disponibili provengono dai rilievi effettuati dalla stazione di misura più prossima, la boa R.M.N. di Palermo, e si riferiscono al periodo 2002-2014; tali misure barometriche evidenziano livelli di pressione che oscillano tra 1041 e 985 mbar; nella



figura seguente si riporta, a titolo di esempio, il diagramma temporale dei dati rilevati relativo al periodo 2010-2015.

Dalla osservazione della tabella di seguito riportata, si evince che generalmente per i bacini chiusi si osserva una variazione di livello marino, per un'escursione della pressione di 10 mbar, pari a 0,33 ft che corrispondono a circa 10 cm.

Nel bacino mediterraneo le pressioni atmosferiche connesse alle maggiori tempeste (Medicane) hanno comportato dislivelli barici dell'ordine dei 10÷15 hpa (mbar). Effettuando le dovute conversioni tra i sistemi di misura, per il sito di Palermo, si osserva che l'oscillazione del livello idrico per effetto dei gradienti di pressione (S_p), potrebbe comportare dislivelli massimi di 10÷15 cm rispetto al l.m.m..

In mancanza di dati di pressione rilevati in situ, si conviene di considerare questi risultati vavevoli pure per il sito in esame.

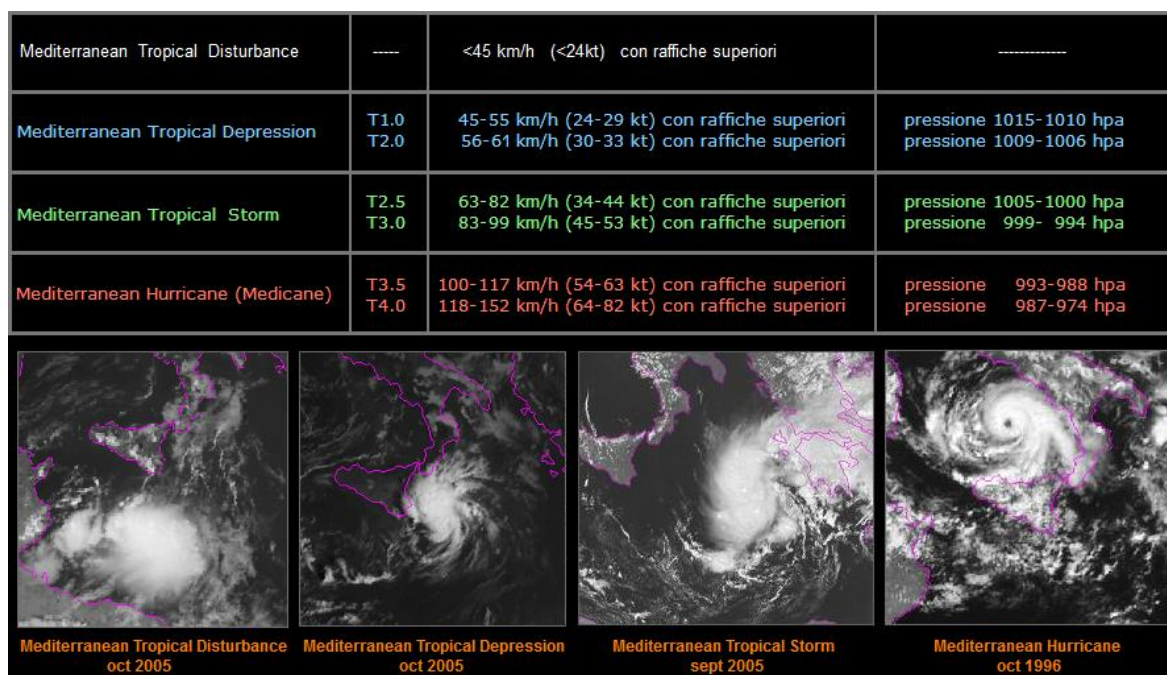


Figura 8-5: Classificazione delle tempeste nel Mar Mediterraneo

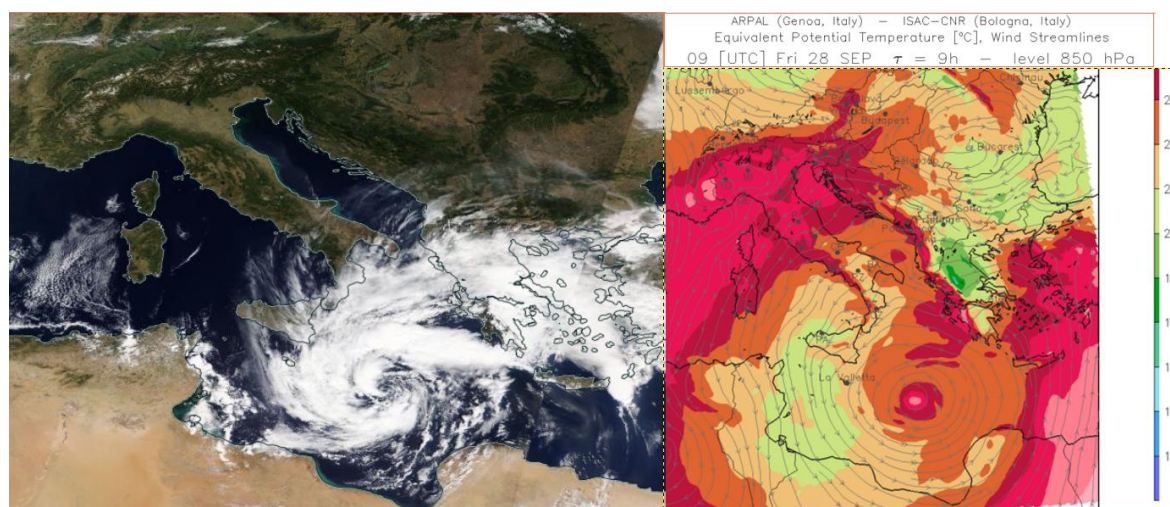


Figura 8-4: Il Medicane "Zorbas", 28/29 settembre 2018

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Progetti
e opere
CONTRACTING
SUSTAINABLE IDEAS LAB

envitek
environmental technologies
www.envitek.eu



EO 9001

8.4 Elevazione per onde (wave setup)

Il *wave setup* è innalzamento del livello idrico dovuto alla dissipazione energetica delle onde. Questo aumenta man mano che la profondità dell'acqua vicino a una barriera diminuisce con l'aumento del frangimento. Mentre le onde frangono trasferiscono la loro quantità di moto alla colonna d'acqua, causando un innalzamento del livello idrico che può essere dell'ordine di 10 al 20 percento dell'altezza dell'onda frangente.

Al di fuori della zona dei frangenti, invece, si verifica una piccola riduzione del livello medio dell'acqua, definito *setdown*. Il *setdown* è piccolo, circa il 5 percento dell'altezza dell'onda frangente.

L'innalzamento rimane grossomodo costante fintanto che la tempesta (come combinato marea astronomica più tempesta) e le condizioni dell'onda incidente rimangono invariate. Sebbene esistano formulazioni teoriche per la descrizione del *wave setup* statico ideale, il suo valore reale dipende da un numero di fattori aleatori e di difficile interpretazione, tra cui la non linearità dell'onda, le caratteristiche di rottura dell'onda, la morfologia del fondale e altri fenomeni che possano incidere sulla trasformazione delle onde.

Insieme alla componente statica del *wave setup* si registrano anche oscillazioni che comportano quindi una componente dinamica, con le caratteristiche di un'onda infragravitazionale. Queste oscillazioni si verificano in genere con periodi da 10 a 20 volte il periodo medio delle onde incidenti. Il *wave setup dinamico* aumenta con gli spettri a frequenza stretta e gli spettri direzionali stretti, entrambi non caratteristici delle condizioni della tempesta.

Vengono suggeriti dalla letteratura diversi metodi per la stima della componente statica del *wave setup*. Tra i più noti quello descritto nel manuale EM 1110-2-1414 USACE, quello descritto nello Shore Protection Manual (SPM), come anche il metodo di Goda (2008).

Tra i lavori più recenti Ji, Zhang e Wu (2018) hanno proposto una nuova formula empirica per la stima del massimo valore di *wave setup* basata su un modello accoppiato onda-corrente. I confronti con le formulazioni empiriche precedenti e con i dati di campo hanno dato un risultato convincente. Vero è che ancora la ricerca dovrà lavorare per rendere le formulazioni applicabili anche ai casi di morfobatimetrie complesse e presenza di strutture.

Tabella 8-4: S_{wave} al variare del tempo di ritorno

		330°N			η_{max}	Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	η	Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	
TdR	H_0	Tp	L_0						
anni	Hs	sec	m						
1	4.3	8.9	122	0.66	0.151878	0.59	0.13669		
2	4.9	9.4	139	0.74					
5	5.6	10.1	160	0.86					
10	6.2	10.6	175	0.94					
20	6.7	11.0	190	1.02					
30	7.0	11.3	198	1.06					
50	7.3	11.6	208	1.12					
70	7.6	11.7	215	1.15					
100	7.8	11.9	222	1.19					
120	7.9	12.0	225	1.21					
		360°/0°N				η_{max}		Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	η
TdR	H_0	Tp	L_0						
anni	Hs	sec	m						
1	3.4	7.8	96	0.51	0.151878	0.46	0.13669		
2	3.9	8.5	112	0.60					
5	4.7	9.2	132	0.71					
10	5.2	9.7	147	0.78					
20	5.7	10.1	161	0.86					
30	5.9	10.4	169	0.90					
50	6.3	10.7	179	0.96					
70	6.5	10.9	185	0.99					
100	6.8	11.1	192	1.03					
120	6.9	11.2	195	1.05					
		30°N				η_{max}		Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	η
TdR	H_0	Tp	L_0						
anni	Hs	sec	m						
1	3.4	7.9	97	0.52	0.151878	0.47	0.13669		
2	4.0	8.5	113	0.61					
5	4.8	9.3	135	0.72					
10	5.3	9.8	150	0.81					
20	5.8	10.3	165	0.89					
30	6.1	10.6	174	0.93					
50	6.5	10.9	185	0.99					
70	6.7	11.1	191	1.02					
100	7.0	11.3	199	1.06					
120	7.1	11.4	202	1.08					
		60°N				η_{max}		Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	η
TdR	H_0	Tp	L_0						
anni	Hs	sec	m						
1	2.7	7.1	78	0.42	0.151878	0.37	0.13669		
2	3.2	7.6	91	0.48					
5	3.8	8.3	107	0.57					
10	4.2	8.7	119	0.64					
20	4.6	9.2	131	0.70					
30	4.9	9.4	138	0.74					
50	5.2	9.7	146	0.78					
70	5.3	9.9	152	0.81					
100	5.5	10.0	157	0.84					
120	5.6	10.1	160	0.86					
		90°N				η_{max}		Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	η
TdR	H_0	Tp	L_0						
anni	Hs	sec	m						
1	3.4	7.9	97	0.52	0.151878	0.47	0.13669		
2	4.1	8.6	115	0.62					
5	4.8	9.4	137	0.73					
10	5.4	9.9	153	0.82					
20	6.0	10.4	169	0.90					
30	6.3	10.7	178	0.95					
50	6.7	11.0	189	1.01					
70	6.9	11.2	196	1.05					
100	7.2	11.4	203	1.09					
120	7.3	11.5	207	1.11					
		120°N				η_{max}		Goda (1985) $\eta < 0.15H_0$	η
TdR	H_0	Tp	L_0						
anni	Hs	sec	m						
1	2.2	6.3	62	0.33	0.151878	0.30	0.13669		
2	2.6	6.8	73	0.39					
5	3.1	7.5	87	0.47					
10	3.4	7.9	98	0.52					
20	3.8	8.3	108	0.58					
30	4.0	8.5	114	0.61					
50	4.3	8.8	121	0.65					
70	4.5	9.0	126	0.68					
100	4.6	9.2	131	0.70					
120	4.7	9.3	134	0.72					

La forma utilizzata è:

$$\eta_{\max} = 0.220H_{0,s}^{0.629} L_0^{0.371} (\tan\beta)^{0.538}$$

η_{\max}	wave setup massimo
H_{0s}	altezza d'onda significativa al largo
L_0	lunghezza dell'onda al largo
$\tan\beta$	pendenza media del fondale

Sono state eseguite le verifiche suggerite da Goda (1985) ed è stato calcolato il valore del sovrizzo medio η come indicato da US FEMA (2004). In tabella si riporta il prospetto riepilogativo dei valori ottenuti di S_{wave} al variare del tempo di ritorno (Cfr. Tabella 8-4).

8.5 Cambiamento climatico e livelli del mare

È ormai concordemente accettato che il cambiamento climatico in atto ha tra i suoi effetti salienti la modifica dei livelli del mare. La tendenza corrente all'innalzamento del livello del mare non si manifesta con incrementi identici per ciascun punto del globo e questo rappresenta una limitazione alla previsione degli scenari futuri.

Nell'ambito dell'ingegneria costiera l'incremento dei livelli idrici marini causa:

- una maggior frequenza dei fenomeni di overtopping, di allagamenti dei piazzali e delle banchine, con conseguenziale arresto delle operazioni di carico e scarico merci e passeggeri;
- una maggiore esposizione ad agenti corrosivi delle strutture (pontili, dei pali e di banchine)
- l'incremento delle forzanti indotte dal moto ondoso;
- l'aumento dei fenomeni di erosione della linea di riva.

Per la progettazione di opere con lunga vita utile è indispensabile quindi analizzare gli effetti di tale aumento.

8.5.1 Previsioni sul livello medio marino

Il Gruppo intergovernativo di esperti sui cambiamenti climatici (IPCC) è l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione delle scienze legate ai cambiamenti climatici. L'IPCC è stato creato per fornire ai responsabili delle politiche nazionali valutazioni periodiche scientifiche sul cambiamento climatico, le sue implicazioni e i potenziali rischi futuri, nonché proporre opzioni di adattamento e di mitigazione. Attraverso le sue valutazioni, l'IPCC determina lo stato delle conoscenze sui cambiamenti climatici. Identifica dove c'è accordo nella comunità scientifica su argomenti relativi ai cambiamenti climatici e dove sono necessarie ulteriori ricerche. Le relazioni sono redatte e riviste in più fasi, garantendo così obiettività e trasparenza. L'IPCC non conduce la propria ricerca. I rapporti dell'IPCC sono neutrali, rilevanti per la politica ma non prescrittivi. Le relazioni di valutazione sono un input chiave nei negoziati internazionali per affrontare i cambiamenti climatici.

L'ultima relazione di valutazione (Assesment Report AR5) è la quinta, del 2014, mentre è in preparazione la sesta prevista per il 2022.

Le emissioni di gas serra antropogeniche sono principalmente dipendenti dalla dimensione della popolazione, dall'attività economica, dallo stile di vita, dall'uso di

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



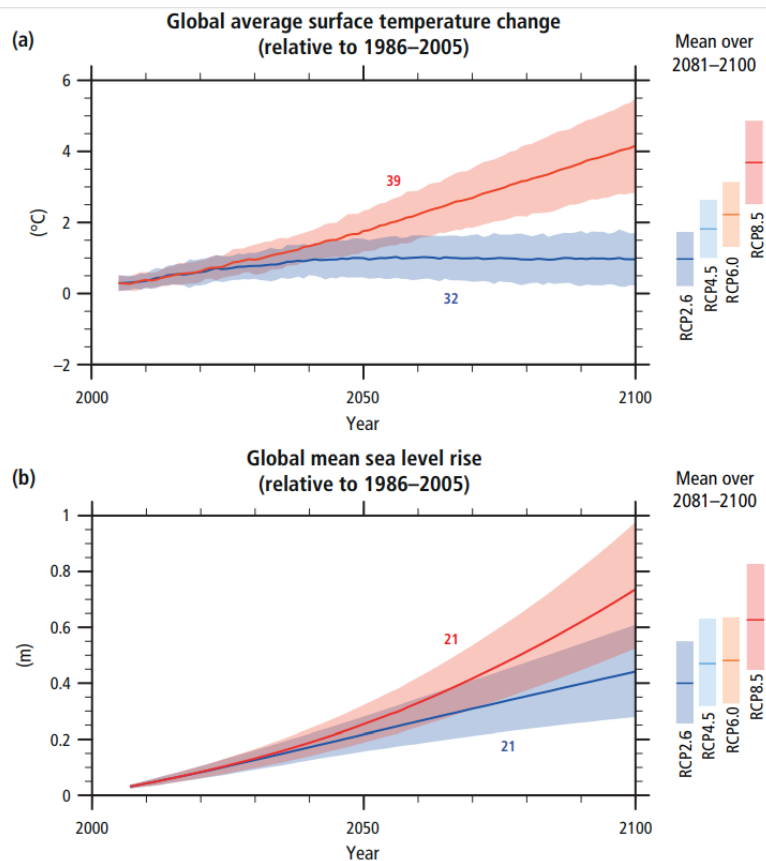


Figura 8-6: Proiezioni delle variazioni di temperatura e livelli idrici (Fonte: IPCC AR5, 2014)

energia, dai modelli di uso del suolo, dalla tecnologia e dalla politica climatica. I Representative Concentration Pathways (RCPs), che sono usati per fare proiezioni sulla base di questi fattori, descrivono quattro diversi percorsi per il 21° secolo per le emissioni di gas serra e le concentrazioni atmosferiche, emissioni di inquinanti atmosferici e uso del suolo. I RCP includono uno scenario di attenuazione rigoroso, con riscaldamento globale contenuto entro i 2°C (RCP2.6), due scenari intermedi (RCP4.5 e RCP6.0) e uno scenario con emissioni di GHG non calmierate, con un riscaldamento globale di 5°C (RCP8.5).

I grafici seguenti e la tabella fotografano lo stato delle cose riconosciuto dall'IPCC a livello globale.

Tabella 8-5: Proiezioni delle variazioni di temperatura e livelli idrici (Fonte: IPCC AR5, 2014)

	Scenario	2046-2065		2081-2100	
		Mean	Likely range ^c	Mean	Likely range ^c
Global Mean Surface Temperature Change (°C) ^a	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8
Global Mean Sea Level Rise (m) ^b	Scenario	Mean	Likely range ^d	Mean	Likely range ^d
	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82

Tabella 8-7: Variazione del livello del mare alla fine del 21° secolo: confronto tra studi diversi (Fonte: Kopp et al., 2016)

Scenario	IPCC 2013	Kopp 2016	Mengel 2016	Horton 2014
RCP 2.6	28-60	24-61	28-56	25-70
RCP 4.5	35-70	33-85	37-77	n.a.
RCP 8.5	53-97	52-131	57-131	50-150

Tabella 8-6: Proiezione in centimetri della risalita del livello del mare attesa su alcune coste italiane Fonte: Antonioli et al., 2016)

Proiezioni di sollevamento del mare			
Area	IPCC 2013 8.5 min scenario (cm)	IPCC 2013 8.5 max scenario (cm)	Rahmstorf 2007 max scenario (cm)
Nord Adriatico - area 2	58,4	101,1	142,8
Golfo di Oristano	54,5	94,9	134,5
Golfo di Taranto	51,6	92,1	131,7
Golfo di Cagliari	54,7	95,6	135,6

Le proiezioni dell'IPCC vengono riportate in molti studi specialistici, spesso raffrontandole alle risultanze di altri studi.

L'European Environment Agency (EEA) pubblica valutazioni scientifiche focalizzate sulla situazione europea. Gli studi prevedono che il cambiamento relativo del livello del mare lungo la maggior parte delle coste europee sia ragionevolmente simile alla media globale. Le principali eccezioni sono il Mar Baltico settentrionale e la costa atlantica settentrionale, che stanno vedendo un considerevole innalzamento della terra a seguito del rimbalzo post-glaciale e dei cambiamenti nel campo gravitazionale della calotta glaciale della Groenlandia. Di conseguenza, il livello del mare rispetto alla terra sta aumentando più lentamente che altrove in queste regioni o potrebbe addirittura diminuire (Cfr.Figura 8-7). La figura mostra il cambiamento previsto nel livello del mare relativo nel 2081-2100 rispetto al 1986-2005 per lo scenario RCP4,5 a emissioni medio-basse basato su un insieme di modelli climatici CMIP5. Le proiezioni considerano il movimento del terreno a causa dell'aggiustamento isostatico dei ghiacci, ma non della subsidenza del suolo a causa delle attività umane. Non sono disponibili valutazioni per il Mar Nero.

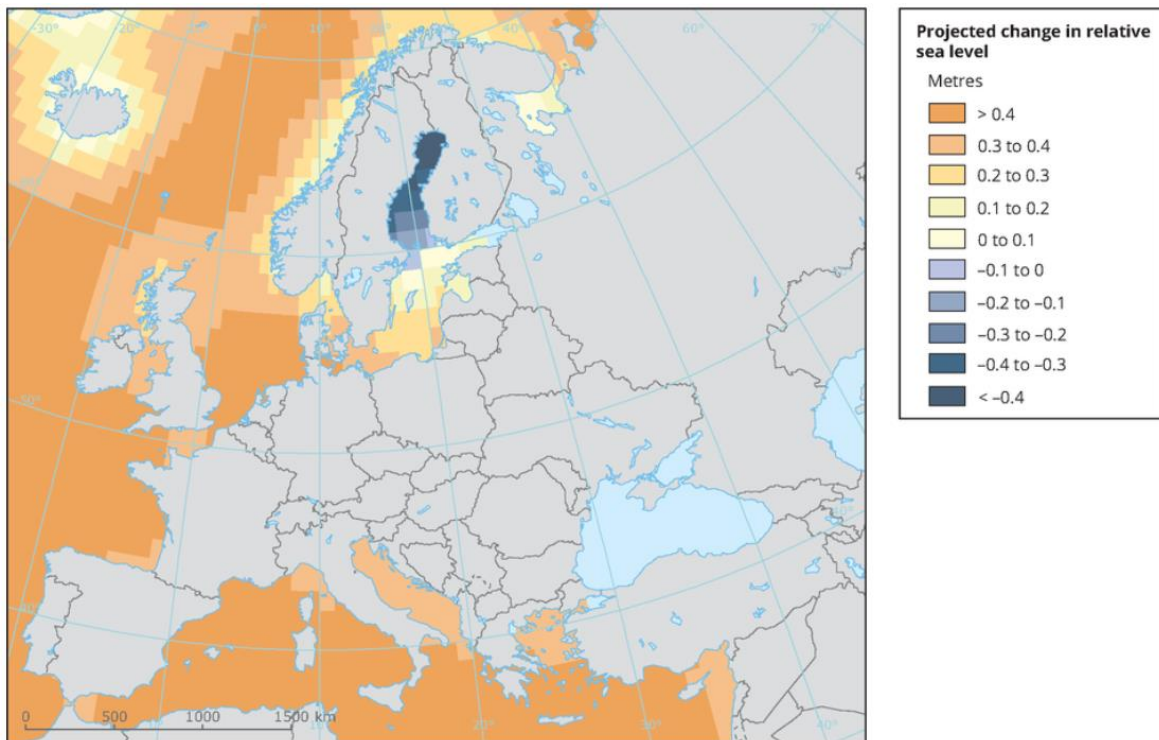


Figura 8-7: Previsioni dei livelli idrici per l'Europa per il 21° secolo (Fonte: European Environmental Agency)

Occorre tuttavia evidenziare che fare proiezioni regionali per bacini isolati e semichiusi relativamente piccoli, come il Mar Mediterraneo o il Mar Baltico, è ancora più difficile che per l'oceano aperto. Purtroppo alcuni autori si sono cimentati in valutazioni regionalizzate anche a livello italiano di cui la Tabella 8-6 né da una esemplificazione.

8.6 Considerazioni finali sui livelli idrici da considerare

Ai fini dell'applicazione ingegneristica a cui ci si riferisce, il livello idrico di riferimento deve essere scelto con giudizio esperto e con criteri adeguatamente cautelativi.

Per una vita utile del progetto lunga, dell'ordine del secolo, le tre componenti fondamentali dei livelli idrici finali sono la marea, lo *storm surge* e l'innalzamento dovuto ai cambiamenti climatici.

Nel caso di progetti per cui il sovrizzo idrico massimo è un dato importante per l'analisi di stabilità idraulica (dimensionamento di dighe foranee, p.es.), molti autori consigliano, cautelativamente, la composizione lineare dei fattori.

Le scelte compiute per il presente studio sono le seguenti:

- per la marea astronomica si utilizza la massima delle medie annuali fin'ora registrate;
- per lo *storm surge* (sopralzi dovuti a pressione, vento e onde) si utilizzerà quello stimato con i metodi suddetti;
- per l'innalzamento dovuto al cambiamento climatico si considera una quota della stima per la fine del 21° secolo, per lo scenario medio, (media RCP4.5, IPCC AR5 2013): seppur grandezza affetta solamente dal trascorrere del tempo, e scollegata dalle considerazioni statistiche relative agli stati del mare, si è scelto di considerare per ogni tempo di ritorno una quota proporzionale crescente.

Di seguito sono riassunti i valori stimati dei massimi livelli idrici e che vengono considerati per le calcolazioni successive.

Tabella 8-8: Innalzamento totale in funzione del periodo di ritorno

SOVRALZO IDRICO TOTALE - TOTAL SURGE						
TdR anni	330°N m	360°/0°N m	30°N m	60°N m	90°N m	120°N m
1	0.88	0.75	0.75	0.66	0.75	0.58
2	0.96	0.83	0.84	0.72	0.84	0.64
5	1.07	0.93	0.95	0.81	0.96	0.72
10	1.16	1.02	1.04	0.89	1.05	0.79
20	1.26	1.12	1.15	0.98	1.16	0.87
30	1.34	1.20	1.22	1.05	1.24	0.93
50	1.45	1.31	1.34	1.15	1.36	1.03
70	1.55	1.41	1.44	1.25	1.46	1.12
100	1.68	1.54	1.57	1.37	1.59	1.25
120	1.77	1.62	1.66	1.45	1.68	1.33



9 Trasformazione del clima d'onda verso riva

9.1 La rifrazione e lo shoaling

Con l'avvicinarsi verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta principalmente:

- alla orografia e al tipo di fondale;
- all'azione della marea;
- alla presenza di vento,
- all'azione delle correnti,
- all'interazione con le infrastrutture presenti.

Un'interpretazione semplice ed efficace dei fenomeni del primo tipo è fornita dalla teoria delle onde di piccola altezza, secondo la quale un'onda di oscillazione di periodo costante che avanza dal largo verso la riva, inizia a risentire del fondale sottostante ad una profondità h che si ritiene pari a 0,5 volte la lunghezza d'onda L ; l' "avvertimento" da parte dell'onda della presenza del fondale ha degli effetti diretti sulla celerità con la quale l'onda si propaga (relazione di Airy); in pratica, un medesimo fronte di un'onda monocromatica sarà caratterizzato da punti con celerità diversa in relazione ai fondali ad esso sottostanti; conseguenza ne è che il fronte dell'onda avanzerà con celerità diverse nei suoi punti subendo una rotazione progressiva man mano che si approssima alla riva, tendendo a disporsi parallelamente alla batimetria del fondale (*rifrazione*).

Altra importante conseguenza dell'arrivo dell'onda nella zona di transizione è di carattere energetico: ammettendo che l'energia non si trasmetta in direzione trasversale al fronte dell'onda, può dimostrarsi con semplici passaggi matematici, che la morfologia del paraggio ha effetti diretti sulla concentrazione o sulla dispersione dell'energia, con conseguente aumento o diminuzione dell'altezza dell'onda (*shoaling*).

Un approccio più completo per lo studio della trasformazione dell'onda nel suo moto verso riva, deve necessariamente tenere conto nel contempo del fenomeno del frangimento e della conseguente dissipazione energetica ad esso associata. Il frangimento si verifica allorché vengono raggiunte precise condizioni fisiche (generalmente espresse in termini di ripidità dell'onda) o a seguito dell'interazione dell'onda con strutture di protezione. L'individuazione delle zone in cui avviene il frangimento risulta determinante per comprendere l'effettiva operatività e sicurezza del bacino in concomitanza di eventi particolarmente gravosi.

9.2 Modello matematico utilizzato

9.2.1 Generalità sul modello

Lo studio dei fenomeni legati alla trasformazione del clima d'onda verso riva è stato affrontato per mezzo del modello matematico STWAVE, modello stazionario spettrale alle differenze finite proposto da *J. McKee Smith, D. T. Resio e A. K. Zundel*. Lo scopo del modello è predire quantitativamente il cambiamento dei parametri dell'onda (altezza d'onda, periodo, direzione, e forma spettrale) tra il largo e la zona sottocosta.

STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla variazione della profondità del fondale, il frangimento a cui è sottoposta l'onda in particolari condizioni fisiche e il fenomeno della diffrazione (trasferimento di energia in direzione trasversale rispetto alla cresta dell'onda); il modello è in grado di considerare la presenza di correnti e l'apporto

energetico costituito dalla presenza del vento. L'input delle caratteristiche del moto ondoso incidente è costituito da uno spettro energetico di tipo bidimensionale. Lo spettro è una rappresentazione statistica del campo d'onda; concettualmente può essere pensato come una sovrapposizione di più onde monocromatiche di diverso periodo e direzione; lo spettro rappresenta la distribuzione dell'energia associata al moto ondoso come funzione della frequenza (spettro monodimensionale) o come funzione della frequenza e della direzione (spettro bidimensionale); in quest'ultimo caso esso può essere descritto da una funzione da R^2 in R , ovvero da una superficie $z=f(x,y)$, in cui x e y rappresentano rispettivamente le frequenze e le direzioni, mentre z rappresenta la densità di energia.

Le ipotesi del modello sono:

- fondo con dolce pendenza e riflessione dell'onda trascurabile;
- condizione dell'onda incidente costante su tutto il confine al largo del dominio di calcolo;
- stato stazionario delle onde, delle correnti e dei venti;
- rifrazione e shoaling lineari;
- corrente costante per tutta l'altezza della colonna d'acqua;
- attrito al fondo e fenomeni riflessivi trascurabili.

A ben guardare, l'ultima ipotesi comporta la necessità di ricorrere ad un ulteriore modello di calcolo per lo studio di dettaglio dell'agitazione interna del bacino portuale.

9.2.2 Equazioni di governo

Dal momento che il modello consente di considerare la presenza di corrente, le equazioni di governo sono scritte rispetto un sistema di riferimento solidale con la corrente stessa. I parametri dell'onda sono contrassegnati con il pedice r , quelli valutati rispetto al sistema di riferimento assoluto sono contrassegnati con il pedice a . La relazione della dispersione dell'onda rispetto al sistema di riferimento relativo è (Jonsson et al., 1990):

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd$$

dove:

- ω = frequenza angolare;
- g = accelerazione di gravità;
- k = numero d'onda;
- d = profondità.

Nel sistema di riferimento assoluto, l'equazione della dispersione diventa:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha)$$

dove:

- U = velocità della corrente
- d = direzione della corrente rispetto all'asse delle x del sistema di riferimento assoluto
- α = angolo che la normale alla cresta dell'onda forma con l'asse delle x del sistema di riferimento assoluto (cfr. Figura 9-1).

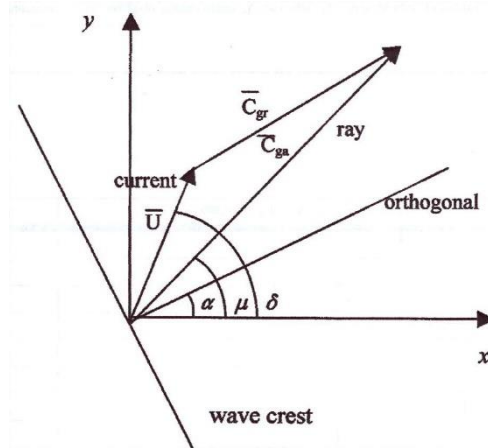


Figura 9-1 – Definizione del sistema di riferimento

Le soluzioni per la rifrazione e lo shoaling richiedono sia la celerità dell'onda C che la celerità di gruppo C_g in entrambi i sistemi di riferimento; nel sistema di riferimento relativo si ha:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}$$

$$C_{gr} = 0.5C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

La direzione di entrambe le celerità è α ; nel sistema di riferimento assoluto le componenti delle celerità lungo x e y valgono invece:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha)$$

e

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i$$

Anche la celerità assoluta forma con l'asse delle x un angolo pari ad μ . La celerità di gruppo assoluta definisce la direzione del raggio d'onda (direzione di propagazione dell'energia) (cfr. Figura 9-1); quest'ultima risulta dunque definita da:

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \sin \alpha \cos \alpha + U \cos \delta} \right)$$

L'ortogonale dell'onda indica la perpendicolare alla cresta dell'onda stessa, invece il raggio d'onda indica la direzione di propagazione dell'energia. La distinzione tra le due grandezze è necessaria solo nel caso in cui vi sia l'interazione tra onda e corrente; nel caso di assenza di quest'ultima, le due grandezze coincidono. La direzione dell'ortogonale dell'onda in condizioni stazionarie è data da (Mei 1989; Jonsson 1990):

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn}$$

dove D è il simbolo di derivata, R è una coordinata nella direzione del raggio d'onda ed n è una coordinata normale all'ortogonale d'onda.

In condizioni stazionarie, l'equazione della conservazione dell'azione dell'onda spettrale lungo la direzione del raggio d'onda è (Jonsson, 1990):

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

dove:

E = densità d'energia dello spettro d'onda che è funzione della frequenza angolare assoluta ω_a e direzione ϑ ;

S = termine che indica un'entrata o un'uscita di energia.

Il criterio adottato per l'individuazione delle fasce di frangimento è quello proposto da Smith, Resio e Vincent (1997), i quali, a seguito di prove di laboratorio sul frangimento delle onde irregolari, proposero la seguente relazione:

$$(H_{m0})_{\max} = 0.1L \tanh kd$$

ogni qual volta il criterio risulta verificato, l'energia associata ad ogni frequenza dello spettro viene ridotta.

9.3 Definizione del dominio di calcolo

Data la particolare posizione del sito, al fine di ottimizzare al massimo i tempi computazionali, sono stati individuati due domini di calcolo differenti in funzione della direzione di provenienza del clima ondoso a largo simulato.

Il dominio di calcolo denominato "1" è stato utilizzato per il trasferimento sottocosta degli eventi estremi dell'analisi direzionale al largo (Approccio A), ed ha le seguenti caratteristiche:

Dati Griglia 1

angolo di rotazione: 180,0°
dimensioni: $i=4300$ m $j=4000$ m
numero celle: 172.000
dimensione cella: 10 m
 z min: -2 m
 Z max: 217,0 m

Il dominio di calcolo denominato "2" è stato utilizzato per il trasferimento sottocosta del clima ondoso sopra soglia (Approccio B), ed ha le seguenti caratteristiche:

Dati Griglia 2

angolo di rotazione: 180,0°
dimensioni: $i=4300$ m $j=4000$ m
numero celle: 6.880
dimensione cella: 50 m
 z min: -2 m
 Z max: 217 m

Come richiesto dal modello, per entrambi i domini l'asse j è stato orientato in maniera tale da risultare parallelo alla linea di costa; l'asse i , ortogonale al primo, è stato orientato positivamente nella direzione che dal largo punta la costa

La **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata. mostra l'andamento della profondità dei fondali della zona in esame; la distribuzione è stata ottenuta attraverso un opportuno algoritmo di interpolazione applicato alle informazioni batimetriche ottenute dal committente.

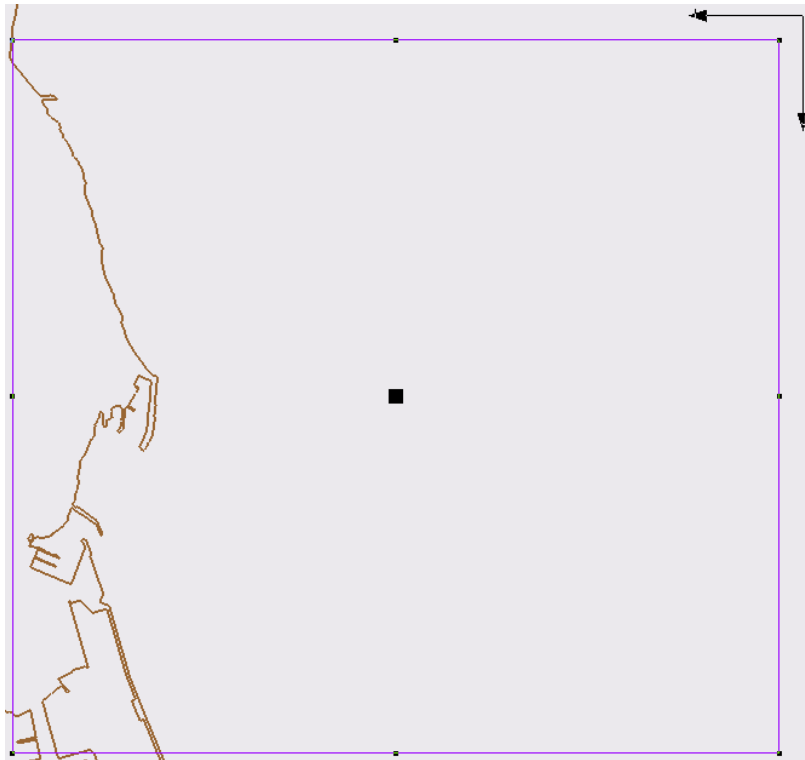


Figura 9-3: Dominio di calcolo

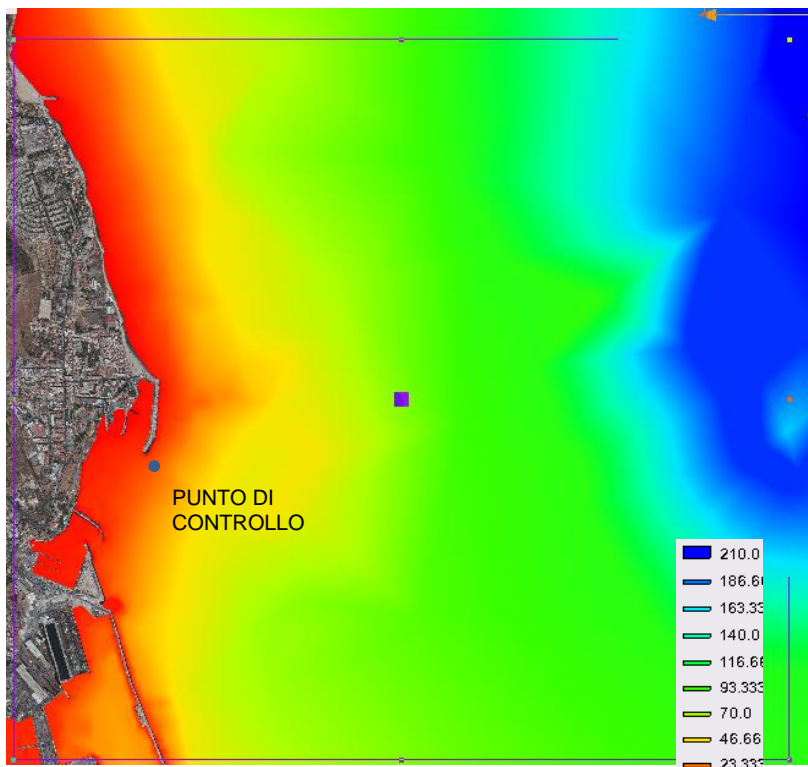


Figura 9-2: Batimetrie dei fondali del paraggio in studio con ubicazione del punto di controllo

9.4 Simulazione numeriche eseguite

Il modello di calcolo è stato utilizzato per analizzare la trasformazione subita dalle onde nel loro procedere dal largo verso riva e per individuare le fasce di frangimento.

Per l'Approccio A sono state oggetto di elaborazione le onde estreme direzionali: in particolare sono state considerate per le direzioni 330°N, 0°N, 30° N, 60°N, 90°N e 120°N le onde relative al tempo di ritorno di 100 anni.

Per l'Approccio B è stato trasferito l'intero clima marittimo sopra soglia.

Per ciascuna simulazione, a partire dai dati sull'altezza significativa, il periodo e la direzione, è stato costruito uno spettro energetico bidimensionale, utilizzato come condizione al contorno su ciascun elemento della colonna più al largo. Lo spettro è stato specificato usando una funzione di forma (Bouws et al. 1985), caratterizzata oltre che dalle grandezze suddette, dai parametri γ e nn , che controllano rispettivamente il grado di apertura dello spettro nella direzione dell'asse delle frequenze e dell'asse delle direzioni; i valori di γ e nn sono stati messi in relazione al valore del periodo secondo quanto indicato in letteratura.

9.5 Propagazione delle onde estreme direzionali

I risultati delle simulazioni effettuate sono sintetizzati nel gruppo di figure contenute nell'elaborato B.01.01 "Relazione idraulica marittima: allegati", dove per ciascuna onda incidente considerata sono riportati:

- la distribuzione delle direzioni e dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo;
- la determinazione della fascia di frangenza.

Rimandando alla visione dei grafici suddetti per un esame completo della casistica esaminata, appare opportuno formulare le seguenti considerazioni:

- l'onda che si propaga sottocosta si trasforma proponendosi in direzione d'attacco più vicina possibile all'ortogonale alla riva;
- per fissato TdR le onde provenienti dal primo quadrante creano le maggiori ondatazioni sottocosta.

Si riporta inoltre la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** con le letture delle caratteristiche d'onda trasformata nel punto di controllo selezionato sottocosta visualizzato in Figura 9-2.

9.6 Propagazione del clima marittimo sopra soglia ed analisi degli estremi omnidirezionali

Tutte le mareggiate sopra soglia ($H_s > 3m$) sono state trasferite con STWAVE al punto di controllo. Il clima sottocosta è quindi stato analizzato con le tecniche usuali per le analisi degli eventi estremi. Ci si è avvalsi del noto tool apposito di ACES per le elaborazioni che utilizza l'approccio consolidato di Goda (1988) e quindi il controllo di *best fit* di cinque distribuzioni di probabilità (Fisher-Tippet di Tipo 1 e Weibull con esponenti da 0.75 a 2.00. Gli output si riportano nella tabella seguente.

È stato notato che la distribuzione di Weibull con $k=0.75$ presenta l'anomalia del più alto coefficiente di correlazione insieme al più alto valore per la somma dei quadrati residui, pertanto la distribuzione viene tralasciata perché poco significativa.

Stante le incertezze intrinseche del metodo, considerando che i valori di correlazione delle restanti distribuzioni sono molto vicini, come anche suggerito nelle Technical Reference di ACES, i risultati possono essere mediati.

Tabella 9-1: risultati STWAVE per onde estreme direzionali (TdR=100 anni) letti nel punto sottocosta

TdR (anni)	A LARGO			SOVRALZO	SOTTOCOSTA		
	ϑ (°N)	Hs (m)	Tp (s)	tS (m)	$\vartheta_{\text{sott.}}$ (°N)	Hs (m)	Tp (s)
1	330	4.3	8.9	0.88	45	0.6	7.7
	0	3.4	7.8	0.75	45	1.4	6.7
	30	3.4	7.9	0.75	55	2.2	6.9
	60	2.7	7.1	0.66	69	2.3	6.3
	90	3.4	7.9	0.75	70	3.1	7.1
	120	2.2	6.3	0.58	119	2.1	5.8
5	330	5.6	10.1	1.07	50	0.8	8.8
	0	4.7	9.2	0.93	51	1.8	8.0
	30	4.8	9.3	0.95	60	3.0	8.1
	60	3.8	8.3	0.81	73	3.1	7.3
	90	4.8	9.4	0.96	70	4.3	8.4
	120	3.1	7.5	0.72	119	2.9	6.8
50	330	7.3	11.6	1.45	55	0.5	10.3
	0	6.3	10.7	1.31	57	2.4	9.4
	30	6.5	10.9	1.34	65	4.0	9.6
	60	5.2	9.7	1.15	76	4.2	8.6
	90	6.7	11.0	1.36	98	6.1	9.9
	120	4.3	8.8	1.03	118	3.9	7.9
100	330	7.8	11.9	1.77	56	0.6	10.6
	0	6.8	11.1	1.62	56	2.3	9.9
	30	7.0	11.3	1.66	63	4.4	10.1
	60	5.5	10.0	1.45	77	4.4	8.8
	90	7.2	11.4	1.68	97	6.6	10.4
	120	4.6	9.2	1.33	118	4.2	8.3

Tabella 9-2: Analisi omnidirezionale delle onde estreme (clima sopra soglia, STWAVE)

Case: ESTREMI DEL CLIMA MARITTIMO SOTTOCOSTA

Extremal Significant Wave Height Analysis

N: 36 NU: 1
 NT: 36 K: 12
 Lambda: 3.00 Mean: 1.78
 Standard deviation: 1.36

	Weibull Distribution				
	FT-I	k=0.75	k=1.00	k=1.40	k=2.0
Correlation:	0.96	0.97	0.98	0.97	0.94
Sum square of residuals:	0.16	0.63	0.10	0.14	0.19
Return Period (Yr)	Hs(m)	Hs(m)	Hs(m)	Hs(m)	Hs(m)
2	2.97	2.64	2.88	3.02	3.06
5	4.00	4.04	4.16	4.10	3.93
10	4.75	5.21	5.12	4.84	4.49
25	5.73	6.89	6.40	5.75	5.16
50	6.46	8.24	7.36	6.41	5.61
73	6.86	9.00	7.89	6.76	5.85
100	7.19	9.65	8.33	7.04	6.04

WARNING: RETURN PERIODS > 36 Yrs May Not Be Meaningful.

90% Confidence Interval (Lower Bound - Upper Bound) Units: m

Return Period (Yr)	Weibull Distribution				
	FT-I	k=0.75	k=1.00	k=1.40	k=2.0
5	3.1 - 4.9	2.1 - 6.0	2.8 - 5.5	3.1 - 5.1	3.2 - 4.7
10	3.6 - 5.9	2.6 - 7.8	3.4 - 6.9	3.6 - 6.0	3.6 - 5.4
25	4.3 - 7.1	3.3 - 10.5	4.2 - 8.6	4.3 - 7.2	4.2 - 6.2
50	4.8 - 8.1	3.9 - 12.6	4.8 - 10.0	4.8 - 8.0	4.5 - 6.7
73	5.1 - 8.6	4.2 - 13.8	5.1 - 10.7	5.1 - 8.5	4.7 - 7.0
100	5.4 - 9.0	4.5 - 14.8	5.3 - 11.3	5.3 - 8.8	4.9 - 7.2

Percent chance for significant wave height equalling or exceeding return period

Return Period (Yr)	Period of concern (Yr)						
	2	5	10	25	50	73	100
2	75	97	100	100	100	100	100
5	36	67	89	100	100	100	100
10	19	41	65	93	99	100	100
25	8	18	34	64	87	95	98
50	4	10	18	40	64	77	87
73	3	7	13	29	50	63	75
100	2	5	10	22	39	52	63



9.7 Frangimento

Con l'ausilio del modello matematico STWAVE è stato possibile individuare le fasce di frangimento del moto ondoso. La determinazione della zona di frangenza è fondamentale per valutare l'operatività dello specchio acqueo protetto.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE

