COMMITTENTE:

RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

DIREZIONE PRODUZIONE
DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE – GENOVA

RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI IMPRESE:

MI.COS s.p.a. - IVECOS s.p.a.
SVECO s.r.l.

PROGETTAZIONE:

STUDIOELB Ingegneri Associati
Dott. Ing. Ernesto LA BARBERA - Dott. Ing. Riccardo GIAMMARINI
Dott. Ing. Andrea DEPRATI - Dott. Ing. Simona CARREGA
Dott. Ing. Michela LA BARBERA - Dott. Ing. Mauro SCAGLIONE
Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova
Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: inge@studioelb.it - PEC: studio@pec.studioelb.it

SOGGETTO TECNICO: **DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE - GENOVA**
S.O. INGEGNERIA E TECNOLOGIE

PROGETTO DEFINITIVO

Interventi strutturali di riqualificazione e potenziamento dell'arenile a completamento delle opere di difesa della linea ferroviaria Genova Sampierdarena - Confine Francese in loc. Giunchetto - Comune di Bordighera

STUDIO MORFODINAMICO

SCALA: -

Tav. R05

PROGETTO/ANNO	SOTTOPR./INT.	LIVELLO	NOME DOC.	PROGR.OP.	FASE FUNZ.	NUMERAZ.
051005	015	PD	TSRT	04	--	

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
00	EMISSIONE	Studioelb Ing. Associati	05.10.2011								
Verifica e validazione R.F.I.											

POSIZIONE ARCHIVIO

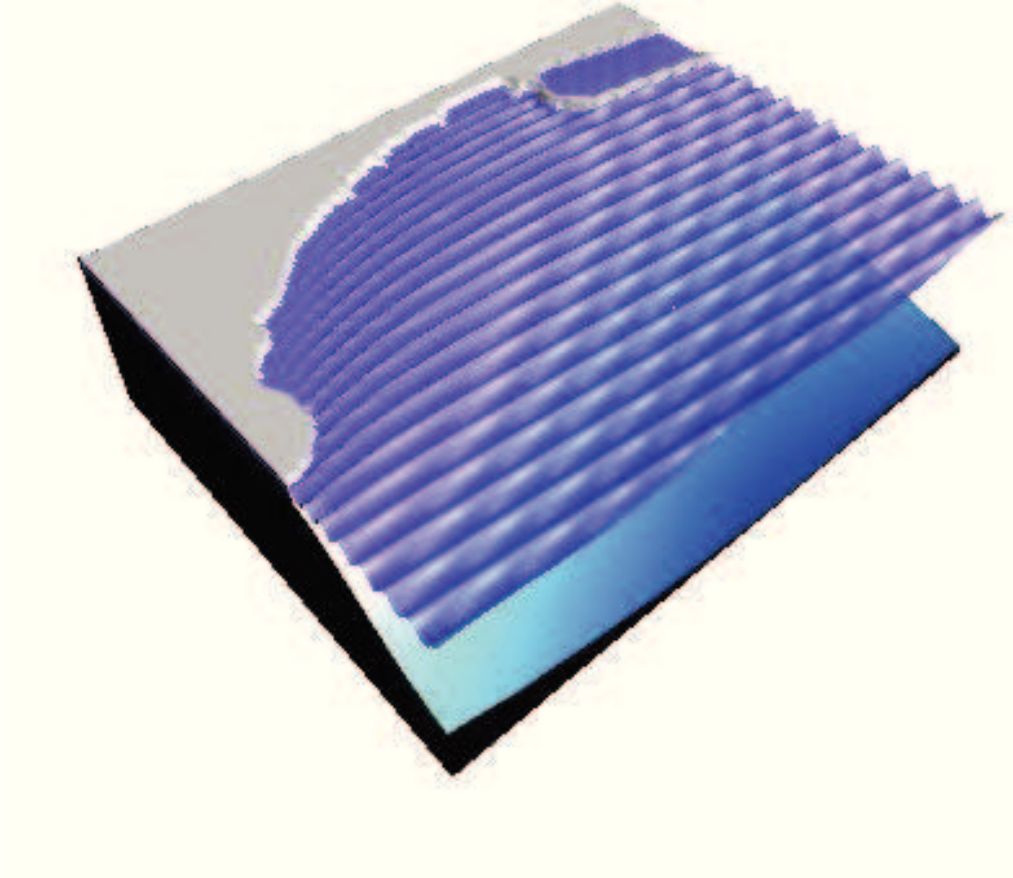
LINEA	SEDE TECN.	NOME DOC.	NUMERAZ.
L440	TR3702	TSRT	

Verificato e trasmesso	Data	Convalidato	Data	Archiviato	Data

FILE 610 PD R05

–

Opere di difesa della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia al km 138+100 in loc. Giunchetto (Bordighera)



SEZIONE 2
STUDIO MORFODINAMICO

0	Ottobre 2011	Emissione	Dr.Ing. Emanuele TERRILE	Dr. Brunella GUIDA
REV	DATA	DESCRIZIONE	AUTORI	APPROVATO

INDICE

1 SCOPO 3

2 AREA DI STUDIO 4

2.1 Configurazione Attuale 4
2.2 Configurazione di Progetto 4

3 DATI DI BASE 6

3.1 Dati meteo-marini 6
3.2 Dati batimetrici 6
3.3 Sedimenti 6

4 CRITERI METODOLOGICI 7

4.1 Generalità 7
4.2 Applicazione all'area di studio 8

5 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI 10

5.1 Schematizzazione dell'area 10
5.2 Simulazioni e clima ondoso 11
5.2.1 Evoluzione dei fondali nel breve termine 11
5.2.2 Evoluzione dei fondali nel lungo termine 11

6 REGIME SEDIMENTARIO LITORANEO 13

6.1 Trasporto dei sedimenti 13
6.2 Evoluzione nel breve termine 14
6.3 Evoluzione nel lungo termine 14

7 IL CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO 16

8 IL CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO 17

9 L'EVOLUZIONE DEI FONDALI 19

9.1 Evoluzione dei fondali costieri 19
9.2 Evoluzione del profilo trasversale 20

10 ANALISI E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI 21

11 CONCLUSIONI 23

12 RIFERIMENTI 25

INDICE DELLE TABELLE 26

INDICE DELLE FIGURE 36

APPENDICE A: MODELLO MORFODINAMICO 74

APPENDICE B: MODELLO NUMERICO "TRALIT" 93

APPENDICE C: MODELLO NUMERICO "SBEACH" 100

1 SCOPO

La spiaggia in loc. Giunchetto, al limite orientale del litorale di Bordighera, ha un'estensione di circa 700 m ed è caratterizzata da una sottile orlatura ghiaiosa/sabbiosa, con fondali in sabbia fine.
In fregio alla spiaggia corre la linea ferroviaria Genova-Ventimiglia.

Le opere a progetto prevedono, mediante la realizzazione di un nuovo pennello in massi naturali, il potenziamento dei pennelli esistenti e il ripascimento strutturale della spiaggia emersa e sommersa, la complessiva riqualificazione dell'arenile, interessando un'area più ampia di quella occupata dalle opere di difesa della linea ferroviaria, e precisamente il tratto compreso tra il pennello del porto di Ospedaletti a levante e la falesia rocciosa a ponente, per un'estensione complessiva di circa 700 m.

L'obiettivo del presente studio è, quindi, quello di verificare, mediante l'applicazione di modelli numerici, la compatibilità e l'efficacia delle opere a progetto.

I dati meteo-marini utilizzati nel presente studio sono quelli descritti e analizzati criticamente nell'ambito della relazione "*Opere di difesa della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia al km 138+100 in loc. Giunchetto (Bordighera) – Sezione 1, Studio Meteo-Marino*" [**rif. 1**] a cui si rimanda per maggiori dettagli e si fa riferimento nel seguito come rapporto MM.

Lo studio è stato effettuato utilizzando modelli matematici tridimensionali che hanno permesso un'analisi di estremo dettaglio della fenomenologia locale, sia per quanto riguarda il moto ondoso incidente e le sue variazioni spaziali lungo il litorale in esame, sia per quando concerne la dinamica dei sedimenti, in grado di valutare e quantificare la morfologia costiera conseguente alla configurazione prevista in progetto.
In tal modo, attraverso il confronto con la situazione attuale dei fondali e della linea di costa, è possibile quantificare le variazioni dei fondali costieri, positive e negative, indotte dalla realizzazione del progetto in esame.

La descrizione dei modelli utilizzati è fornita nelle **Appendici**.

2 AREA DI STUDIO

L'area di studio è situata lungo il tratto di litorale tra Bordighera e Ospedaletti, loc. Giunchetto al km 138+100 della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, ubicata quasi al centro di un'insenatura formata da Capo S. Ampelio a ponente e Capo Nero a levante (**Fig. 2.1**).

L'andamento dei fondali, come già evidenziato nello studio MM, presenta le caratteristiche tipiche delle insenature, con isobate che, a costa, seguono l'andamento della linea di riva, mentre man mano che la profondità aumenta tendono ad allinearsi con le isobate presenti all'esterno del golfo.
In prossimità di Capo S.Ampelio e Capo Nero il fondale presenta una ripidità più accentuata mentre nella zona centrale si hanno ripidità minori. Il fondale si presenta quindi caratterizzato da un andamento piuttosto regolare, con dolci pendenze che variano da 0.03 (dalla battigia a circa 10 m di profondità) a 0.06 (fino a 30 m di profondità).

Come riportato nello studio MM, il settore di traversia principale del paraggio in esame presenta un angolo di apertura di circa 150° (da 85° N a 235° N), in particolare il settore 160-240°N ha ampiezze tali da permettere la formazione di mare completamente sviluppato, ed è interessato dalla presenza di forti mareggiate.

In **Fig. 2.2** sono evidenziate le zone **A** e **B** oggetto di intervento.

2.1 Configurazione Attuale

La configurazione attuale è mostrata in **Fig. 2.3**. La pendenza del fondale è piuttosto regolare sino alla profondità di circa -1 m ed assume valori di circa 0.03. Avvicinandosi ulteriormente alla costa la linea ferroviaria è protetta da una massicciata larga 10-15 m. Inoltre i rilievi topografici effettuati hanno rilevato che questa fascia è caratterizzata dalla presenza di affioramenti rocciosi anche di grossa pezzatura.
Nella configurazione attuale la spiaggia emersa è quindi assente nella zona oggetto di intervento, mentre nella zone adiacenti è caratterizzata da ampiezze variabili tra i 13 m e i 18 m.

2.2 Configurazione di Progetto

Dall'osservazione della planimetria (**Fig. 2.4**), si nota che il progetto prevede la realizzazione di due tipologie di intervento:

- creazione di un nuova struttura trasversale (pennello) in prossimità del muro della ferrovia, al fine di intercettare il trasporto solido longitudinale e favorirne l'accumulo in prossimità del muro della ferrovia, con conseguente incremento della protezione dello stesso;
- ripascimento dell'arenile nelle aree contigue la zona di studio, con notevole ampliamento della spiaggia emersa, e rimodellazione dei pennelli esistenti al fine di limitare la movimentazione e, quindi, la perdita dei sedimenti costituenti la spiaggia.

La realizzazione delle strutture elencate, mediante l'apposito ripascimento, hanno lo scopo di preservare le spiagge esistenti nelle aree ad est e ad ovest della zona e, soprattutto, di contribuire alla stabilità della nuova spiaggia creata in prossimità del muro della ferrovia al fine di tutelarne l'integrità nel tempo.

La granulometria del sedimento utilizzato nelle simulazioni eseguite è caratterizzata da un diametro D_{50} pari a 8.0 mm.

3 DATI DI BASE

L'analisi del trasporto locale e dell'evoluzione dei fondali antistanti la spiaggia, finalizzata alla valutazione del progetto, richiede una buona conoscenza delle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche dei fondali nello stato attuale, dati meteo-marini affidabili, nonché informazioni dettagliate riguardo le caratteristiche del progetto (dimensioni delle strutture, materiali di ripascimento).

In questo capitolo vengono brevemente sintetizzati i dati di base utilizzati per il presente studio.

3.1 Dati meteo-marini

Come precedentemente accennato, i dati meteo-marini (vento, onde, livello) forniti in input ai modelli matematici sono quelli contenuti nel rapporto MM, cui si rimanda per maggiori dettagli

3.2 Dati batimetrici

I dati batimetrici di dettaglio sono stati forniti dal Committente e ottenuti mediante un rilievo locale effettuato con tecnica multi-beam.
La batimetria a scala regionale è stata desunta dai dati disponibili presso gli archivi DEAM [**rif. 2**].

3.3 Sedimenti

I dati sedimentologici forniti dal Committente sono stati ottenuti mediante appositi campionamenti effettuati nel periodo Giugno-Luglio 2011.
I punti di campionamento, rappresentati in **Fig. 2.3**, sono 5, di cui 1 rappresentativo della spiaggia emersa, i restanti 4 ubicati a circa -3 m di profondità. In **Tab. 3.1** sono riportati i valori dei diametri D_{20}, D_{50} e D_{80} relativi a ciascun campione analizzato. Infine dalla **Fig. 2.3** si osserva la presenza di affioramenti rocciosi, in prossimità della battigia.

4 CRITERI METODOLOGICI

La valutazione della fenomenologia locale e degli effetti indotti dalle opere a progetto, in termini di trasporto solido, è stata effettuata utilizzando modelli matematici di evoluzione costiera e dispersione, in grado di descrivere compiutamente i fenomeni idrodinamici e morfodinamici che si verificano nella zona litoranea oggetto di studio.

4.1 Generalità

Da un punto di vista generale, i modelli matematici di evoluzione dei fondali possono essere suddivisi, a seconda delle schematizzazioni adottate nella soluzione del problema, in quattro categorie principali: modelli a “macroprocesso”, modelli “ad una linea”, modelli “multilinea” e modelli “morfodinamici”.

a) Nella classe dei modelli a “macroprocesso”, sono da includere i modelli a soluzione analitica e le versioni più semplici dei modelli “one-line”. Tali modelli permettono di valutare a grandi linee la tendenza evolutiva di un litorale nel lungo termine, sotto ipotesi molto semplificate e per condizioni costanti di moto ondoso.

b) Di più vasta applicazione sono i modelli “ad una linea”, il cui scopo è quello di simulare gli aspetti essenziali dell’evoluzione della linea di costa, su tempi relativamente lunghi e su scale spaziali medio-grandi. Essi possono essere applicati all’analisi di tratti di costa aperta, ad andamento regolare. In questi modelli, gli effetti sull’evoluzione della linea di costa delle onde, del trasporto di sedimento e della presenza di strutture, sono studiati facendo approssimazioni appropriate e mediando opportunamente, sia nello spazio che nel tempo

c) I “modelli multilinea” rappresentano una diretta estensione dei modelli ad una linea, arricchiti dalla capacità di valutare l’evoluzione, oltre che della linea di costa, anche di altre linee di contorno del fondo. Come i modelli ad una linea, questi modelli sono applicabili solo a tratti di costa aperta ad andamento regolare e richiedono l’adozione di opportune approssimazioni nella schematizzazione degli effetti delle onde, del trasporto di sedimento e della presenza di strutture.
Ovviamente non basta studiare l’evoluzione del profilo longitudinale della spiaggia per caratterizzare lo stato o il trend evolutivo della costa ma servono anche modelli (sempre di tipo monodimensionale) capaci di simulare, con risultati accettabili, l’evoluzione del profilo trasversale .
La proprietà fondamentale di tali modelli è quella di riprodurre in modo deterministico le principali caratteristiche del profilo, a partire da relazioni empiriche per il trasporto sedimentario trasversale a costa indotto dalle onde, trascurando gli aspetti su piccola scala ed evitando descrizioni complesse del flusso del trasporto sedimentario. Tale trasporto risulta così dipendente solo dalle caratteristiche dell’onda locale, del livello del mare e delle proprietà del profilo iniziale.

d) Infine ci sono i modelli morfodinamici tridimensionali (3D). Questi modelli sono tra i più complessi e possono tener conto nel modo più completo dei fenomeni fisici che governano l'evoluzione del litorale, oltre che delle interazioni tra modifiche del fondale, moto ondoso e correnti.
Il loro obiettivo è la simulazione delle trasformazioni indotte dall'azione di onde e correnti, sulla costa e sui fondali.
I modelli morfodinamici possono essere anche applicati a coste dall'andamento irregolare e dal fondale variabile, in presenza di opere di difesa e altre strutture costiere, anche sommerse, non essendo basati su particolari ipotesi semplificative relativamente alla conformazione della costa ed al moto ondoso incidente. Sono modelli liberi, privi delle imposizioni e dei vincoli tipici dei modelli semplificati.

4.2 Applicazione all'area di studio

Tenuto conto delle notevoli dimensioni delle opere previste dal progetto, del tipo di progetto che verrà realizzato, e delle caratteristiche morfologiche e di esposizione del tratto di litorale in esame, si è ritenuto indispensabile adottare l'uso di un modello morfodinamico 3D.

Con modello morfodinamico si fa quindi riferimento ad un sistema integrato di modelli numerici, operanti sulla stessa griglia di calcolo e sulla stessa batimetria, capaci di simulare la propagazione delle onde a costa, di simulare la corrente costiera generata da marea, vento, onde e oscillazioni del livello marino, di calcolare il trasporto del sedimento, di fondo e in sospensione, determinato dal campo di corrente, di calcolare i flussi di sedimento e le variazioni positive e negative dei fondali.
Le caratteristiche dettagliate del modello sono presentate in **Appendice A**.

In input occorre fornire:

- la geometria del bacino;
- lo schema delle strutture costiere presenti (anche sommerse);
- la profondità in ogni maglia del reticolo con cui è stata schematizzata l'area di studio;
- la curva granulometrica dei sedimenti (in particolare il diametro medio D_{50} dei sedimenti e il D_{90});
- la densità del sedimento;
- la densità dell'acqua;
- l'eventuale presenza di "sorgenti" di sedimento, quali ad esempio gli apporti fluviali.

In output vengono prodotti, a richiesta dell'utente, vari parametri tra i quali i principali sono:

- il campo di moto ondoso;
- i valori di radiation stress;
- il campo di corrente;
- le velocità orbitali indotte dal moto ondoso;

- i valori del trasporto longitudinale e trasversale alla costa;
- le variazioni di volume dei fondali rispetto alle condizioni batimetriche iniziali.

Il modello tiene conto del "coupling" esistente tra termini forzanti ed evoluzione della batimetria, aggiornando, ad ogni variazione significativa del fondale, il campo di moto ondoso e quindi i forzanti della corrente litoranea. Di conseguenza questo continuo aggiornamento tra onda-corrente-batimetria comporta un notevole onere computazionale con tempi di calcolo molto lunghi.

L'applicazione della modellistica numerica al presente problema ha comportato lo sviluppo delle seguenti fasi principali:

- definizione delle caratteristiche morfologiche, sedimentologiche e batimetriche del sito;
- definizione delle caratteristiche meteo-oceanografiche del sito nella configurazione attuale (Rapporto MM);
- schematizzazione numerica dell'area di studio: mediante un sistema di griglie innestate a risoluzione spaziale crescente, specificando per ogni maglia la profondità del mare e le caratteristiche del fondo (diametro dei sedimenti);
- simulazione del moto ondoso nella configurazione di progetto;
- stima quantitativa del trasporto solido litoraneo locale potenziale, mediante l'applicazione del modello a macroprocesso TRALIT (**Appendice B**), finalizzata a definire le mareggiate significative in termini di trasporto sedimentario;
- selezione delle mareggiate da simulare;
- simulazione idrodinamica delle situazioni più significative. Il modello idrodinamico è di tipo "time dependent" e calcola l'evoluzione temporale del campo idrodinamico forzato dal moto ondoso e dal vento su tutte le maglie del dominio di calcolo, registrando ad intervalli di tempo prestabiliti la terna di valori di elevazione della superficie del mare, componenti est e nord della corrente in ciascuna delle maglie del dominio;
- simulazione della evoluzione del fondale basata sui campi idrodinamici calcolati al punto precedente. Anche il modello morfodinamico è del tipo "time dependent" e calcola l'evoluzione temporale del fondale sulla base del campo idrodinamico e di moto ondoso;
- analisi e interpretazione dei risultati relativi alle singole mareggiate;
- combinazione delle varie mareggiate per la stima a lungo termine, nell'ipotesi di sovrapposizione lineare degli effetti;
- interpretazione dei risultati ottenuti;
- simulazioni del comportamento della linea di riva (accrescimento/arretramento) della spiaggia, nella configurazione attuale e di progetto, soggetta al trasporto cross-shore indotto dalle mareggiate estreme con il modello SBEACH (**Appendice C**).

5 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

In questo capitolo si descrivono in maniera sintetica i dati di input (griglia e batimetria di calcolo, condizioni meteomarine, etc.) utilizzati nelle simulazioni effettuate.

5.1 Schematizzazione dell'area

La propagazione delle onde dal largo verso costa, lo studio dell'idrodinamica e della morfodinamica costiera richiede la definizione di un dominio di calcolo caratterizzato da:

- notevoli estensioni, in modo da garantire che i risultati non siano influenzati dalle condizioni al contorno;
- elevata risoluzione spaziale, che permetta di schematizzare in maniera accettabile le opere in progetto e simulare il più possibile nel dettaglio l'idrodinamica locale;

Per soddisfare tali requisiti, è stato definito un sistema integrato di due griglie, a risoluzione spaziale crescente, innestate tra loro, aventi le seguenti caratteristiche:

GRIGLIA GRANDE			
COORDINATE DELL'ORIGINE DEGLI ASSI		DIMENSIONE MAGLIA (m)	NUMERO DI MAGLIE
Coordinata X (m)	1393237	25	431
Coordinata Y (m)	4847042	25	201
Direzione asse Y (°N)	340		
GRIGLIA DI DETTAGLIO			
COORDINATE DELL'ORIGINE DEGLI ASSI		DIMENSIONE MAGLIA (m)	NUMERO DI MAGLIE
Coordinata X (m)	1395064	10	101
Coordinata Y (m)	4849186	10	131
Direzione asse Y (°N)	340		

In **Fig. 5.1** le griglie sono mostrate graficamente. La griglia più grande (linea blu, caratterizzata da maglie quadrate con lato 25 m) include l'intera area che si estende da Capo Sant'Ampelio a Capo Nero, fondamentale per una corretta modellazione del moto ondoso e dell'idrodinamica locale, mentre la griglia di dettaglio (linea rossa, maglie quadrate con lato 10 m), è focalizzata sulla zona di intervento ed è stata utilizzata per valutare e caratterizzare, in termini di idrodinamica e trasporto solido, la configurazione attuale e la nuova configurazione di progetto.

5.2 Simulazioni e clima ondoso

Il clima del moto ondoso è il dato principale per la determinazione delle condizioni forzanti. Tale clima ondoso costiero, definito nel corso dello studio MM, è riportato per comodità in **Tab. 5.1**.

5.2.1 Evoluzione dei fondali nel breve termine

Per valutare l'evoluzione dei fondali nel breve termine si è fatto riferimento a singole mareggiate tipiche dell'area in esame, dedotte dal clima di **Tab. 5.1**. Ogni mareggiata è stata discretizzata in una successione di stati di mare. In particolare nella valutazione del profilo trasversale della spiaggia sono state simulate le mareggiate estreme annuali e decennali più significative tra quelle definite a costa nello studio MM e riportate in **Tab. 5.2** (in rosso sono evidenziate le direzioni simulate), alle profondità di 30 m.

5.2.2 Evoluzione dei fondali nel lungo termine

Nel calcolare l'evoluzione media annua dei fondali occorre tener presente che essa è ovviamente conseguente al clima del moto ondoso medio annuo.
In analogia a quanto effettuato in altri studi precedenti sviluppati da DEAM e considerata l'ovvia impossibilità pratica di simulare l'andamento delle correnti, e quindi del trasporto di sedimento, su lunghi periodi di tempo e tenuto conto che l'andamento temporale del trasporto di sedimento nella zona costiera può essere rappresentato da una successione di episodi associati al verificarsi di mareggiate, l'evoluzione media dei fondali nel lungo termine è stata calcolata come dovuta alla combinazione degli effetti delle sole mareggiate, considerate come successione di stati di mare.

L'evoluzione media annua dei fondali è stata così ottenuta sommando gli effetti dei singoli stati di mare precedentemente definiti, in numero forzatamente ridotto, ma tuttavia più che sufficiente a garantire la rappresentatività dei risultati, ognuno caratterizzato dalla propria frequenza percentuale e considerato agente sui fondali costieri per durate proporzionali alla frequenza percentuale. Si è cioè trasformata la frequenza di eventi in durata (ore), considerando come termine di riferimento l'anno.
Tale scelta, il considerare cioè come termine di riferimento l'anno, è giustificata dal fatto che un modello morfodinamico tridimensionale ha un campo di applicabilità temporale dell'ordine delle ore o dei mesi e, come limite massimo, l'anno.
Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che il modello simula con molta accuratezza le mareggiate, ma (come tutti i modelli) non può certo simulare i periodi di "bel tempo" tra una mareggiata e l'altra: in tal modo viene trascurato quell'effetto di ripristino delle caratteristiche del fondale che ha luogo durante i periodi di calma che, per l'azione delle correnti di marea e del leggero moto ondoso comunque presente, tende ad attenuare le erosioni ed i ripascimenti determinati dalle mareggiate.

A causa di ciò l'evoluzione media annua dei fondali così calcolata **deve essere ritenuta decisamente cautelativa**.

Per la stima dell'evoluzione dei fondali nel lungo termine, sono state quindi definite le mareggiate da simulare sulla base dei risultati del modello TRALIT, che stima il trasporto solido potenziale indotto dal clima ondoso medio annuo e fornisce la distribuzione del trasporto solido in funzione di classi di altezza e direzione di provenienza delle onde. In particolare, sono stati selezionati gli stati di mare maggiormente significativi in termini di trasporto solido.

6 REGIME SEDIMENTARIO LITORANEO

Il modello monodimensionale TRALIT è stato utilizzato per valutare quantitativamente il regime sedimentario litoraneo potenziale, associato al clima ondoso medio annuo dell'area di studio, allo scopo di individuare l'altezza d'onda e la direzione di provenienza degli stati di mare con associato valori significativi di trasporto solido e, quindi, da utilizzare come input del modello morfodinamico 3D per la valutazione dell'evoluzione dei fondali nel breve e medio termine.

6.1 Trasporto dei sedimenti

Allo scopo di valutare il regime sedimentario annuale che caratterizza l'intera area interessata dal progetto, il modello TRALIT è stato applicato a tre sezioni trasversali (**Fig. 6.1**): una è centrata sull'area di studio, le altre due sono state scelte rispettivamente ad est (oltre il poto turistico) e ad ovest della sezione centrale.

Le simulazioni sono state effettuate nella configurazione attuale del litorale, assumendo in input il clima del moto ondoso definito nel rapporto MM, e le caratteristiche dei tre profili (pendenza del fondale, granulometria dei sedimenti) desunti dai dati di base disponibili.

I risultati sono presentati in **Tab. 6.1**, dove sono evidenziati il trasporto potenziale diretto verso est, quello diretto verso ovest e il trasporto netto, e nella **Tab. 6.2** dove sono riportati altri parametri caratteristici della spiaggia, utili ai fini della completezza d'informazione.
Dalle tabelle si osserva che:

- il trasporto potenziale netto annuo medio è diretto, in tutte le sezioni, verso est (positivo);
- il flusso medio di energia ondosa incidente è notevole, specie nella sezione ad est, essendo quella orientata in direzione dei settori direzionali tipici del libeccio;
- gli eventi di moto ondoso al largo che determinano il trasporto verso est è sono circa il 25-28% per tutte e tre le sezioni considerate mentre la percentuali degli eventi con trasporto solido prevalente verso ponente passa dal 6-7 % nelle sezioni OVEST e CENTRO al 15 % della sezione EST. Tali variazioni sono essenzialmente dovute alla diversa orientazione del piano batimetrico in corrispondenza delle diverse sezioni;
- in corrispondenza della sezione centrale, rappresentativa dell'area oggetto di intervento, la profondità di chiusura massima entro cui si verifica la maggior parte del trasporto di sedimenti è di circa 8.7 m.

Si osservi che il trasporto stimato con il modello monodimensionale TRALIT è da considerarsi **potenziale**. Inoltre:

  - come la maggior parte dei modelli esistenti, tende a sovrastimare il trasporto solido in presenza di materiale non sabbioso ma ghiaioso, come nel caso della spiaggia in esame, specie nel calcolo del contributo di trasporto in sospensione che, in questo caso, è ragionevole considerare praticamente nullo;

- essendo un modello semplificato il fondale è schematizzato, nel caso in esame, con due sole pendenze per cui le profondità di frangimento e di chiusura sono da considerare indicative.

6.2 Evoluzione nel breve termine

Per valutare l'evoluzione dei fondali nel breve termine si è fatto riferimento alle singole mareggiate estreme decennali e annuali, com'è generalmente in uso nella verifica di stabilità dei fondali.
Ogni mareggiata è stata schematizzata come una successione di un numero variabile di stati di mare espressi come combinazione di valori di altezza significativa, periodo e direzione di provenienza delle onde e avente come valore massimo il corrispondente al valore estremo decennale, vedi studio MM, riportato in **Tab. 5.2** (in rosso sono evidenziate le direzioni simulate).
Mediante il modello SBEACH sono stati valutati, lungo una sezione trasversale all'area di progetto, **sez. M2** in **Fig. 6.2**, l'elevazione indotta dal moto ondoso e la distanza minima raggiunta durante le mareggiate tra il muro di sostegno della linea ferroviaria e l'onda.

6.3 Evoluzione nel lungo termine

Considerata l'ovvia impossibilità pratica di simulare l'andamento delle correnti, e quindi del trasporto solido ad esse associato, su lunghi periodi di tempo, è stata individuata una metodologia di analisi che assume che l'andamento temporale del trasporto solido nella zona costiera possa essere rappresentato da una combinazione di stati di mare considerati significativi in termini di trasporto solido indotto.

La metodologia individuata ha quindi previsto la scelta degli stati di mare che inducono i maggiori volumi di trasporto solido potenziale, sulla base dei risultati ottenuti con l'applicazione del modello TRALIT. Si ritiene, infatti, che, malgrado i limiti del modello, i risultati offrano comunque la possibilità, se ben interpretati, di comprendere le caratteristiche principali del trasporto solido in funzione del moto ondoso locale. In particolare, il modello fornisce in output la distribuzione del trasporto per classi di direzione e altezza d'onda al largo, riportata per la sezione centrale in **Tab. 6.3**.

Dalla tabella **Tab. 6.3** sono stati selezionati gli stati di mare maggiormente significativi in termini di trasporto solido, e raggruppati individuando le combinazioni di altezza d'onda e direzione con equivalente trasporto potenziale.
Gli stati di mare selezionati per le simulazioni con modello morfodinamico 3D sono riportati in **Tab. 6.4** in termini di altezza d'onda (m), direzione di provenienza (° N), periodo (s) e frequenza percentuale di occorrenza su base annua (%). La classe di altezza d'onda 0.5 m, a cui è associato un trasporto solido netto praticamente nullo per qualsiasi direzione (vedi **Tab. 6.3**), è stata interpretata come "calma".

Successivamente, per ogni stato di mare riportato in **Tab. 6.4**, è stata simulata l'idrodinamica costiera indotta sia dal frangimento delle onde, e quindi dalle variazioni del "radiation stress", sia dal vento estremo annuale proveniente dalla stessa direzione, i cui

valori sono riportati nello studio MM. L'idrodinamica associata a ciascuno stato di mare e la successiva combinazione dei risultati ottenuti dal modello morfodinamico sulla base delle corrispettive percentuali di occorrenza, ha permesso di stimare l'evoluzione potenziale media annua del fondale.

7 IL CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso è stato utilizzato il modello SWAN (Simulating Waves Nearshore), [**rif. 3**], che rappresenta lo stato dell'arte, descritto e riportato in **Appendice A - Sezione A.2**.
Tale modello è stato applicato, mediate la tecnica del "nesting" alle griglie di calcolo precedentemente descritte sia alla configurazione di progetto e sia alla configurazione di stato attuale.

In **Fig. 7.1** si riporta, a titolo di esempio, il campo di moto ondoso dello stato di mare avente Hs=4.2 m, direzione di provenienza 210°N, e periodo di picco Tp= 9.8 s.

Nelle **Figg. 7.2-7.11** il campo di moto ondoso corrispondente alle simulazioni effettuate riportate in **Tab. 5.2** viene riportato per entrambe le configurazioni simulate. Si osserva come le onde, principalmente per effetto della rifrazione, "ruotino" disponendosi col fronte d'onda parallelo alla costa. Ciò fa si che, di fronte all'area oggetto di studio, indipendentemente dalla direzione al largo del moto ondoso, la direzione di provenienza del moto ondoso sia sempre prossima alla normale a costa.

Da tali considerazioni si può desumere che lo stato di mare più energetico e dannoso, in termini di direzione, per il tratto di costa considerato sia quello avente Hs uguale a 4.2 m e direzione di provenienza al largo pari a 210°N.

8 IL CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO

Il campo di corrente è stato calcolato con il modello idrodinamico applicato "a scala locale" i cui contorni sono stati innestati sul modello "a grande scala", sfruttando quindi i valori di livello e di velocità calcolati da quest'ultimo per fornire condizioni oggettive al modello di dettaglio.

Nelle **Figg. 8.1-8.2-8.3** vengono riportati, a titolo di esempio, i campi idrodinamici a grande scala per gli stati di mare al culmine delle mareggiate proveniente rispettivamente da 120, 165 e 210°N.

Si è proceduto, quindi, con le simulazioni dei campi idrodinamici forzati dal moto ondoso incidente che, nella zona delle onde frangenti, mediante il meccanismo del "radiation stress", induce una corrente costiera di forte intensità che rappresenta il veicolo principale della movimentazione dei sedimenti lungo la costa.

Esempi grafici dei risultati ottenuti sono mostrati nelle **Figg. 8.4-8.9**, dove sono messi a confronto i campi idrodinamici istantanei ottenuti nelle due configurazioni (attuale e progetto) simulate.
Nei grafici l'andamento della corrente è rappresentato da frecce (una ogni 3 nodi della griglia) la cui direzione corrisponde alla direzione di propagazione del flusso e la cui lunghezza è proporzionale al valore della velocità (la velocità rappresentata si riferisce al valore medio sulla verticale). La scala cromatica si riferisce all'intensità della corrente, ed è stata opportunamente selezionata per evidenziare le zone di maggiore variabilità del flusso indotto dai gradienti di "radiation stress". Le isolinee rappresentano la batimetria e sono tracciate ad ogni 2.0 m di profondità.

Indipendentemente dalla direzione di provenienza del moto ondoso, si ha la generazione di due correnti litoranee, una lungo la costa ovest e l'altra lungo la costa est del litorale compreso tra Capo Sant'Ampelio e Capo Nero, che per effetto della conformazione della costa e della batimetria locale danno luogo nell'area in cui si incontrano ad una corrente che fluisce, prevalentemente, verso sud. In particolare:

- nel caso della mareggiata proveniente da 120°N la corrente più intensa è quella che fluisce lungo la costa est a partire da Capo Nero e di conseguenza si ha l'innesco di una corrente verso il largo in corrispondenza dell'area di studio, (**Fig. 8.1**);
- nel caso della mareggiata proveniente da 165°N si ha una situazione di sostanziale equilibrio tra le correnti indotte sottocosta sul lato ovest e sul lato est della baia, con conseguente generazione della corrente verso il largo in corrispondenza del porto turistico *Baia Verde* (**Fig. 8.2**);
- nel caso della mareggiata proveniente da 210°N, la corrente che fluisce sottocosta sul lato ovest della baia a partire da Capo Sant'Ampelio è decisamente più intensa di quella che fluisce sul lato est, intensità che risulta più elevata dei precedenti casi in quanto forzata da onde aventi altezze maggiori (**Tab. 6.4**). Tale situazione comporta correnti molto intense nell'area oggetto di studio e la generazione di una corrente verso il largo all'altezza di Ospedaletti avente direzione media di propagazione 150°N (**Fig. 8.3**).

Nelle **Figg.8.4-8.9** sono riportati i risultati idrodinamici ottenuti sullo schema di dettaglio per la configurazione di stato attuale (**Figg. 8.4-8.6**) e per la configurazione di progetto (**Figg. 8.7-8.9**).
Nella configurazione di stato attuale, per tutte le mareggiate considerate, la corrente presenta nelle immediate vicinanze alla linea di riva elevate intensità, in particolare nell'area **A** oggetto di studio (**Fig. 2.2**) e direzione prevalente verso ponente. In particolare si osserva che sottocosta le intensità maggiori si hanno per effetto della mareggiata da 120°N (**Fig. 8.4**), mentre per le mareggiate da 165°N (**Fig. 8.5**) e 210°N (**Fig. 8.6**) la corrente più intensa si mantiene ad una distanza da costa di circa 150-200 m su di una profondità di circa 8 m. In tal caso la corrente fluisce prevalentemente verso est per poi scindersi in due parti in prossimità del nuovo porto turistico: una parte prosegue verso est e successivamente, come precedentemente descritto, muove verso il largo, un'altra parte ruota in senso orario e fluisce sottocosta. Quest'ultima da luogo, per effetto dei pennelli esistenti, a celle di circolazione più o meno evidenti che ruotano in senso orario.
Nella configurazione di progetto (**Figg. 8.7-8.8--8.9**), a livello qualitativo, l'andamento delle correnti è simile a quello descritto per la configurazione di stato attuale, ma con intensità inferiori. In particolare l'avanzamento della linea di riva verso il largo e la realizzazione di un nuovo pennello ad est dell'area **A** oggetto di studio (**Fig. 2.2**) contemplati dalla configurazione di progetto, contribuiscono ad ostacolare la corrente longitudinale sottocosta e a ridurre la dimensione delle celle di circolazione presenti nello stato attuale. In sostanza lo spostamento della linea di riva verso il largo comporta una maggiore influenza a costa della corrente litoranea principale che fluisce, su di una profondità di 8 m circa, verso est con conseguente riduzione di intensità della corrente nelle immediate prossimità della linea di riva, che fluisce verso ovest. Tale fenomeno è tanto più evidente quanto più è intensa la corrente principale (mareggiata da 210°N, **Fig. 8.9**)

9 L'EVOLUZIONE DEI FONDALI

Il trasporto dei sedimenti e la conseguente evoluzione dei fondali sono stati calcolati mediante l'applicazione del modello morfodinamico descritto in **Appendice A**, al quale si rimanda per i dettagli.
Ricordiamo che il modello calcola la variazione del fondale derivante dalla divergenza del trasporto solido (sospeso e in prossimità del fondo) in ciascuna maglia della griglia di calcolo.
Le forzanti del modello sono il campo di corrente ed il campo di moto ondoso.

Nelle **Figg. 9.1-9.6** vengono mostrati i risultati del modello in termini di evoluzione potenziale del fondale nell'area di studio a ridosso della linea ferroviaria (situazione attuale e configurazione di progetto), al termine di ciascuna mareggiata decennale, schematizzata come una successione di un numero variabile (a seconda del caso) di valori di altezza, periodo e direzione delle onde (**Tab. 6.4**).
I grafici utilizzano una scala cromatica in cui il blu corrisponde ad approfondimento del fondale (asporto di materiale dal fondo) e l'arancione alla riduzione della profondità del fondale (deposito di materiale sul fondo).

9.1 Evoluzione dei fondali costieri

L'evoluzione media annua dei fondali, calcolata sulla base delle percentuali di occorrenza delle calme e dei singoli stati di mare simulati, così come mostrati in **Tab. 6.4** e discussi nella **sez. 6.3**, viene mostrata per la situazione attuale e nell'ipotesi di realizzazione del progetto, in **Fig. 9.7** evidenziando le zone che mediamente nel corso dell'anno sono soggette ad asporto o deposito.
I principali limiti che si riscontrano in questa metodologia di analisi sono principalmente attribuibili ai seguenti fattori:

- impossibilità di modellare la risposta dinamica della linea di riva alle varie perturbazioni meteo-marine;

- impossibilità di conoscere a priori l'ordine con cui gli eventi si susseguono nel corso dell'anno, che riveste invece un ruolo fondamentale nell'evoluzione dei fondali e del litorale nel corso dell'anno;

- impossibilità, propria di qualunque modello morfodinamico, di simulare i periodi di mare calmo o quasi calmo che intercorrono, anche per molto tempo (si pensi alla stagione estiva) tra una mareggiata e l'altra: in tal modo viene trascurato l'effetto di ripristino dei fondali che ha luogo durante i periodi di calma che, per azione delle correnti di marea e del leggero moto ondoso comunque presente, tende ad attenuare in maniera notevolissima le erosioni ed i ripascimenti determinanti dalle mareggiate.

La combinazione dei risultati ottenuti dal modello morfodinamico per ciascun stato di mare sulla base delle rispettive percentuali di occorrenza permette comunque di ottenere importanti e attendibili informazioni sui flussi medi di sedimento annui.

L'evoluzione annuale dei fondali indica una sostanziale diminuzione dei sedimenti potenzialmente movimentati nella configurazione di progetto (pannello inferiore in **Fig. 9.7**) rispetto alla situazione attuale (pannello superiore in **Fig. 9.7**), dovuta prevalentemente alla riduzione di intensità delle correnti sottocosta e, principalmente, all'aumento di dimensione dei sedimenti utilizzati in fase di ripascimento, rispetto a quelli attualmente presenti sui fondali antistanti l'area **A** e **B** di **Fig. 2.2**.

9.2 Evoluzione del profilo trasversale

Come precedentemente evidenziato dai risultati del modello TRALIT e del modello morfodinamico, in corrispondenza della **sez. M2** (**Fig. 6.2**) il trasporto solido trasversale verso il largo indotto dalla corrente e direttamente dal moto ondoso risulta fondamentale nell'evoluzione dei fondali. Alla luce di ciò, si è scelto di simulare il comportamento del profilo trasversale della spiaggia in esame soggetta, nella situazione attuale e in quella di progetto, alle mareggiate annuale e decennale più gravose. Mareggiate che, come evidenziato nel precedente **cap. 7** relativo al moto ondoso, corrispondo a quelle provenienti da 210°N e che, quindi, permettono di evidenziare in modo adeguato le eventuali criticità presenti. Si è, dunque, ritenuto opportuno utilizzare il modello matematico SBEACH, sviluppato presso l'US Army Corps of Engineers (Larson *et al.*, 1990 [**rif. 4**]), al fine di simulare in maniera accurata la risposta del sistema-spiaggia a sollecitazioni meteorologiche e marine. Una dettagliata illustrazione del modello così come descritta dagli autori, è riportata nell'**Appendice C**.

Sono stati forniti in input al modello:

- i 2 profili, stato attuale e progetto, in corrispondenza della sez. M2, vedi **Fig. 6.2**, riportati con la linea nera nella **Fig. 9.8**;
- le mareggiate di **Tab. 5.2**;
- elevazione del livello del mare annuale e decennale, valori riportati nello studio MM;
- valori del diametro medio di sedimento lungo il profilo (v. paragrafi 2.1 e 2.2).

Esempi dei risultati più significativi ottenuti sono mostrati graficamente nella **Fig. 9.8,** rispettivamente per lo stato attuale (pannello superiore) e per la configurazione di progetto (pannello inferiore). Con la linea continua blu sono evidenziati i profili finale indotti dalla mareggiata annuale, con la linea continua rossa sono evidenziati i profili finali indotti dalla mareggiata decennale, mentre con le linee tratteggiate vengono riportati gli inviluppi dell'altezza durante la mareggiata annuale (blu) e decennale (rossa).

Un altro parametro importante di cui si è tenuto presente è la risalita dell'onda sulla spiaggia, rappresentata dai valori di set-up e run-up delle onde, e la distanza dal muro di sostegno, posto a protezione della ferrovia, raggiunta dall'onda.

Nella **Tab. 9.1** vengono mostrati, per le mareggiate simulate ed i profili considerati, tali valori sia relativamente alla situazione attuale che a quella conseguente alla realizzazione del progetto.

10 ANALISI E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Nell'analizzare i risultati ottenuti, occorre attentamente considerare le ipotesi formulate, i limiti del modello e della schematizzazione, la fenomenologia locale, etc.; insomma tutti quei fattori che aiutano ad interpretare correttamente la tendenza evolutiva del fondale nel corso delle mareggiate e nel medio termine.
Nell'interpretare i risultati va anche tenuto presente che, in assenza di una effettiva taratura dei modelli utilizzati per la nota carenza di dati sperimentali tipica delle coste liguri, i risultati stessi vanno considerati solamente in termini relativi e non assoluti e quindi utilizzabili per un confronto oggettivo tra le variazioni dei fondali nelle varie configurazioni.

I principali aspetti da considerare sono che il calcolo dell'evoluzione dei fondali nel medio termine è stato effettuato nell'approssimazione della sovrapposizione lineare degli effetti, sommando cioè per ciascuna maglia del modello i contributi di erosione e ripascimento dovuti alle varie mareggiate, come già evidenziato. Qualunque modello, è ovvio non può simulare i periodi di mare calmo o quasi calmo che intercorrono, anche per molto tempo (si pensi alla stagione estiva) tra una mareggiata e l'altra: in tal modo viene trascurato quell'effetto di ripristino delle caratteristiche del fondale che ha luogo durante i periodi di calma che, per l'azione delle correnti di marea e del leggero moto ondoso comunque presente, tende ad attenuare in misura notevolissima le erosioni ed i ripascimenti determinati dalle mareggiate;

Va poi ricordato che tutti i valori dei volumi lungo i fondali litoranei vanno intesi in senso "potenziale", dipendono cioè dall'effettiva presenza delle quantità di sedimento messe potenzialmente in gioco dall'energia idrodinamica tipica dell'area.

Per una corretta valutazione quantitativa delle differenze tra caso attuale e configurazione di progetto, sono state calcolate le variazioni totali dei volumi di sedimento.

Per comodità la zona costiera è stata divisa in varie aree, mostrate nella **Fig. 10.1**: su ogni area è stato calcolato lo spessore medio di sedimento, per ogni metro quadrato di superficie del fondo, che si deposita o viene asportato dai fondali nell'arco di tempo di 1 anno.
Sono stati calcolati tali spessori:

- sull'area prossima a riva, che va da costa fino alla profondità di circa 4-4.5 m, **area 5** in **Fig. 10.1**;
- sulle sotto-aree comprese tra la costa e la profondità di circa 4-4.5 m: **area 1** (lato ovest, spiaggia esistente) e **area 2** (lato est, area attualmente soggetta a forte erosione), in **Fig. 10.1**, che costituiscono l'intera **area 5**. Sono queste le aree dove avvengono i maggiori cambiamenti conseguenti alla realizzazione del progetto;
- sull'area e le sotto-aree comprese tra i 4 e 12 m di profondità: **area 3** (lato ovest), **area 4** (lato est) e **area 5** (somma delle **aree 3** e **4**), in **Fig. 10.1**.

I risultati sono presentati in **Tab. 10.1** i valori positivi si riferiscono a deposizione, mentre quelli negativi ad erosione.

Da una prima analisi complessiva della tabella, si nota come, nella configurazione di progetto, la movimentazione di sedimenti si riduce notevolmente, conseguenza del fatto che il ripascimento avviene con materiale di maggiore pezzatura rispetto a quello presente nei fondali immediatamente antistanti l'area oggetto di studio e che gli interventi previsti a progetto contribuiscono, come già visto precedentemente, a diminuire le intensità delle correnti che fluiscono sottocosta.

Analizzando la tabella con maggior dettaglio, si nota che, a fronte di una minor movimentazione di sedimento potenzialmente in deposizione in prossimità nell'**area 1**, si ha una notevole diminuzione dei sedimenti potenzialmente asportati nella configurazione di progetto rispetto alla situazione attuale dall'**area 2**. Riduzione all'asporto di sedimenti che nel bilancio complessivo dell'**area 5**, somma delle **aree 1** e **2**, viene nuovamente rimarcata.

Si osserva, poi, che le **aree 3** e **4** posizionate più al largo anch'esse una riduzione del sedimento potenzialmente movimentato, riconducibile, in questo caso, alla minor disponibilità di sedimento in sospensione.

Risultati analoghi (**Fig. 9.8**) vengono riscontrati nell'analisi del profilo trasversale della spiaggia in corrispondenza della **sez. M2**, individuata in **Fig. 6.2**. Si osserva infatti che, mentre nella situazione attuale, per effetto delle mareggiata annuali (linea blu) e decennali (linea rossa), il sedimento al piede delle barriere poste a protezione del muro di sostegno della linea ferroviaria, tendenzialmente viene movimentato verso il largo con conseguente criticità per il muro stesso, nella configurazione di progetto, la nuova spiaggia si mostra meno vulnerabile al trasporto trasversale di sedimenti verso il largo indotto dal moto ondoso. Dalla stessa **Fig. 9.8** si può anche osservare che la nuova configurazione di spiaggia agisce direttamente a protezione del muro di sostegno della linea ferroviaria allontanando il moto ondoso dalle strutture poste a difesa del muro stesso, vedi **Tab. 9.1**.

Sostanzialmente, sia analizzando il bilancio medio annuo di sedimenti potenzialmente movimentati per effetto del clima ondoso e delle correnti locali, sia analizzando l'evoluzione del profilo trasversale per effetto delle mareggiate annuali e decennali, si evidenzia un miglioramento delle condizioni caratterizzanti il litorale delle zona **A** e **B** oggetto di studio, con conseguente maggiore protezione delle strutture (i.e. muro) a tergo della spiaggia.

11 CONCLUSIONI

Il presente studio, mediante l'applicazione di appositi modelli numerici, ha analizzato e verificato dal punto di vista idro-morfodinamico le opere a progetto che prevedono la complessiva riqualificazione e potenziamento dell'arenile, interessando un'area più ampia di quella occupata dalle opere di difesa della linea ferroviaria, e precisamente il tratto compreso tra il pennello del porto di Ospedaletti a levante e la falesia rocciosa a ponente, per un'estensione complessiva di circa 700 m.
In particolare il progetto interessa la realizzazione di un nuovo pennello in massi naturali, il potenziamento dei pennelli esistenti e il ripascimento strutturale della spiaggia emersa e sommersa.

Lo studio è stato effettuato basandosi sui dati meteo-marini descritti e analizzati criticamente nell'ambito della relazione "*Opere di difesa della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia al km 138+100 in loc. Giunchetto (Bordighera) – Sezione 1, Studio Meteo-Marino*" [**rif. 1**] a cui si rimanda per maggiori dettagli.

Attraverso il confronto tra i risultati ottenuti a partire dalla situazione attuale dei fondali e della linea di costa e dalla configurazione di progetto, è stato possibile quantificare le variazioni dei fondali costieri, positive e negative, indotte dalla realizzazione dei nuovi interventi in esame.

Dal punto di vista generale la realizzazione del nuovo pennello sul lato est della spiaggia, e il potenziamento dei pennelli esistenti mediante massi naturali contribuiscono, assieme all'avanzamento della linea di riva indotta dal ripascimento, alla riduzione delle velocità della corrente litoranea nei pressi della battigia. Inoltre, l'utilizzo di materiali ghiaiosi per la realizzazione del ripascimento strutturale della spiaggia emersa e sommersa, conferisce una maggiore stabilità alla spiaggia stessa rispetto alla situazione attuale.

Per quanto concerne l'area occupata dalle opere di difesa della linea ferroviaria le simulazioni mediante modello numerico hanno evidenziato, in sintesi, che la realizzazione del progetto ha come conseguenza:

- la diminuzione del materiale potenzialmente asportato verso il largo e quindi una maggiore stabilità dei fondali antistanti le opere a progetto;
- l'aumento di set-up e run-up nella configurazione di progetto rispetto allo stato attuale dovuto alla nuova modellazione dei fondali per effetto del ripascimento;
- l'allontanamento del moto ondoso, malgrado il maggiore set-up e run-up, dalle opere di difesa della linea ferroviaria (i.e. muro) indotto dalle mareggiate annuali e decennali. In particolare per la mareggiata decennale, a fronte dell'attuale situazione che prevede il raggiungimento del muro a difesa della linea ferroviaria da parte del moto ondoso, con conseguente criticità per la stabilità del muro stesso, nella configurazione di progetto il moto ondoso arriva ad una distanza di circa 6 m dal muro riducendone quindi le criticità legate al realizzarsi della mareggiata stessa.

Ovviamente i risultati ottenuti e le quantità stimate dal modello, in particolare la distanza rispetto al muro, raggiungibile dal moto ondoso, per le ragioni più volte espresse, non debbono essere considerate in termini assoluti, ma esclusivamente in termini relativi, cioè

come confronto di situazioni tra la configurazione attuale e la configurazione futura dell'area.

In conclusione, alla luce delle analisi realizzate e dei risultati ottenuti, pur evidenziando le migliorie indotte dagli interventi a progetto, si suggerisce la realizzazione di un attento piano di monitoraggio delle opere stesse di difesa della linea ferroviaria atto ad evidenziare eventuali future criticità.

12 RIFERIMENTI

1. DEAM s.r.l. – "*Opere di difesa della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia al km 138+100 in loc. Giunchetto (Bordighera) – Sezione 1, Studio Meteo-Marino*", Ottobre 2011;

2. NAVICHART – http://www.navichart.com/index.com, 2007;

3. Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, "*The "SWAN" wave model for shallow water*". Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp. 668-676, 1996;

4. Larson, M., and Kraus, N.C. - "*Mathematical modeling of the fate of beach fill,*" Artificial Beach Nourishments, Special Issue of Coastal Engineering, H. D. Niemayer, J. van Overeem, and J. van de Graaff, cd., Vol 16,83-114, 1991

INDICE DELLE TABELLE

TAB. 3.1 – DATI PRELIEVI SEDIMENTI

TAB. 5.1 - CLIMA DEL MOTO ONDOSO A COSTA ALLA PROFONDITA' DI 30 m

TAB. 5.2 – VALORI ESTREMI ANNUALI E DECENNALI A COSTA SU DI UNA PROFONDITA' DI 30 m

TAB. 6.1 – RISULTATI DEL MODELLO TRALIT: FLUSSI ANNUI ATTRAVERSO LE TRE SEZIONI TRASVERSALI (m^3/ANNO)

TAB. 6.2 – RISULTATI DEL MODELLO TRALIT LUNGO LE TRE SEZIONI TRASVERSALI

TAB. 6.3 – DISTRIBUZIONE DEL TRASPORTO POTENZIALE (10000 m^3/ANNO) PER CLASSI DI DIREZIONE E ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA

TAB. 6.4 – STATI DI MARE 3-ORARI SIMULATI CON IL MODELLO MORFODINAMICO

TAB. 9.1 – SET-UP, RUN-UP E DISTANZA MURO-ONDA NELLA CONFIGURAZIONE DI STATO ATTUALE E DI PROGETTO

TAB. 10.1 – SPESSORE MEDIO ANNUO DI SEDIMENTO POTENZIALMENTE DEPOSITATO (positivo) O ASPORTATO (negativo) NELLA SITUAZIONE ATTUALE E DI PROGETTO

Dati prelievi sedimenti					
Diametro sedimenti	**Punti di campionamento**				
	S1	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**
D_{20} [mm]	0.17	0.15	0.14	0.13	9
D_{50} [mm]	0.27	0.19	0.18	0.18	18
D_{80} [mm]	0.4	0.26	0.25	0.23	26

TAB. 3.1 – DATI PRELIEVI SEDIMENTI

Hs [m]															
Dir [°N]	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**3.5**	**4**	**4.5**	**5**	**5.5**	**6**	**6.5**	**> 6.50**	**TOT.**
0	0.97														0.97
30	10.57														10.57
60	11.48														11.48
90	2.7	2.33	0.83	0.32	0.13	0.03									6.33
120	1.15	1.44	0.29	0.15	0.03	0.01									3.07
150	1.04	0.86	0.23	0.03	0.02	0.01									2.19
180	2.49	1.51	0.58	0.14	0.06	0.03	0.01								4.83
210	7.87	9.07	3.2	1.56	0.6	0.25	0.09	0.06	0.03						22.72
240	20.08	6.65	3.42	2.71	2.07	0.47	0.01								35.41
270	1.46														1.46
300	0.53														0.53
330	0.43														0.43
TOT.	60.77	21.86	8.55	4.92	2.91	0.79	0.12	0.06	0.03						100

TAB. 5.1 - CLIMA DEL MOTO ONDOSO A COSTA ALLA PROFONDITA’ DI 30 m

Dir [°N]	Periodo di ritorno 1 anno			Periodo di ritorno 10 anni		
	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Hs [m]	Dir [°N]	Tp [s]
120	1.5	133	5.9	2.3	136	7.2
150	1.4	153	5.8	2.5	155	7.2
165	1.8	165	6.2	3.2	166	7.9
180	2.2	176	6.6	3.9	176	8.5
210	3.1	192	8.4	4.2	190	9.8

TAB. 5.2 – VALORI ESTREMI ANNUALI E DECENNALI A COSTA SU DI UNA PROFONDITA' DI 30 m

	Sez.OVEST	Sez.CENTRO	Sez.EST
Trasporto potenziale verso EST	15110	12560	16160
Trasporto potenziale verso OVEST	-4784	-2166	-3844
Trasporto potenziale NETTO	10326	10394	12316

TAB. 6.1 – RISULTATI DEL MODELLO TRALIT: FLUSSI ANNUI ATTRAVERSO LE TRE SEZIONI TRASVERSALI (m^3/ANNO)

	Sez.OVEST	Sez.CENTRO	Sez.EST
ORIENTAZIONE SEZIONE [°N]	132	144	202
FLUSSO MEDIO DI ENERGIA [KW/m]	0.55	0.50	1.19
FREQ.(%) DEGLI EVENTI CONSIDERATI	35	31	44
FREQ.(%) DEGLI EVENTI CON TRASP. VERSO EST	28	25	28
FREQ.(%) DEGLI EVENTI CON TRASP. VERSO OVEST	7	6	15
PROF. DI FRANGIMENTO [m]	0.58	0.70	0.85
PROF. DI FRANGIMENTO AL 95 % [m]	1.36	1.46	1.97
PROF. MAX DI FRANGIMENTO [m]	3.03	3.43	4.24
PROF. LIMITE MEDIA [m]	1.72	1.72	1.73
PROF. LIMITE AL 95 % [m]	3.74	3.74	3.96
PROF. LIMITE MAX [m]	8.69	8.69	8.69

TAB. 6.2 – RISULTATI DEL MODELLO TRALIT LUNGO LE TRE SEZIONI TRASVERSALI

Direzione [°N]	Classi di altezza d'onda Hs [m]										
	0.5	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**	**3.5**	**4**	**4.5**	**5**	**Totale**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	-0.01	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	0	0	0	0	0	-0.11
120	-0.01	-0.04	-0.02	-0.03	-0.01	0	0	0	0	0	-0.11
150	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
180	0.02	0.05	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0	0	0	0.22
210	0.04	0.2	0.2	0.2	0.14	0.09	0.05	0.06	0.05	0	1.03
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totale	0.04	0.19	0.21	0.18	0.13	0.11	0.07	0.06	0.05	0	**1.04**

TAB. 6.3 – DISTRIBUZIONE DEL TRASPORTO POTENZIALE (10000 m^3/ANNO) PER CLASSI DI DIREZIONE E ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA

Dir [°N]	Hs [m]	Ts [s]	P [%]
120	1.0	4.0	3.77
	1.8	5.5	1.59
	2.7	7.3	0.20
165	1.3	4.5	3.18
	2.3	6.5	0.25
	3.3	7.8	0.05
210	1.3	4.5	22.34
	2.2	6.4	6.94
	3.2	7.7	0.82
	4.2	7.8	0.09

TAB. 6.4 – STATI DI MARE 3-ORARI SIMULATI CON IL MODELLO MORFODINAMICO

Configurazione	Periodo Ritorno Mareggiata	Set-up e Run-up da onda [m]	Distanza muro-onda [m]
Stato Attuale	1	0.47	7
	10	0.52	0
Progetto	1	1.23	18
	10	1.33	6

TAB. 9.1 – SET-UP, RUN-UP E DISTANZA MURO-ONDA NELLA CONFIGURAZIONE DI STATO ATTUALE E DI PROGETTO

Area	Situazione attuale	Situazione di progetto
1	0.63	0.07
2	-1.79	-0.73
3	0.50	0.08
4	1.15	0.31
5	-0.88	-0.41
6	0.83	0.20

TAB. 10.1 – SPESSORE MEDIO ANNUO DI SEDIMENTO POTENZIALMENTE DEPOSITATO (positivo) O ASPORTATO (negativo) NELLA SITUAZIONE ATTUALE E DI PROGETTO

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 2.1 – AREA DI STUDIO (da Google Earth)

FIG. 2.2 – DETTAGLIO ZONE DI STUDIO

FIG. 2.3 – PLANIMETRIA STATO ATTUALE E PUNTI DI CAMPIONAMENTO DEI SEDIMENTI

FIG. 2.4 – PLANIMETRIA DI PROGETTO

FIG. 5.1 – SCHEMA GRIGLIE DI CALCOLO INNESTATE

FIG. 6.1 – SEZIONI DI CALCOLO DEL TRASPORTO SEDIMENTARIO COL MODELLO TRALIT

FIG. 6.2 – SEZIONE DI CALCOLO UTILIZZATA COL MODELLO SBEACH

FIG. 7.1 – ESEMPIO CAMPO DI MOTO ONDOSO SU SCHEMA GRANDE: CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

FIG. 7.2 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.0 m, DIR= 120°N

FIG. 7.3 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.8 m, DIR= 120°N

FIG. 7.4 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 2.3 m, DIR= 120°N

FIG. 7.5 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.3 m, DIR= 165°N

FIG. 7.6 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 2.3 m, DIR= 165°N

FIG. 7.7 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 3.3 m, DIR= 165°N

FIG. 7.8 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.3 m, DIR= 210°N

FIG. 7.9 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 2.2 m, DIR= 210°N

FIG. 7.10 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 3.2 m, DIR= 210°N

FIG. 7.11 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 4.2 m, DIR= 210°N

FIG. 8.1 – CAMPO IDRODINAMICO AL CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

FIG. 8.2 – CAMPO IDRODINAMICO AL CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

FIG. 8.3 – CAMPO IDRODINAMICO AL CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

FIG. 8.4 – SITUAZIONE ATTUALE: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

FIG. 8.5 – SITUAZIONE ATTUALE: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

FIG. 8.6 – SITUAZIONE ATTUALE: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

FIG. 8.7 – SITUAZIONE DI PROGETTO: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

FIG. 8.8 – SITUAZIONE DI PROGETTO: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

FIG. 8.9 – SITUAZIONE DI PROGETTO: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

FIG. 9.1 – SITUAZIONE ATTUALE: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

FIG. 9.2 – SITUAZIONE ATTUALE: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

FIG. 9.3 – SITUAZIONE ATTUALE: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

FIG. 9.4 – SITUAZIONE DI PROGETTO: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

FIG. 9.5 – SITUAZIONE DI PROGETTO: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

FIG. 9.6 – SITUAZIONE DI PROGETTO: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

FIG. 9.7 – VARIAZIONE POTENZIALE MEDIA ANNUA DEI FONDALI

FIG. 9.8 – PROFILI DEL FONDALE E INVILUPPO DELL'ALTEZZA D'ONDA INDOTTI DALLA MAREGGIATA ANNUALE (linee blu) E DECENNALE (linee rosse)

FIG. 10.1 – SUDDIVISIONE DELLA ZONA IN AREE DI STUDIO



Fig. 2.1 – AREA DI STUDIO (da Google Earth)

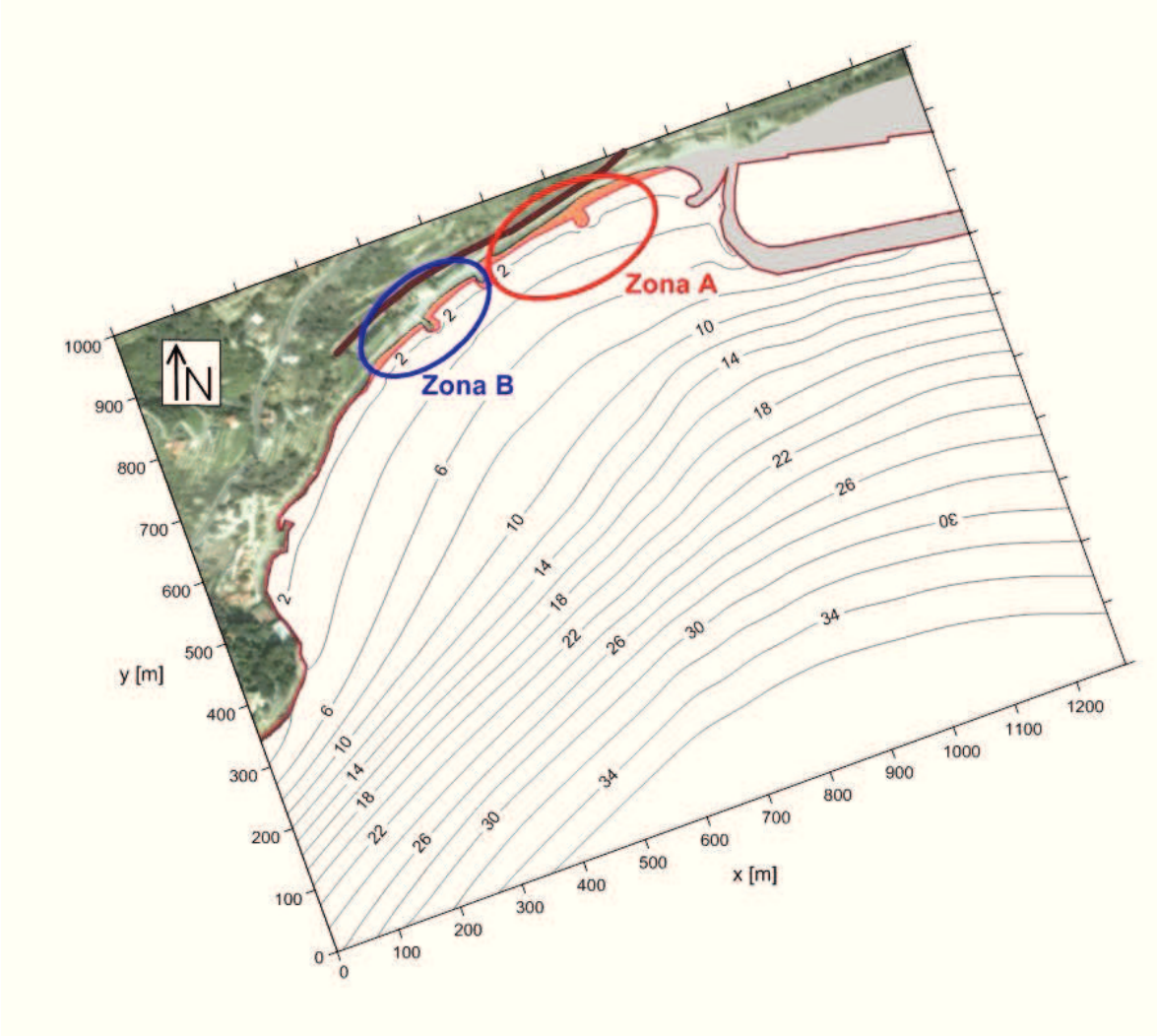


FIG. 2.2 – DETTAGLIO ZONE DI STUDIO

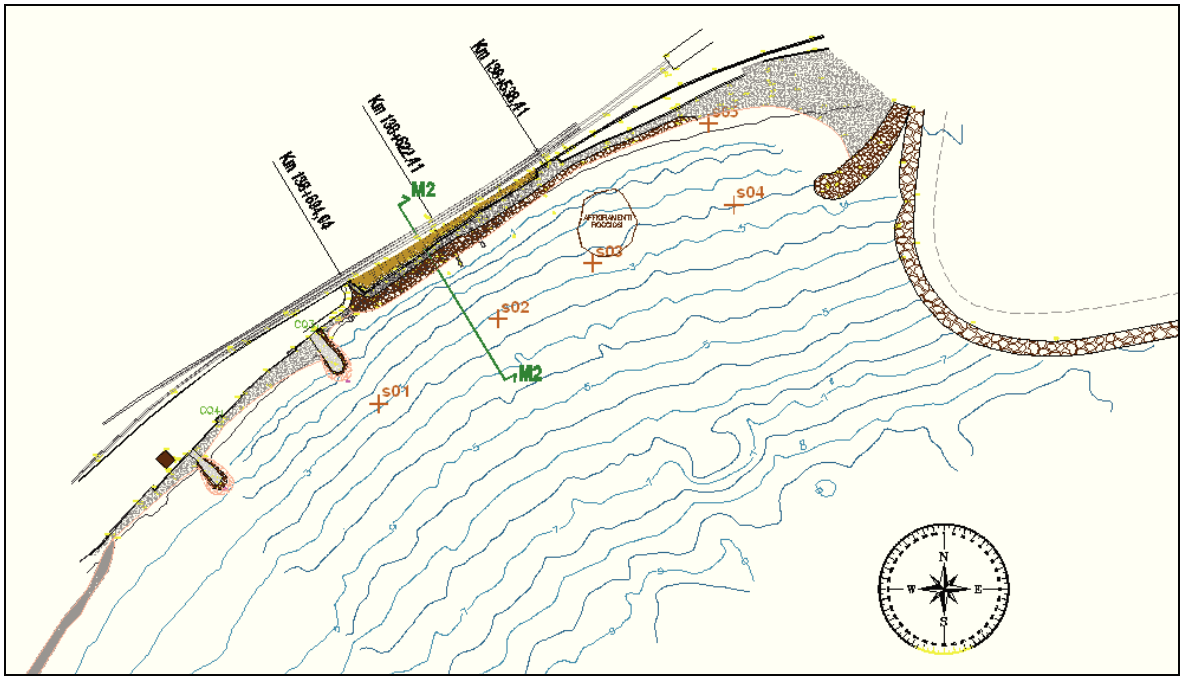


FIG. 2.3 – PLANIMETRIA STATO ATTUALE E PUNTI DI CAMPIONAMENTO DEI SEDIMENTI

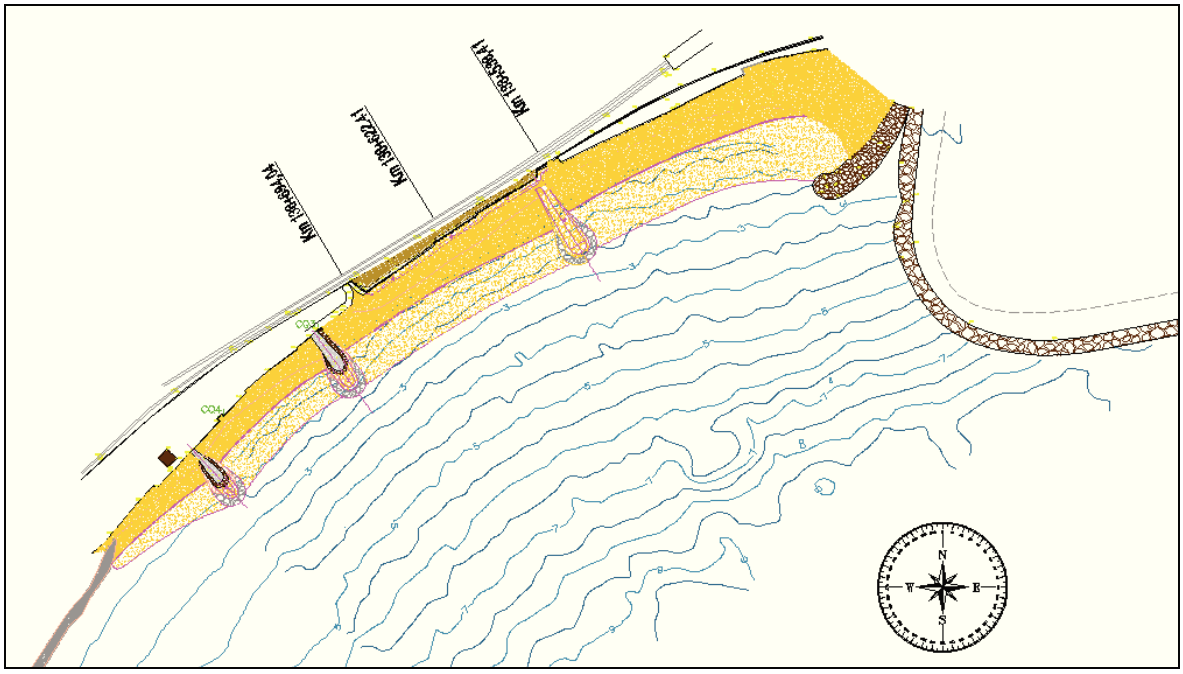


FIG. 2.4 – PLANIMETRIA DI PROGETTO

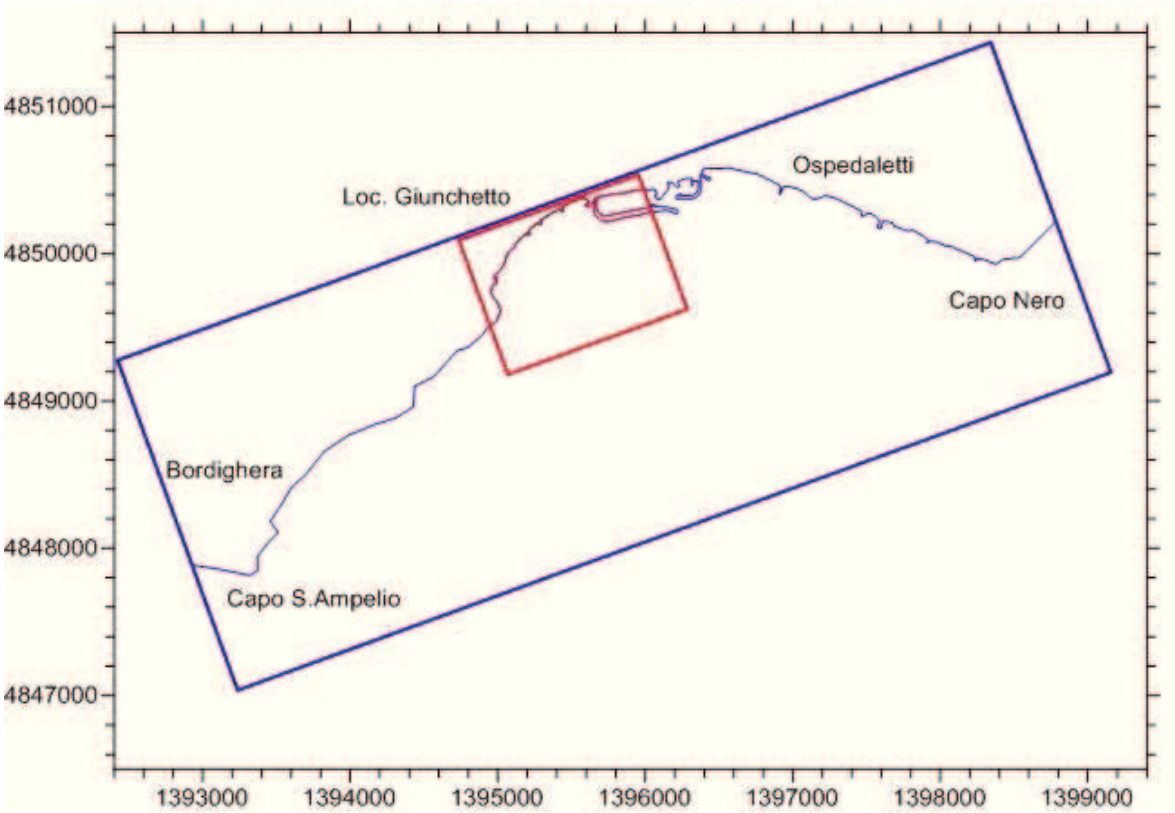


FIG. 5.1 – SCHEMA GRIGLIE DI CALCOLO INNESTATE

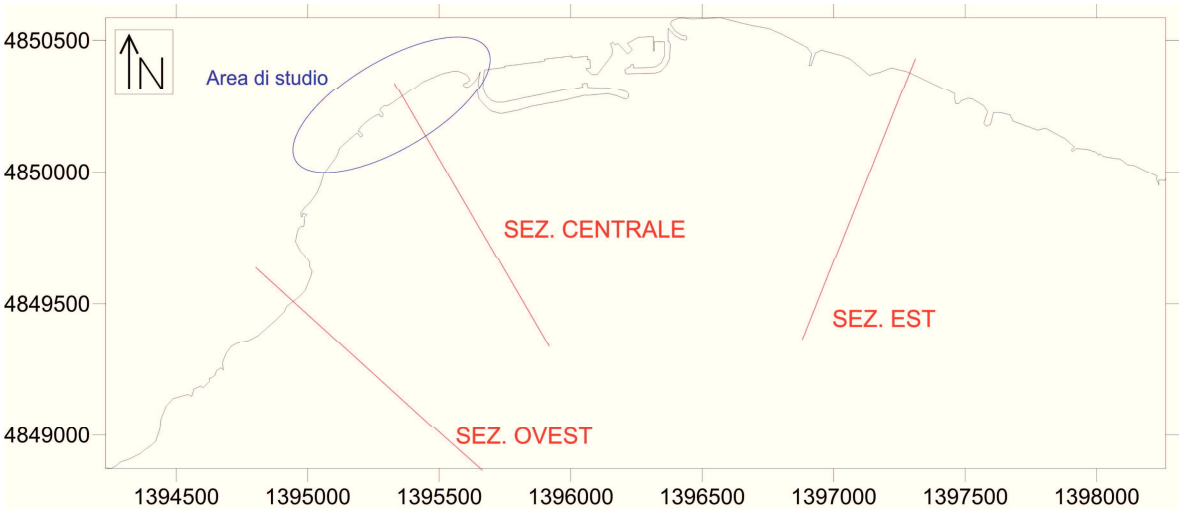


FIG. 6.1 – SEZIONI DI CALCOLO DEL TRASPORTO SEDIMENTARIO COL MODELLO TRALIT

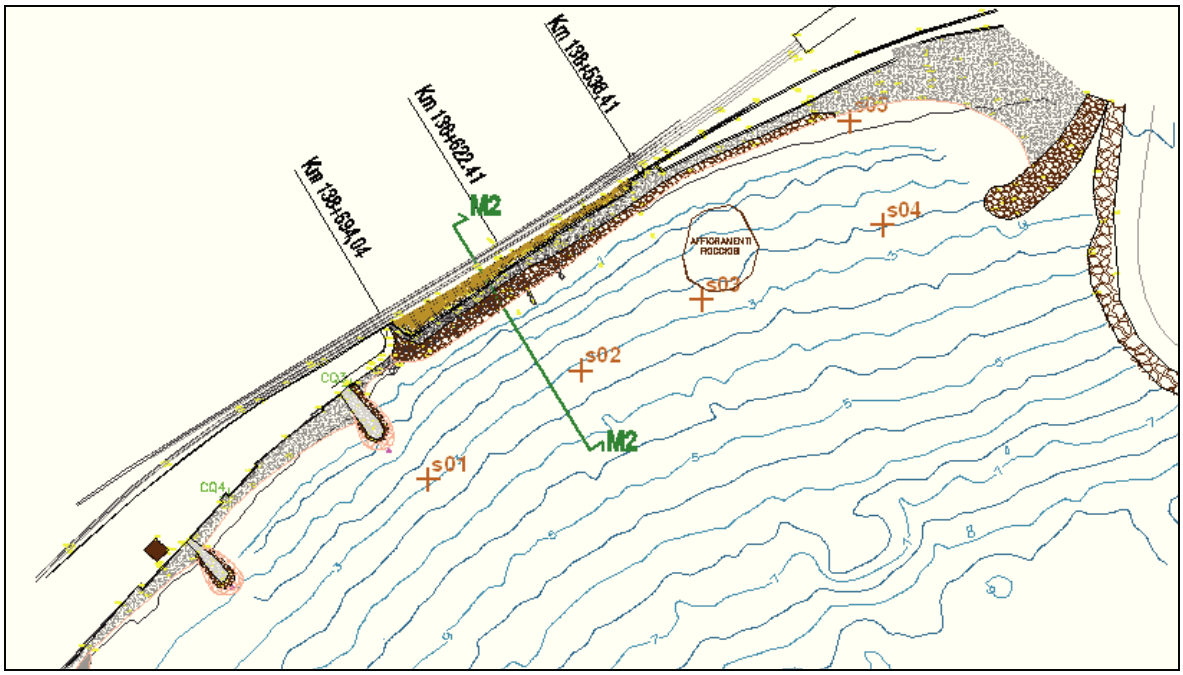


FIG. 6.2 – SEZIONE DI CALCOLO UTILIZZATA COL MODELLO SBEACH

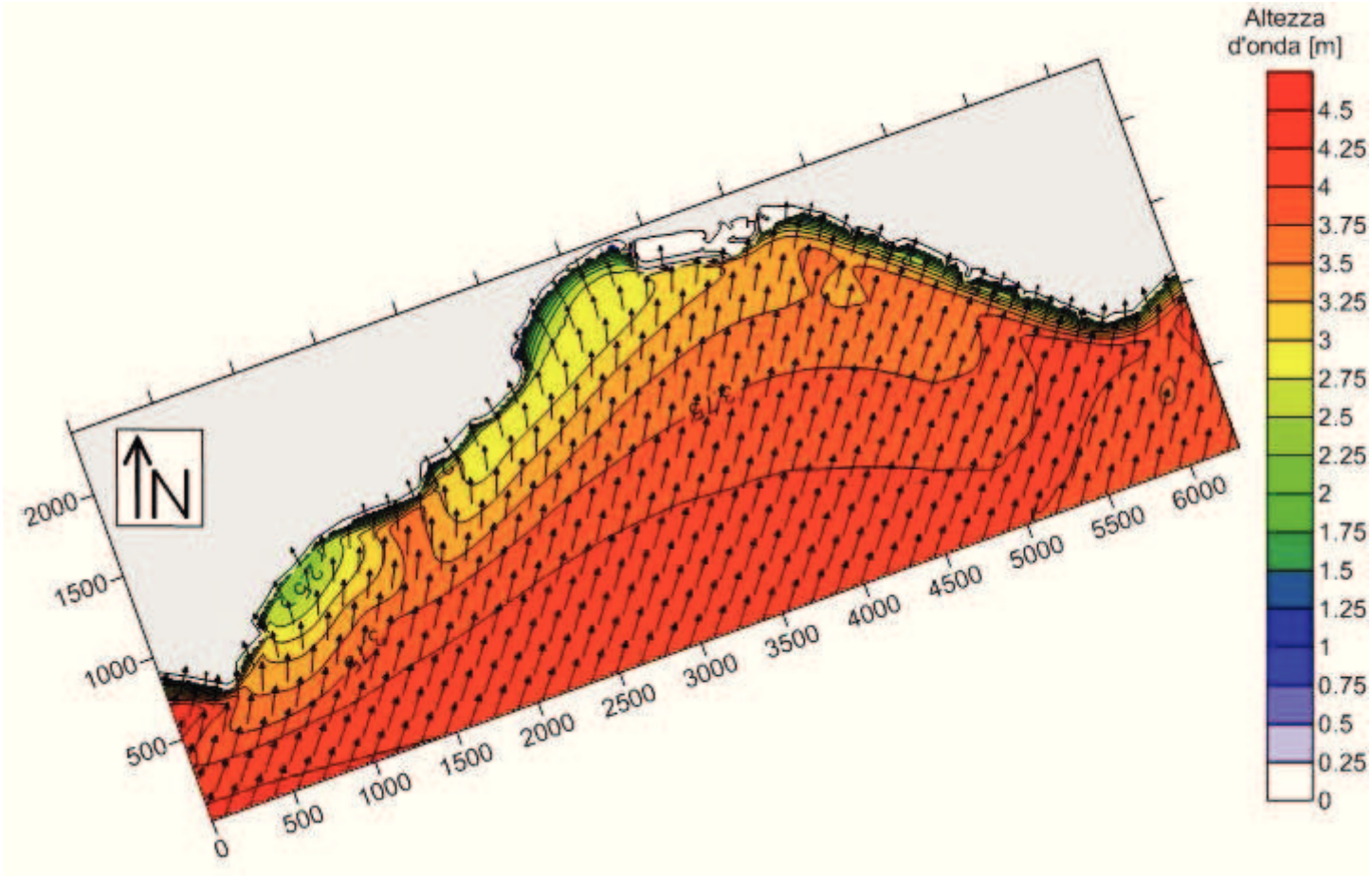


FIG. 7.1 – ESEMPIO CAMPO DI MOTO ONDOSO SU SCHEMA GRANDE: CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

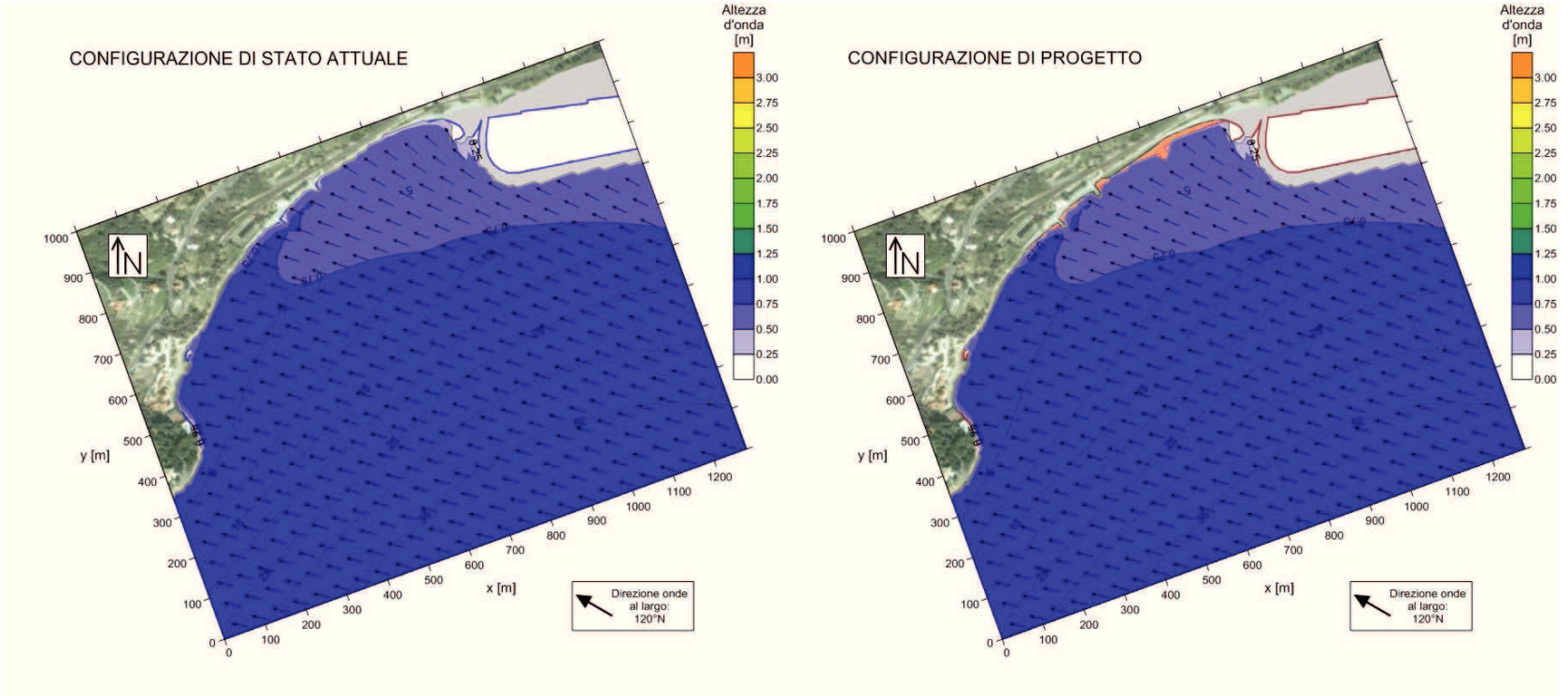


FIG. 7.2 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.0 m, DIR= 120°N

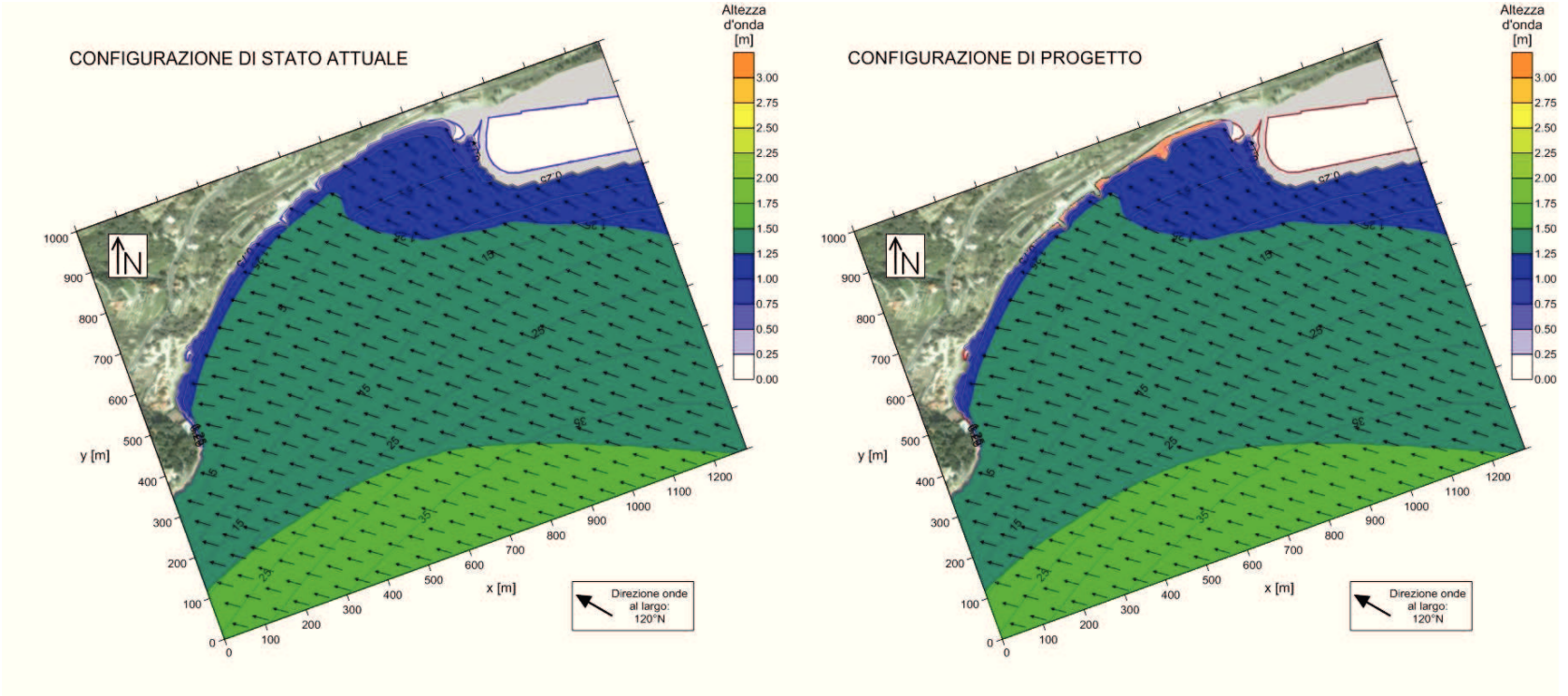


FIG. 7.3 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.8 m, DIR= 120°N

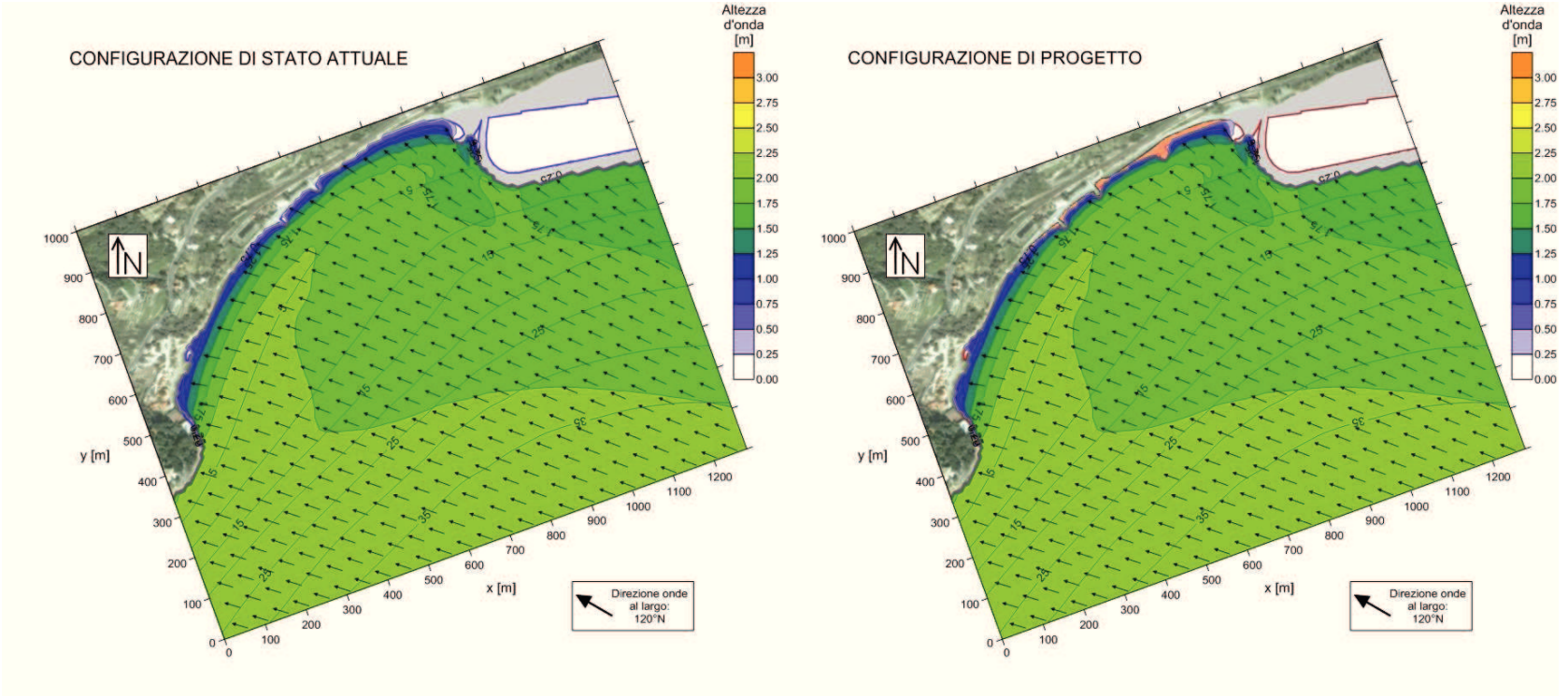


FIG. 7.4 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 2.3 m, DIR= 120°N

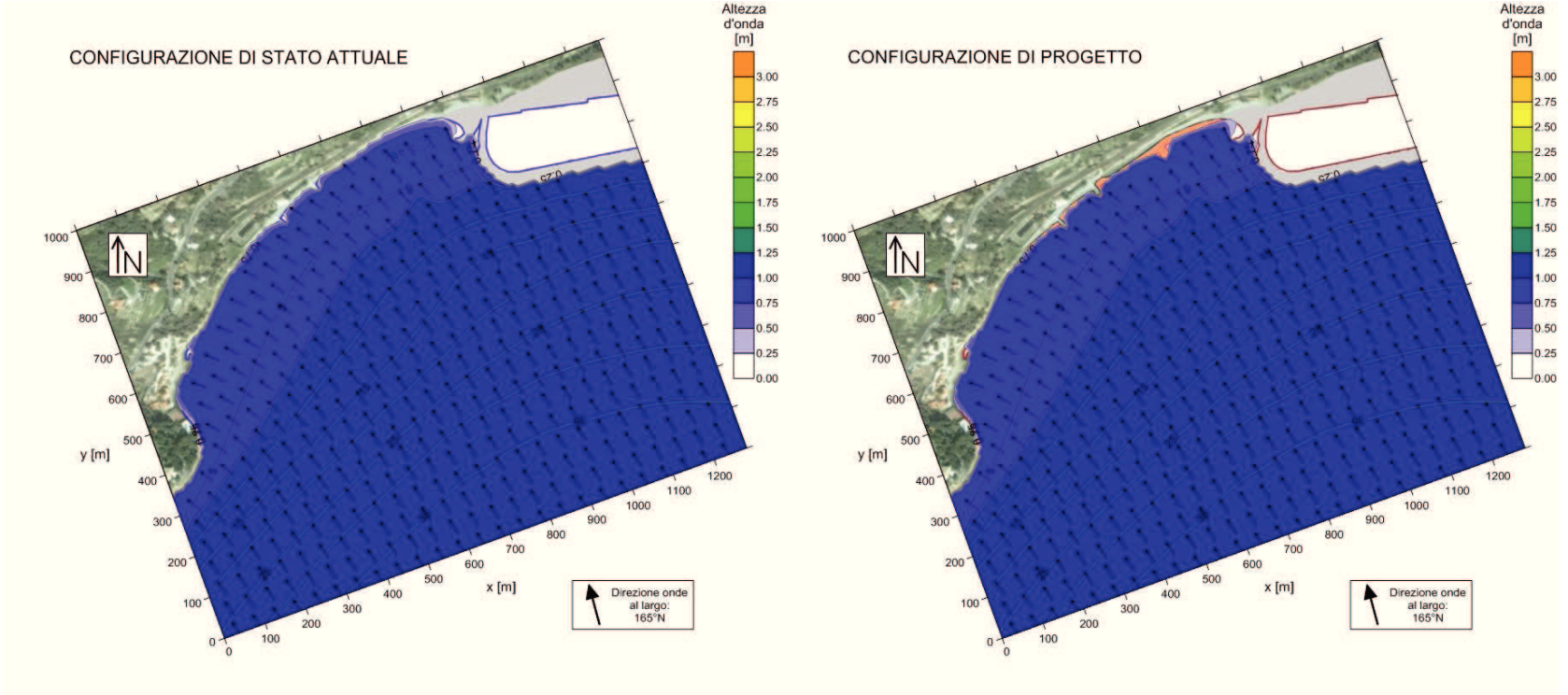


FIG. 7.5 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.3 m, DIR= 165°N

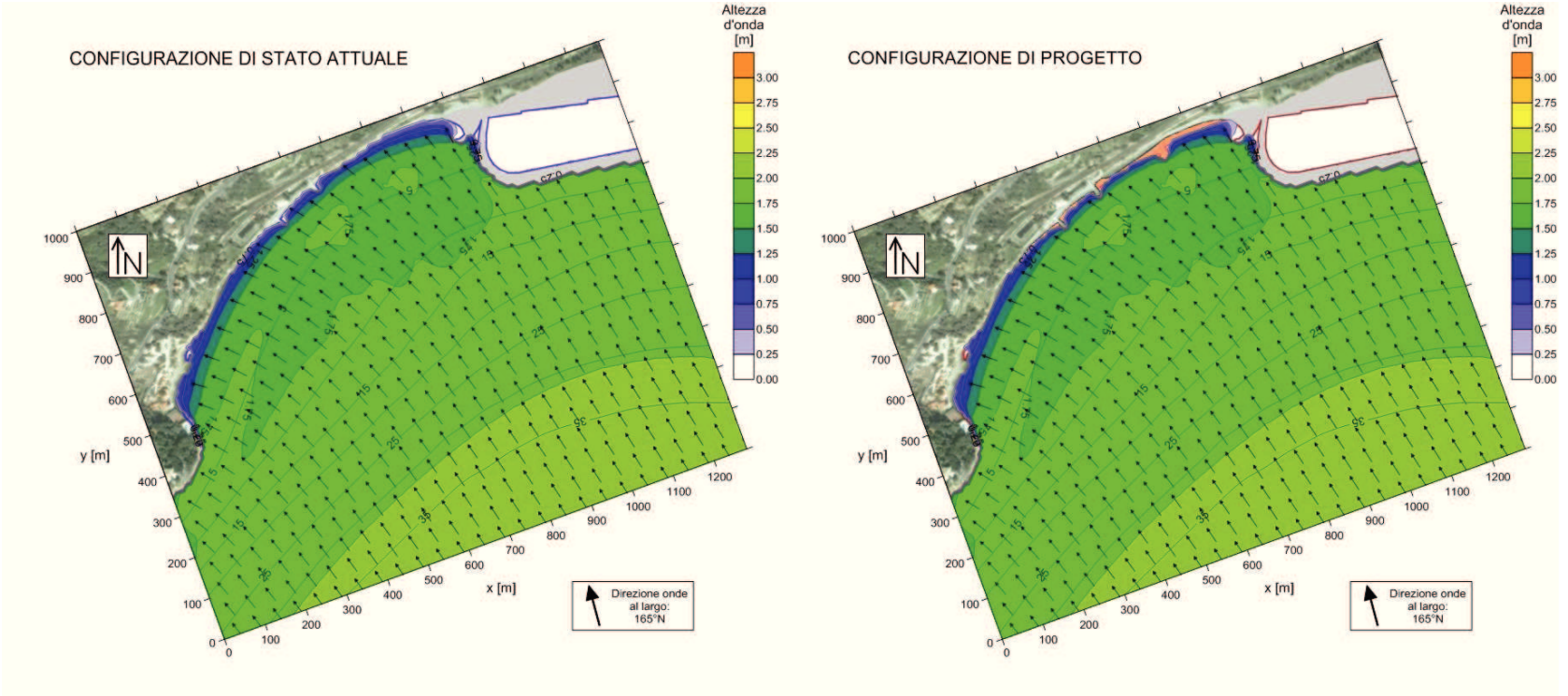


FIG. 7.6 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 2.3 m, DIR= 165°N

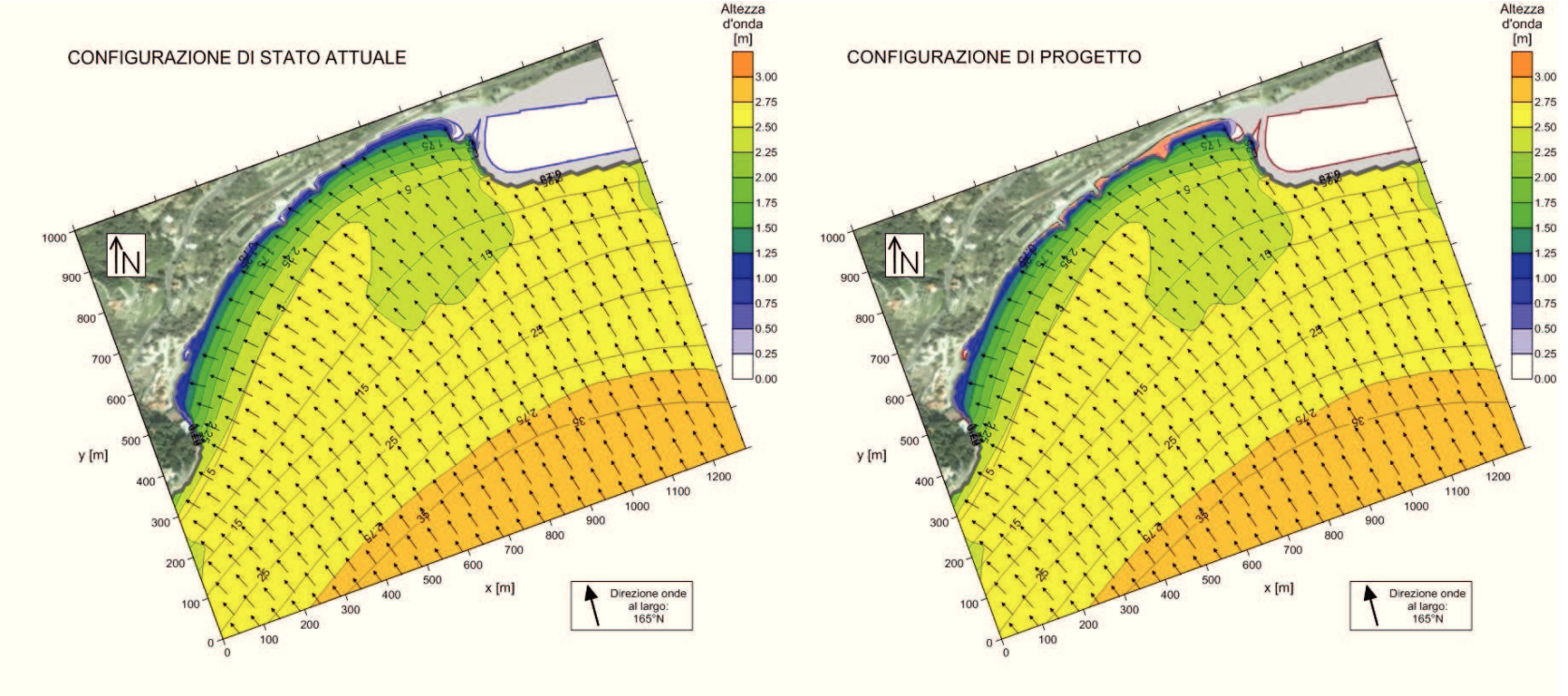


FIG. 7.7 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 3.3 m, DIR= 165°N

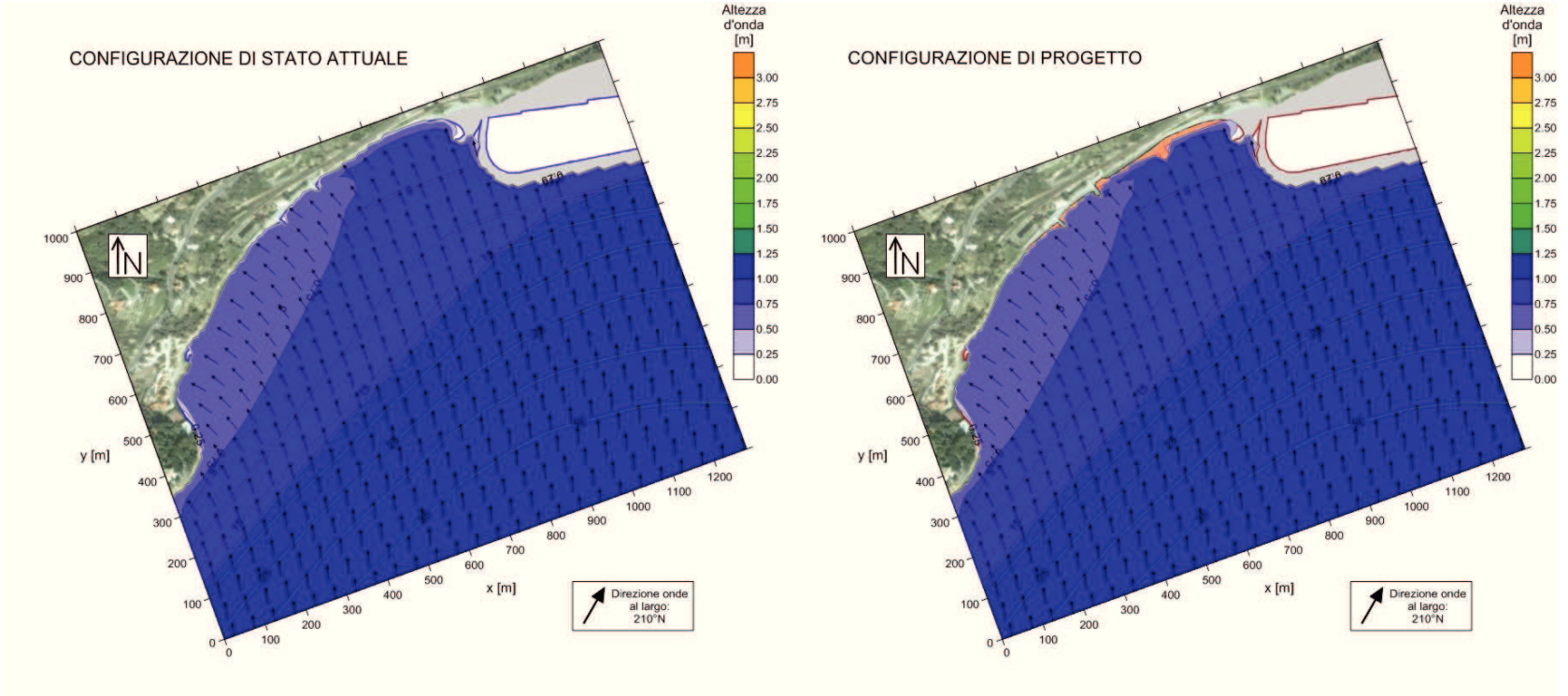


FIG. 7.8 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 1.3 m, DIR= 210°N

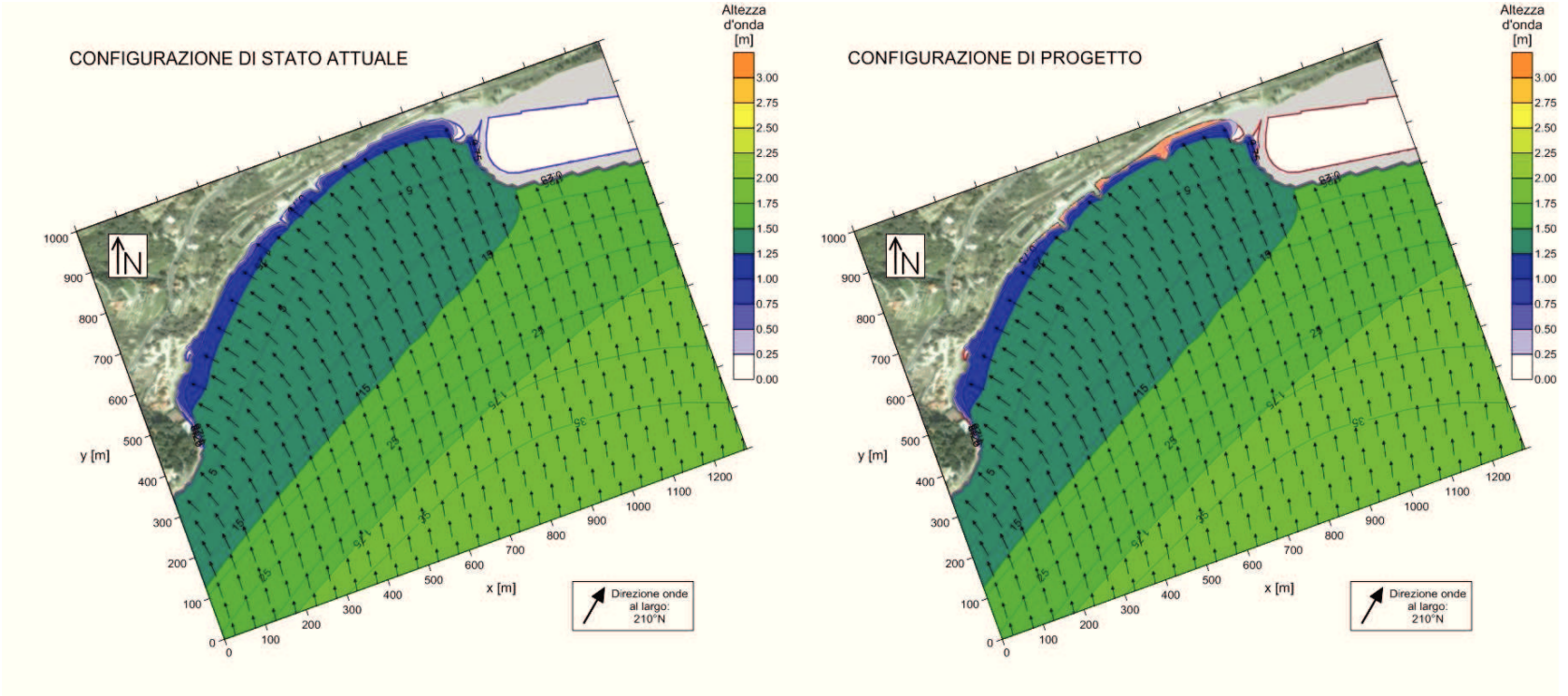


FIG. 7.9 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 2.2 m, DIR= 210°N

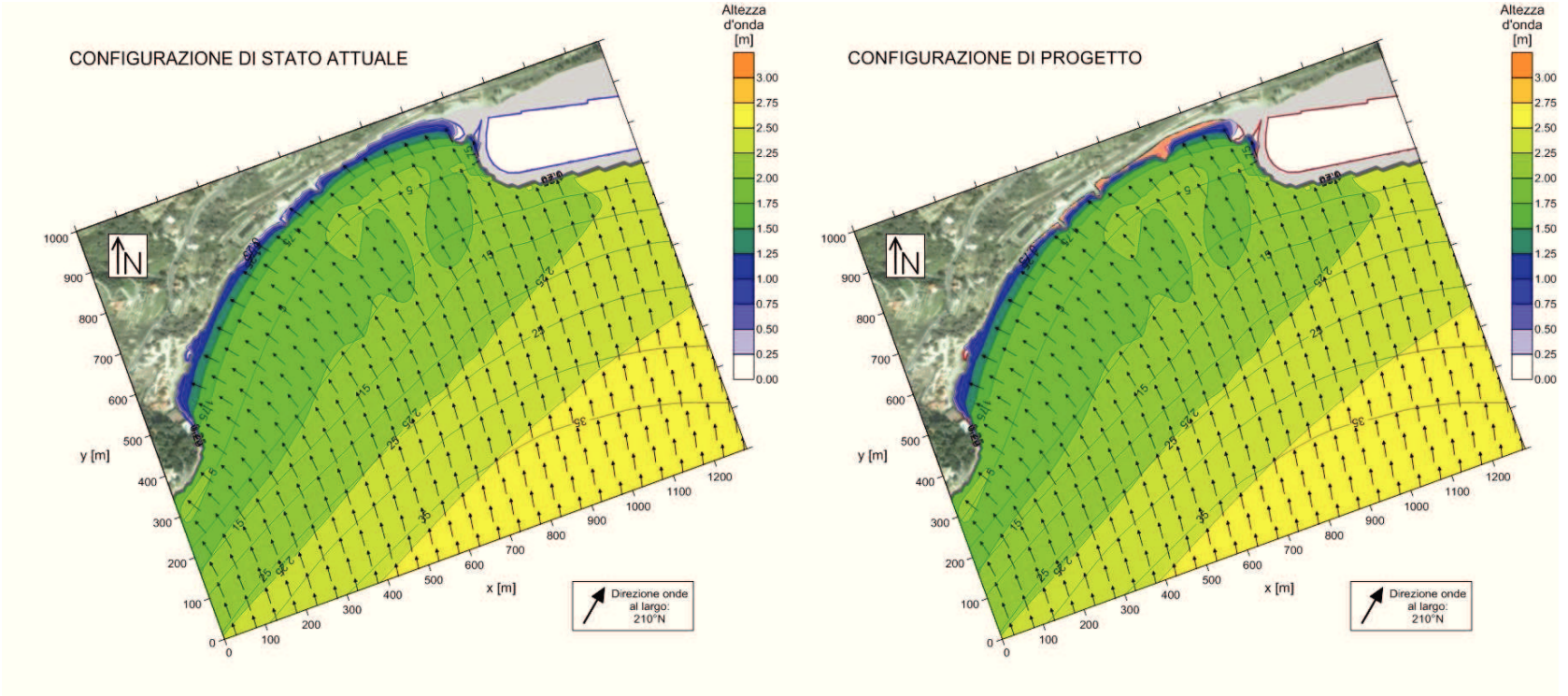


FIG. 7.10 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 3.2 m, DIR= 210°N

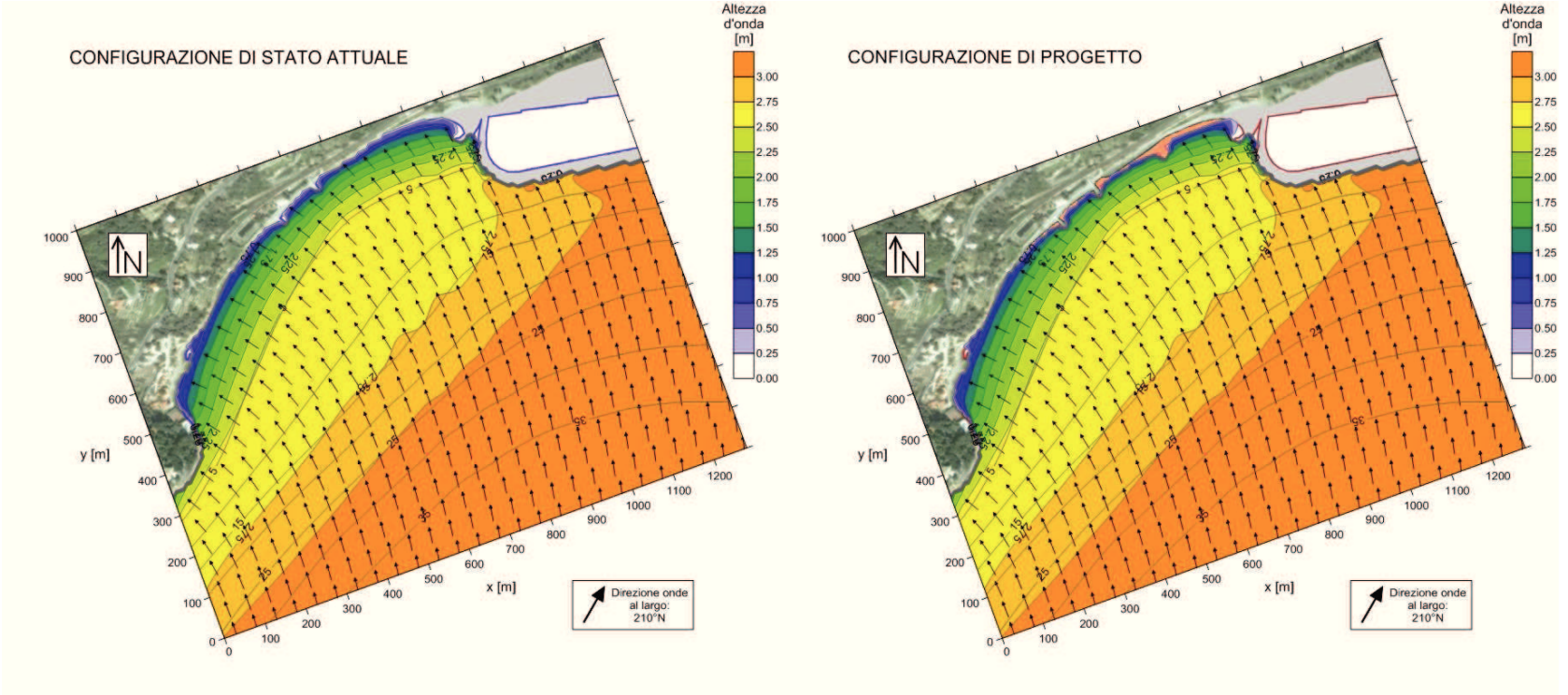


FIG. 7.11 – CAMPO DI MOTO ONDOSO DI DETTAGLIO: Hs= 4.2 m, DIR= 210°N

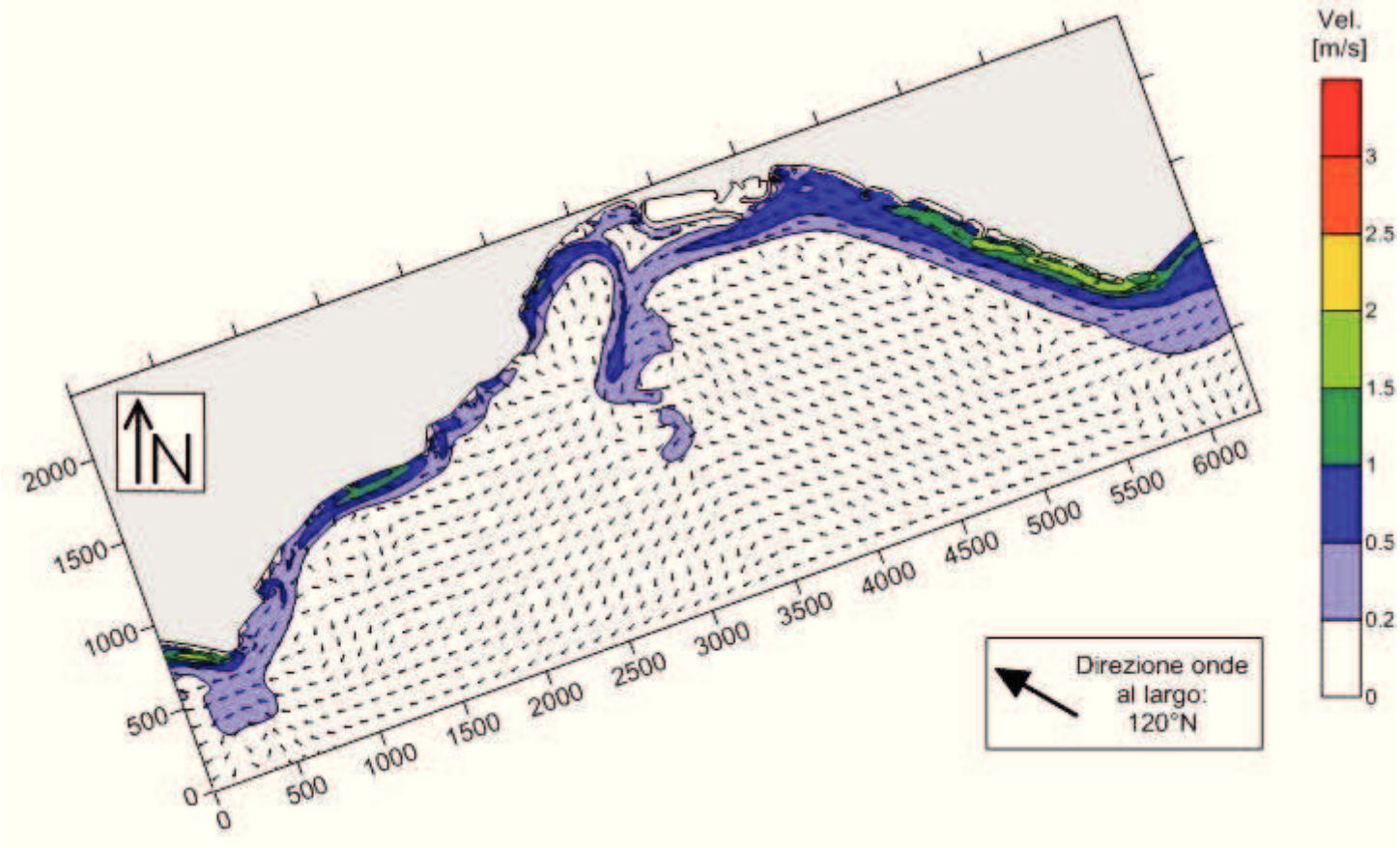


FIG. 8.1 – CAMPO IDRODINAMICO AL CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

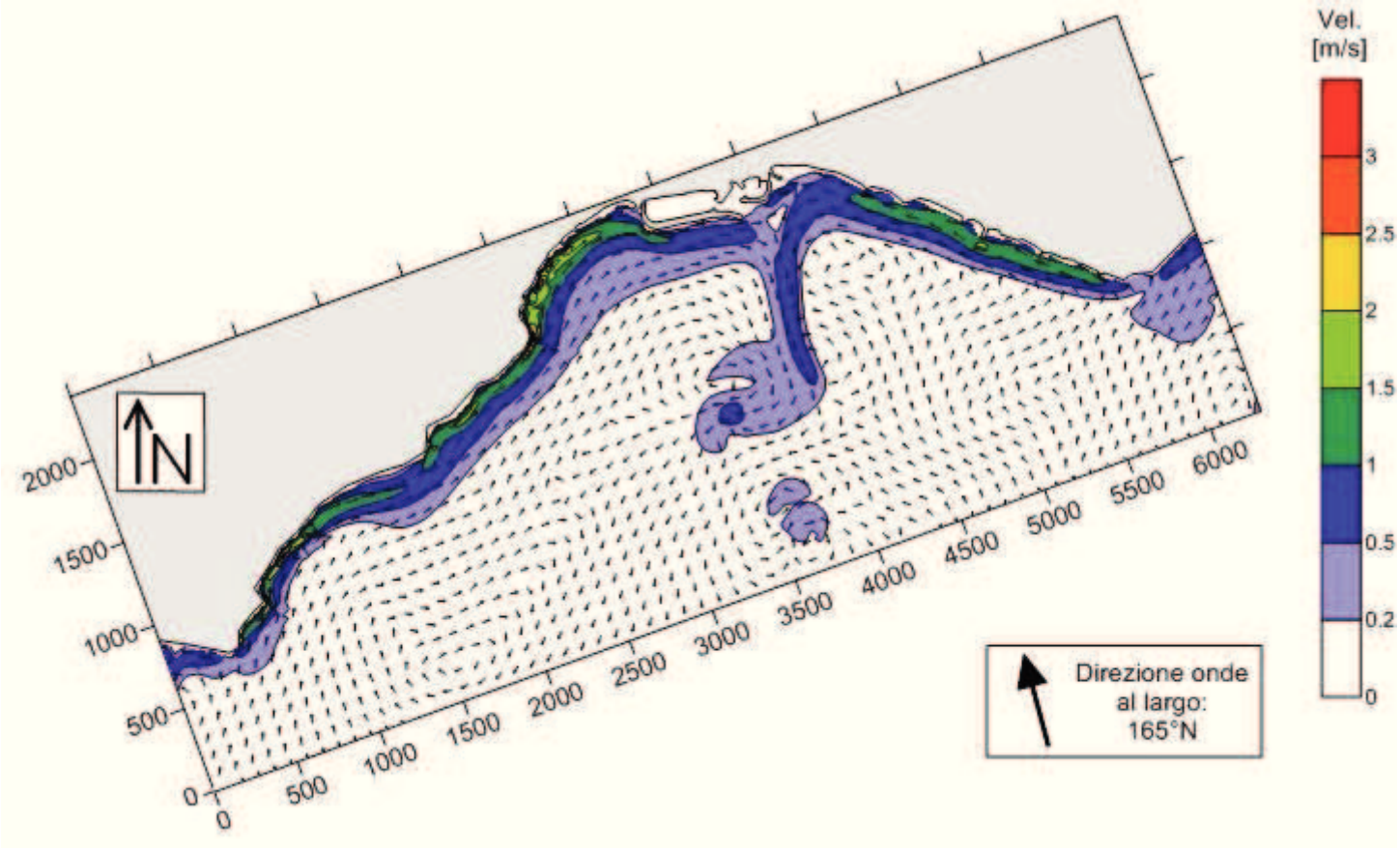


FIG. 8.2 – CAMPO IDRODINAMICO AL CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

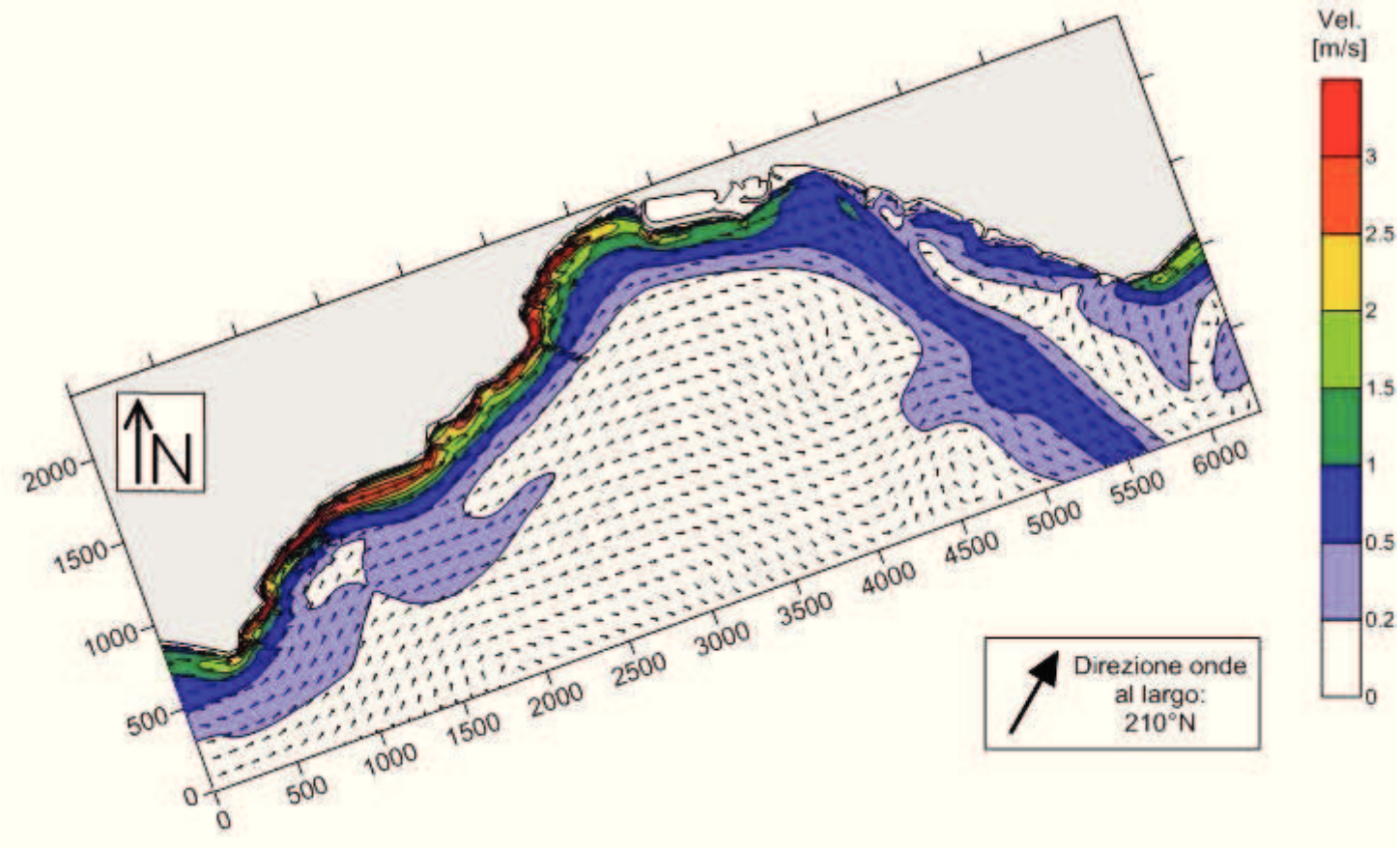


FIG. 8.3 – CAMPO IDRODINAMICO AL CULMINE DELLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

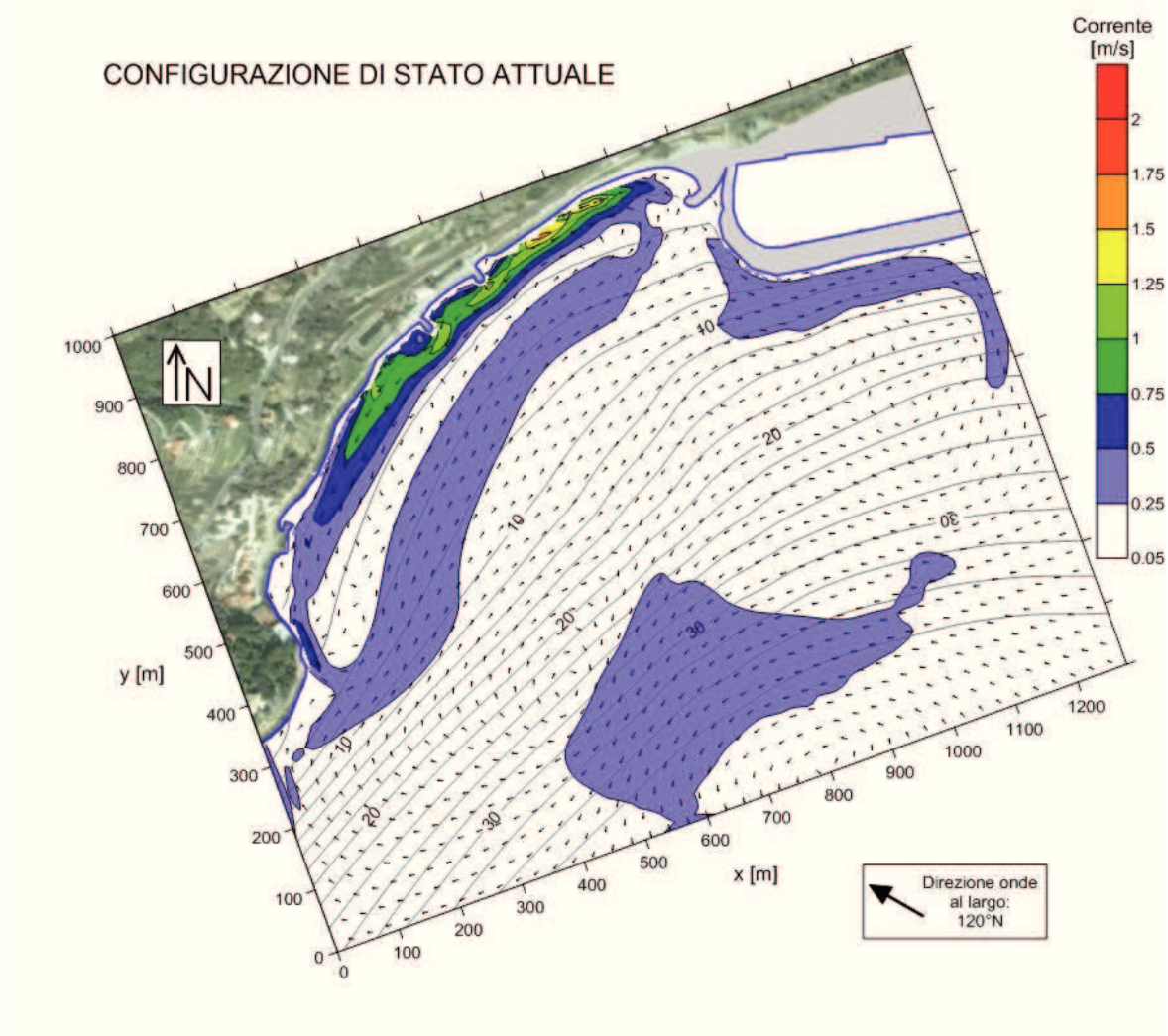


FIG. 8.4 – SITUAZIONE ATTUALE: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

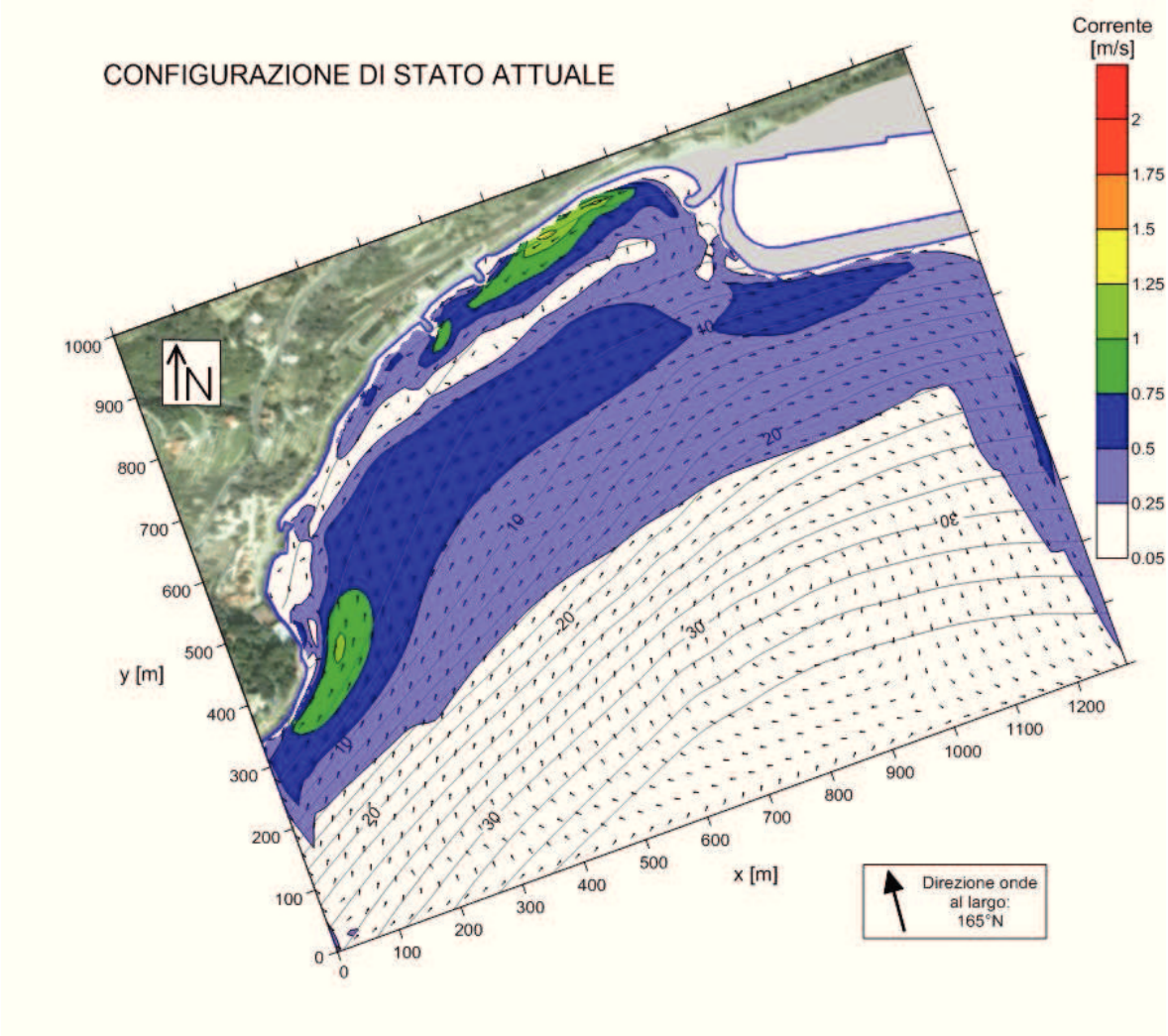


FIG. 8.5 – SITUAZIONE ATTUALE: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

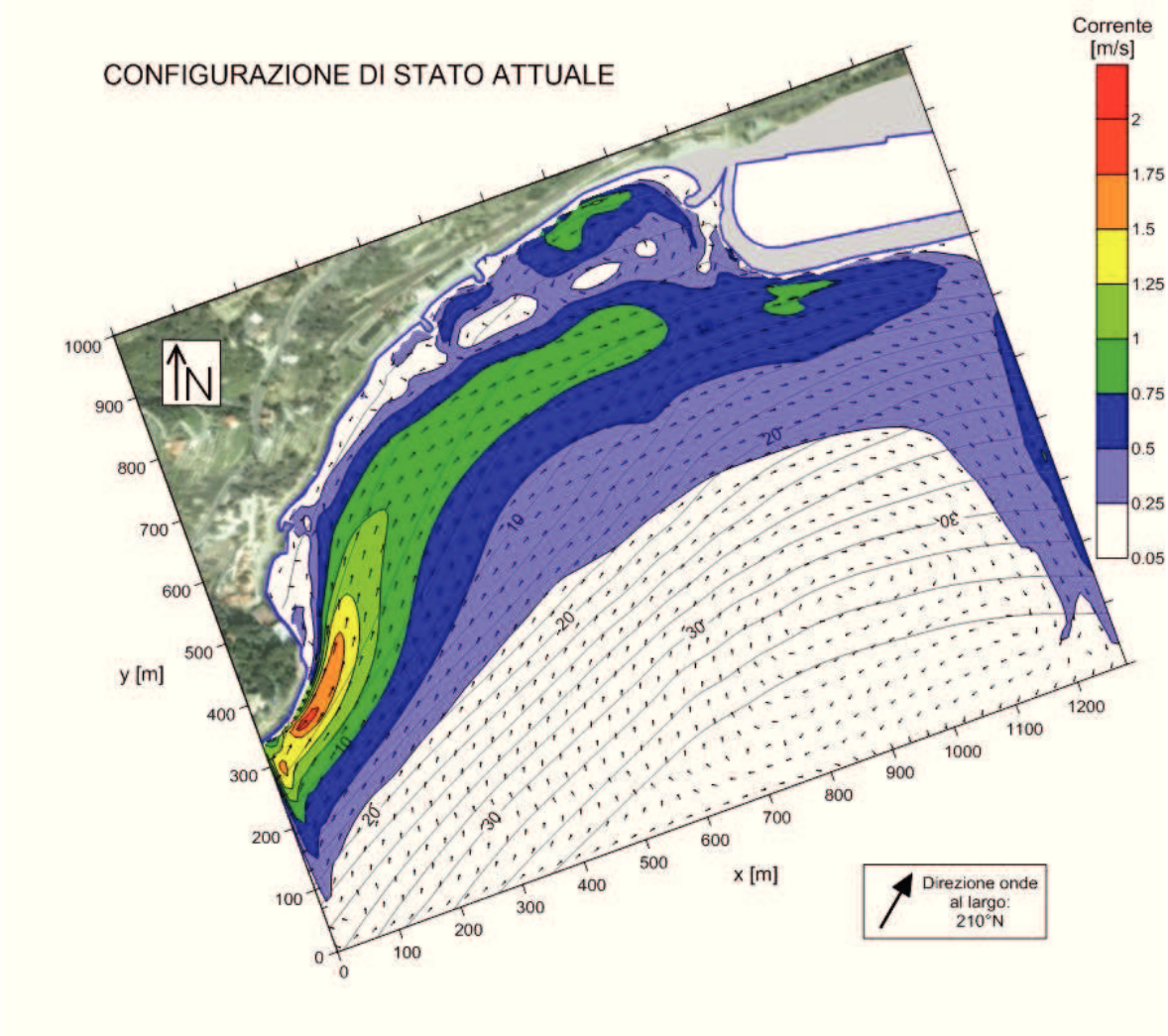


FIG. 8.6 – SITUAZIONE ATTUALE: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

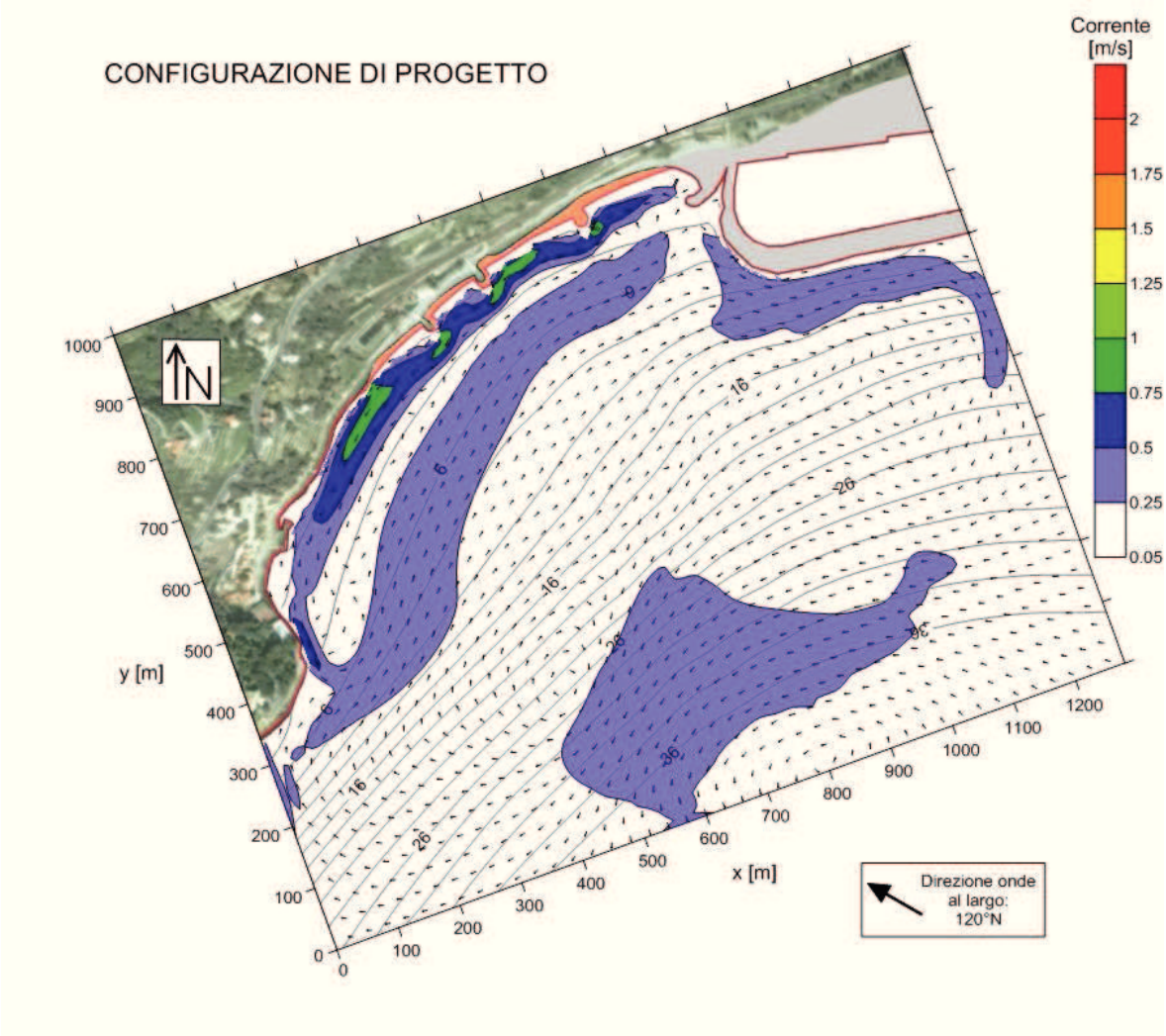


FIG. 8.7 – SITUAZIONE DI PROGETTO: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

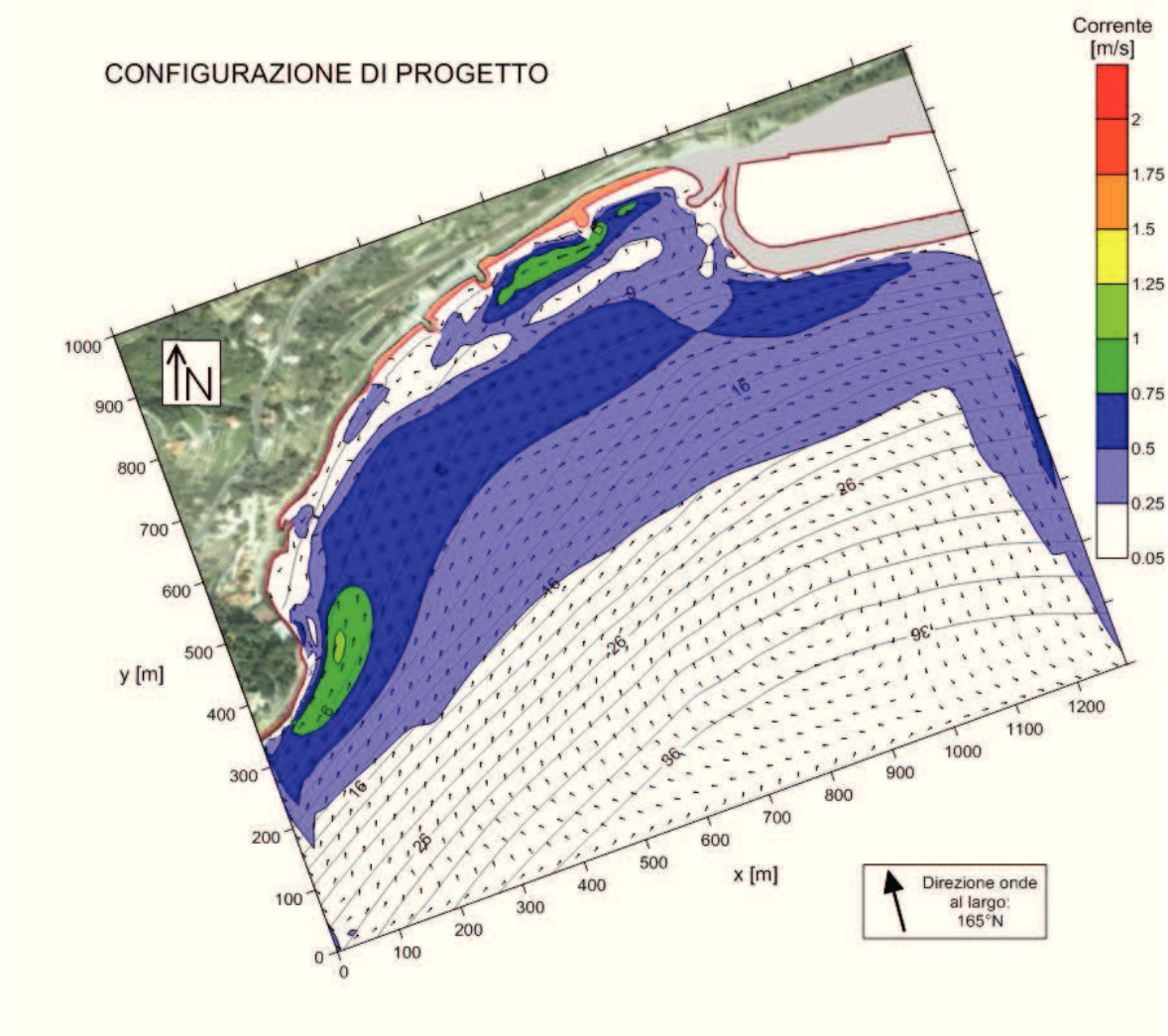


FIG. 8.8 – SITUAZIONE DI PROGETTO: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

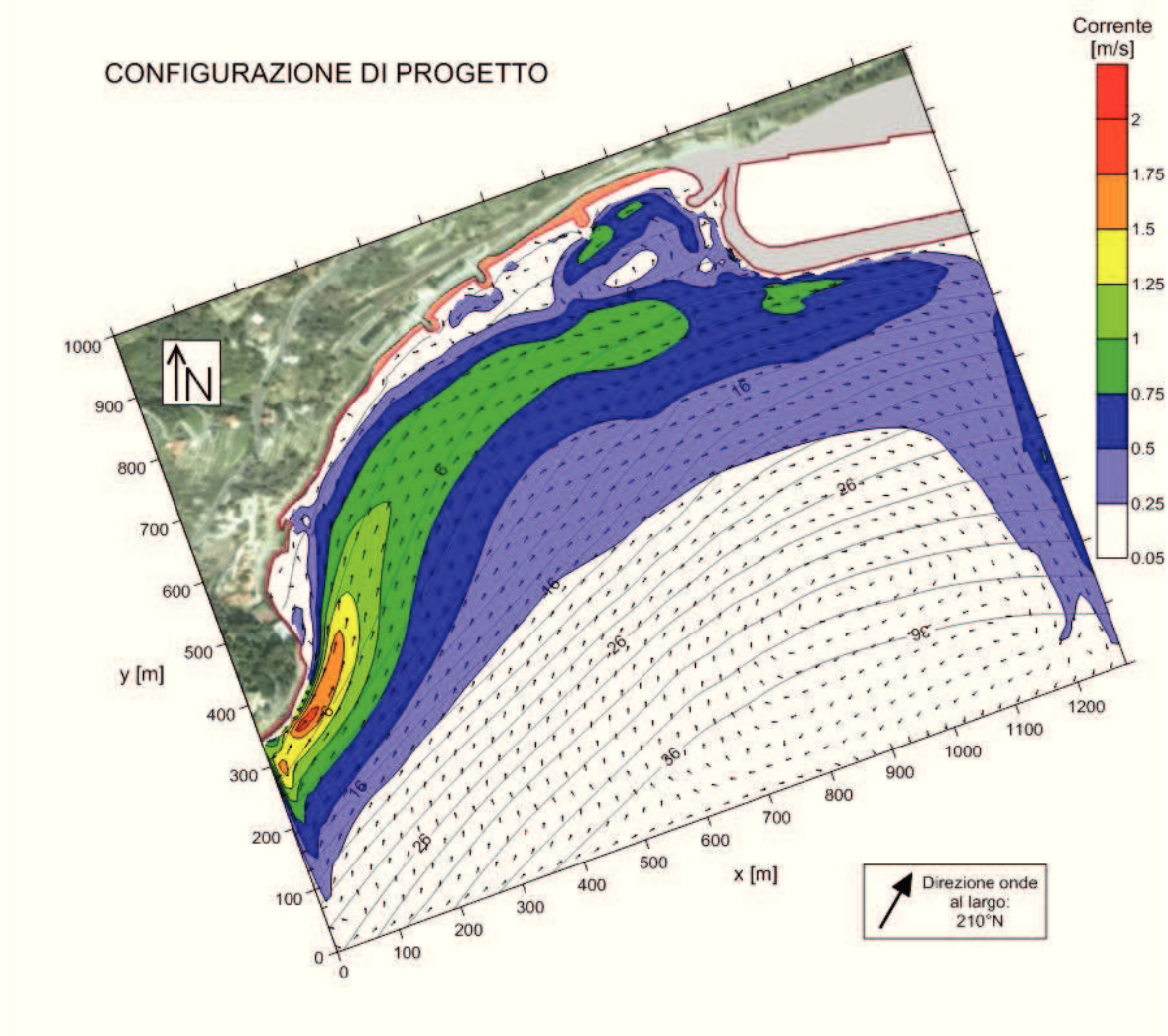


FIG. 8.9 – SITUAZIONE DI PROGETTO: CAMPO IDRODINAMICO, MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

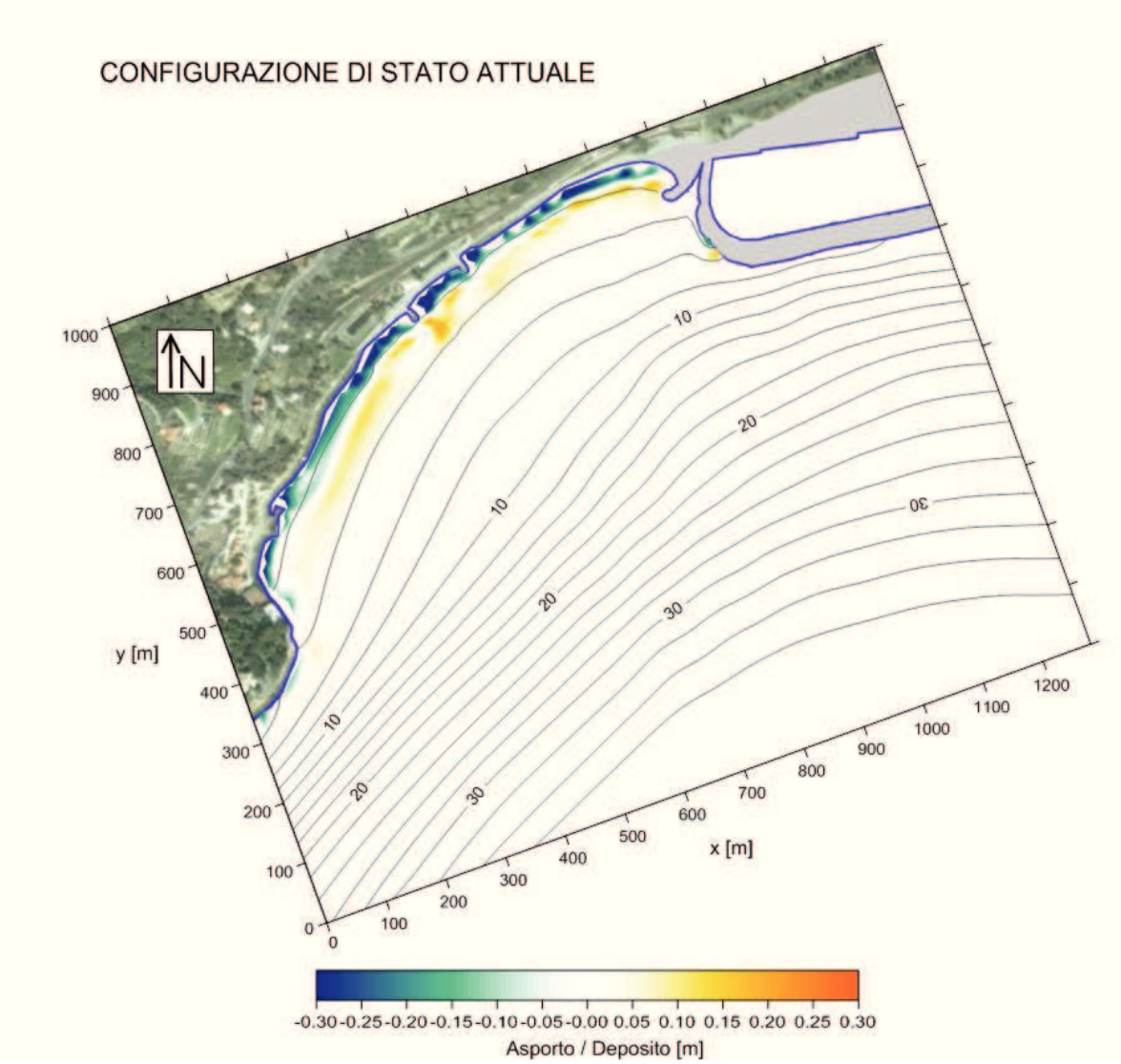


FIG. 9.1 – SITUAZIONE ATTUALE: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

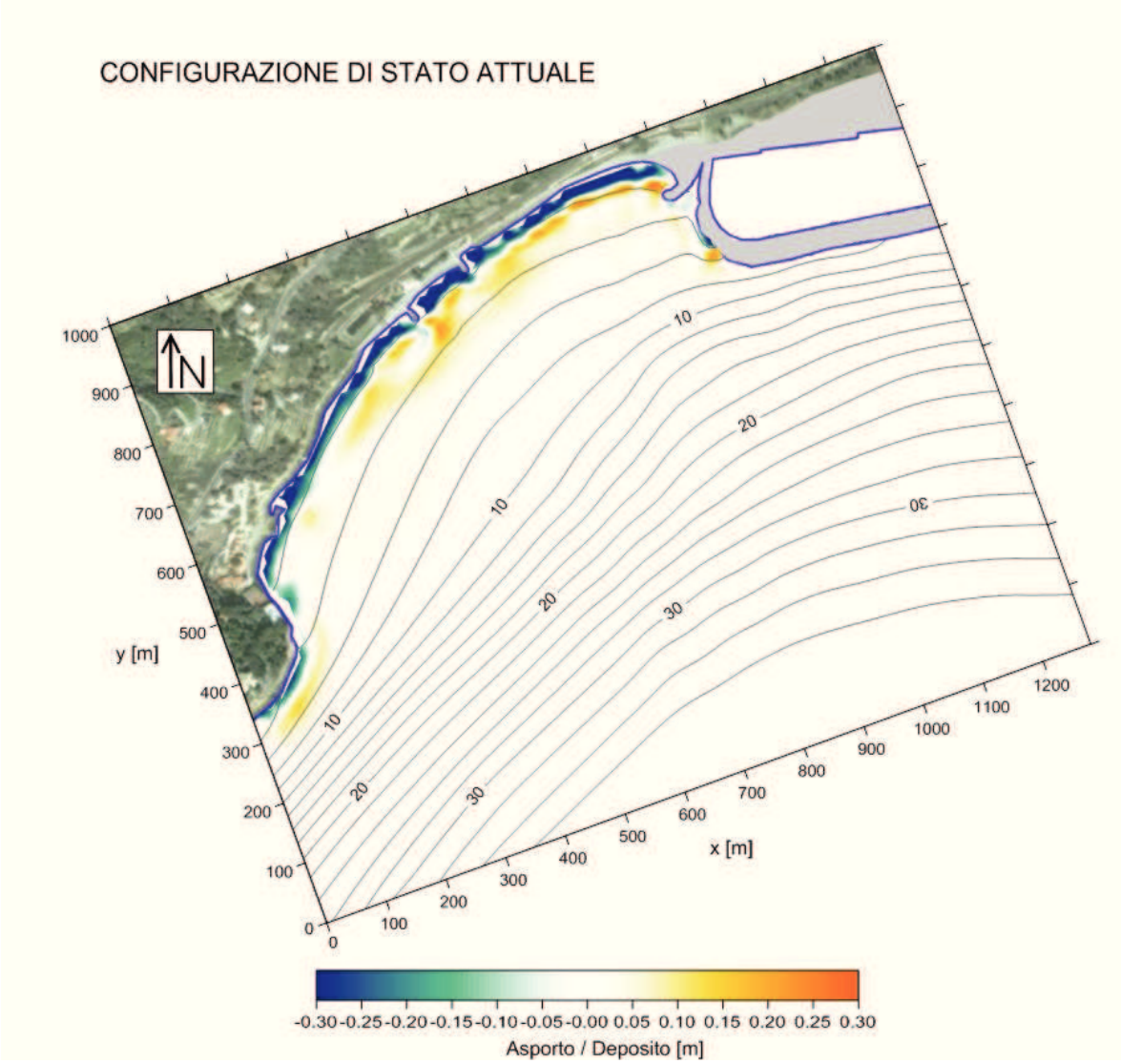


FIG. 9.2 – SITUAZIONE ATTUALE: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

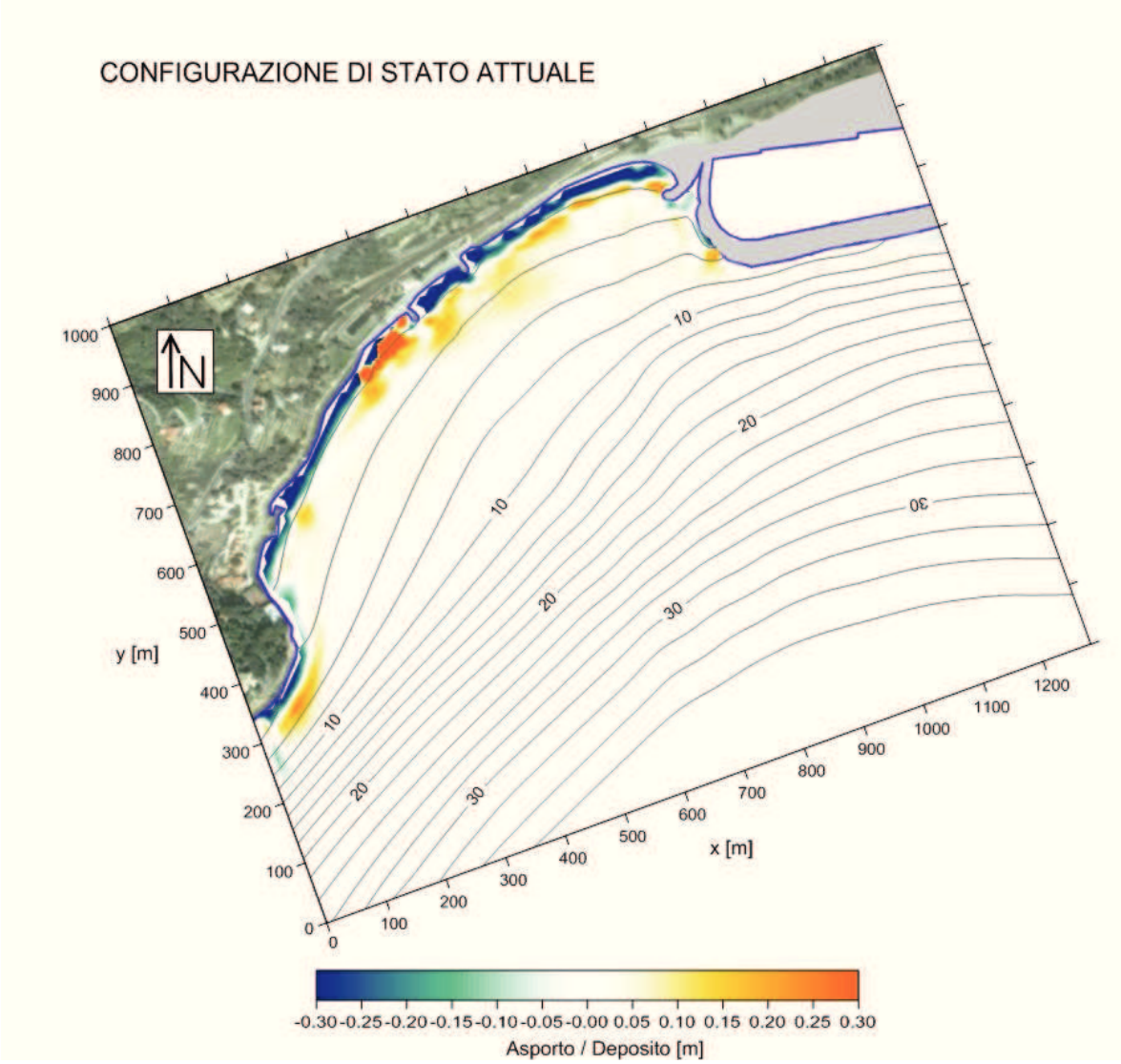


FIG. 9.3 – SITUAZIONE ATTUALE: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

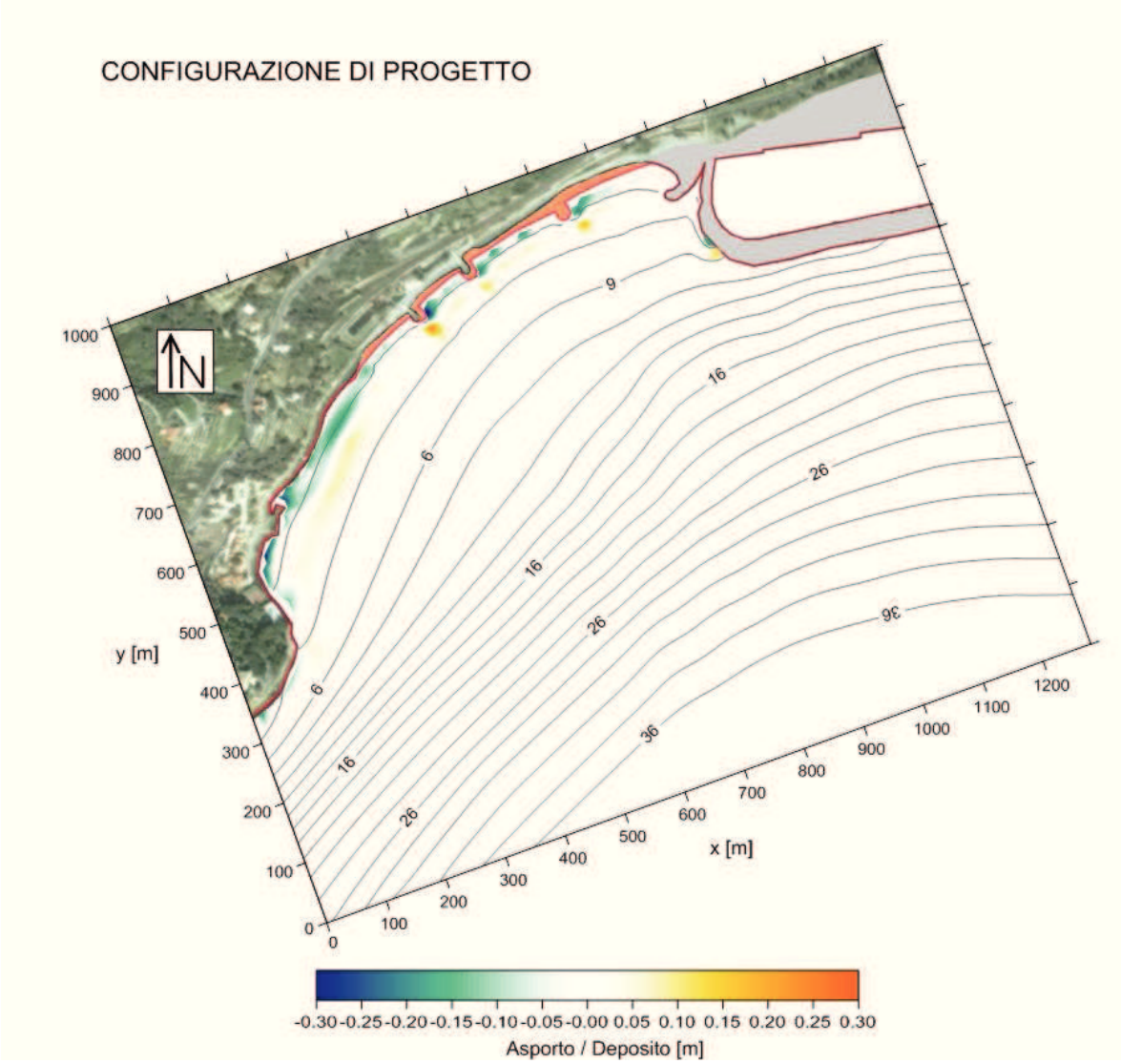


FIG. 9.4 – SITUAZIONE DI PROGETTO: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 120°N

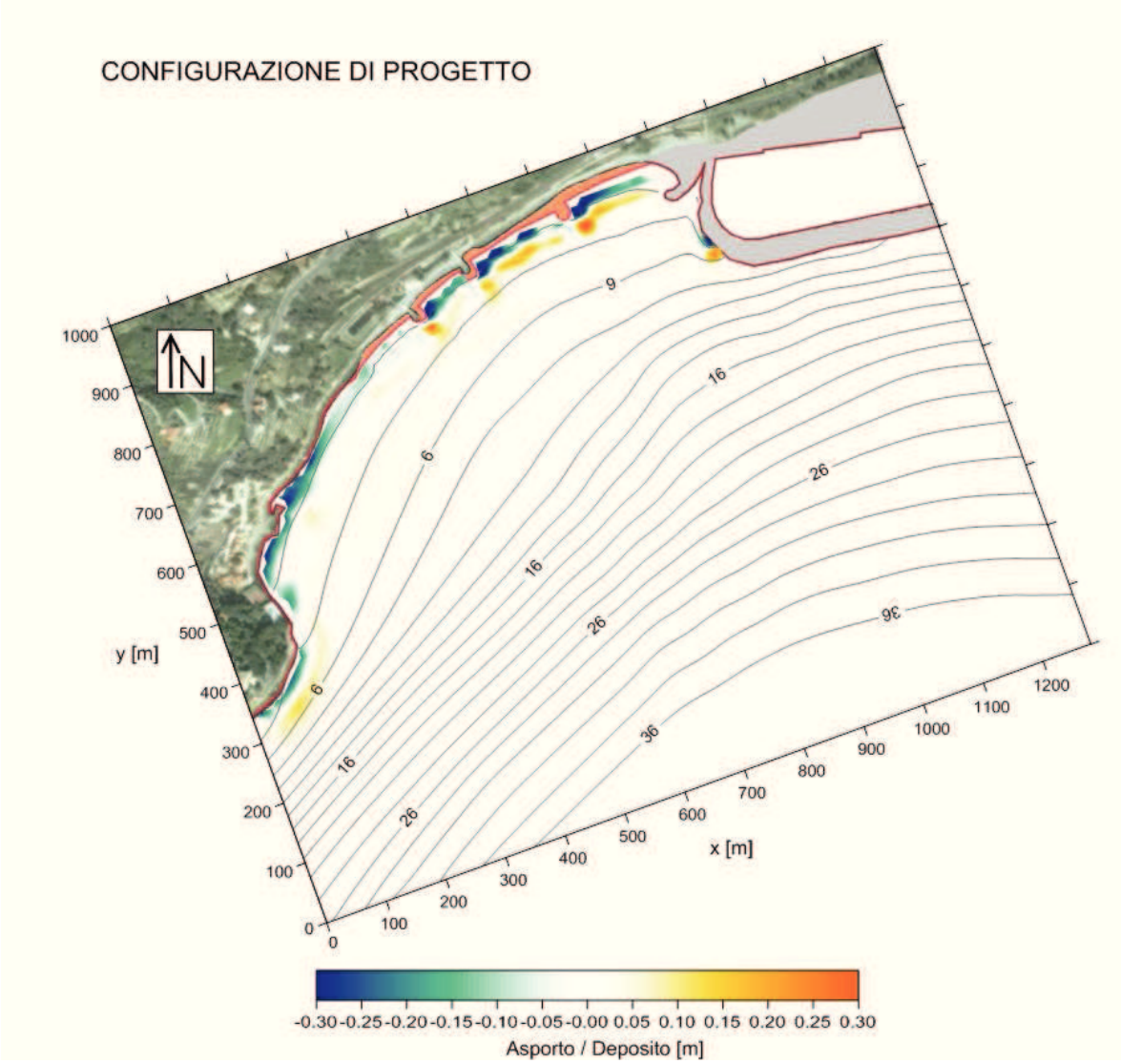


FIG. 9.5 – SITUAZIONE DI PROGETTO: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 165°N

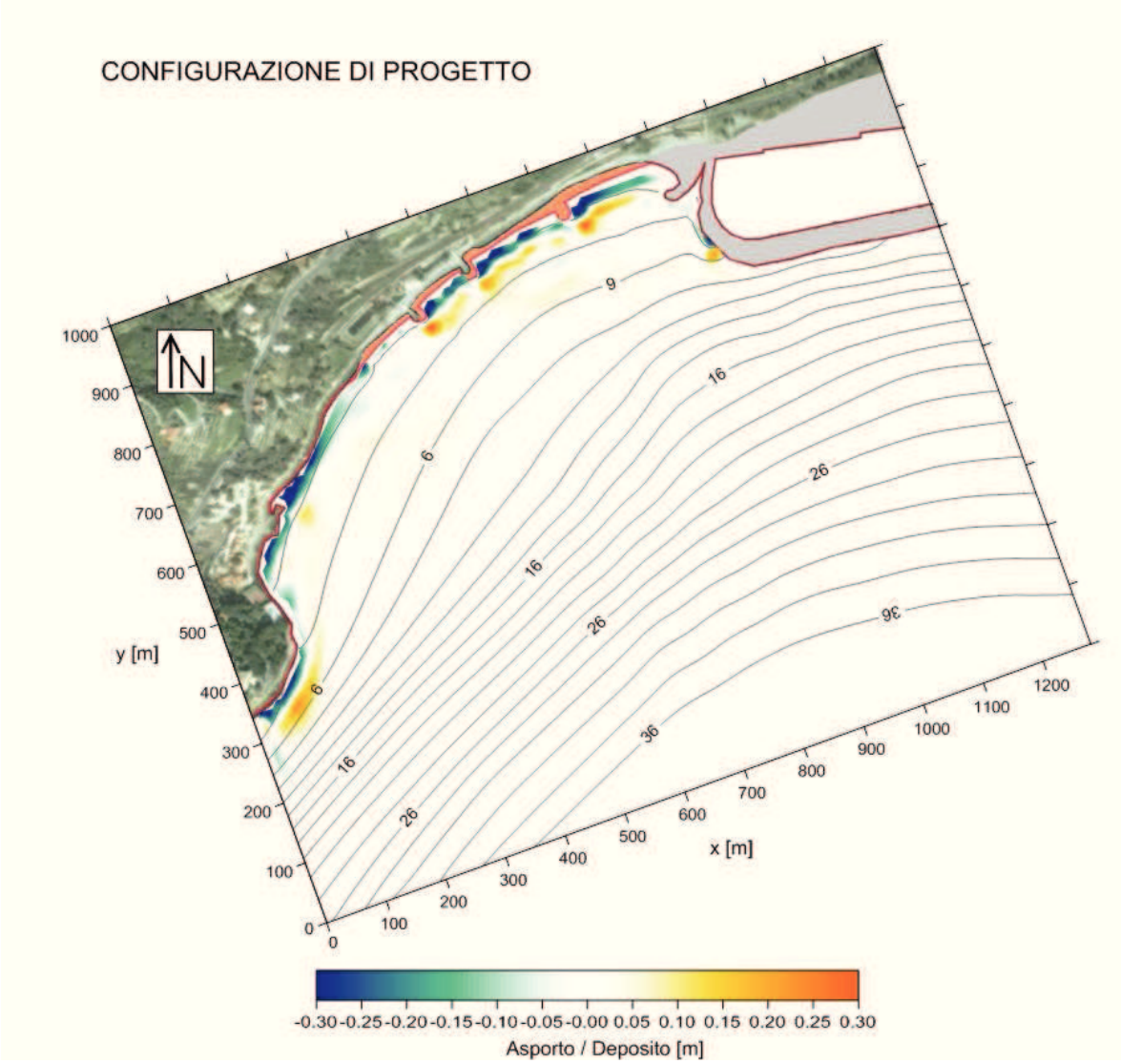


FIG. 9.6 – SITUAZIONE DI PROGETTO: VARIAZIONE DEI FONDALI INDOTTA DALLA MAREGGIATA PROVENIENTE DA 210°N

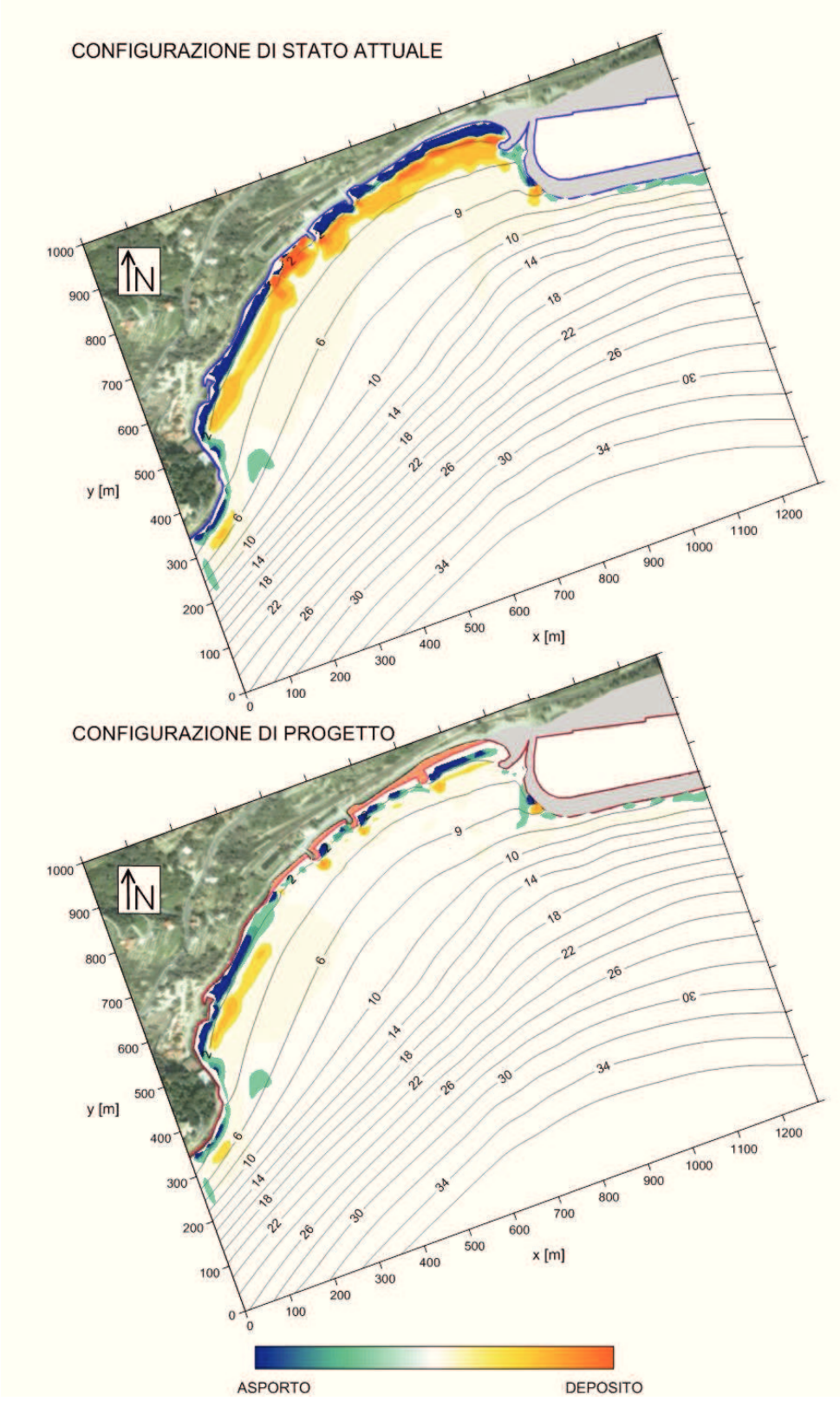


FIG. 9.7 – VARIAZIONE POTENZIALE MEDIA ANNUA DEI FONDALI

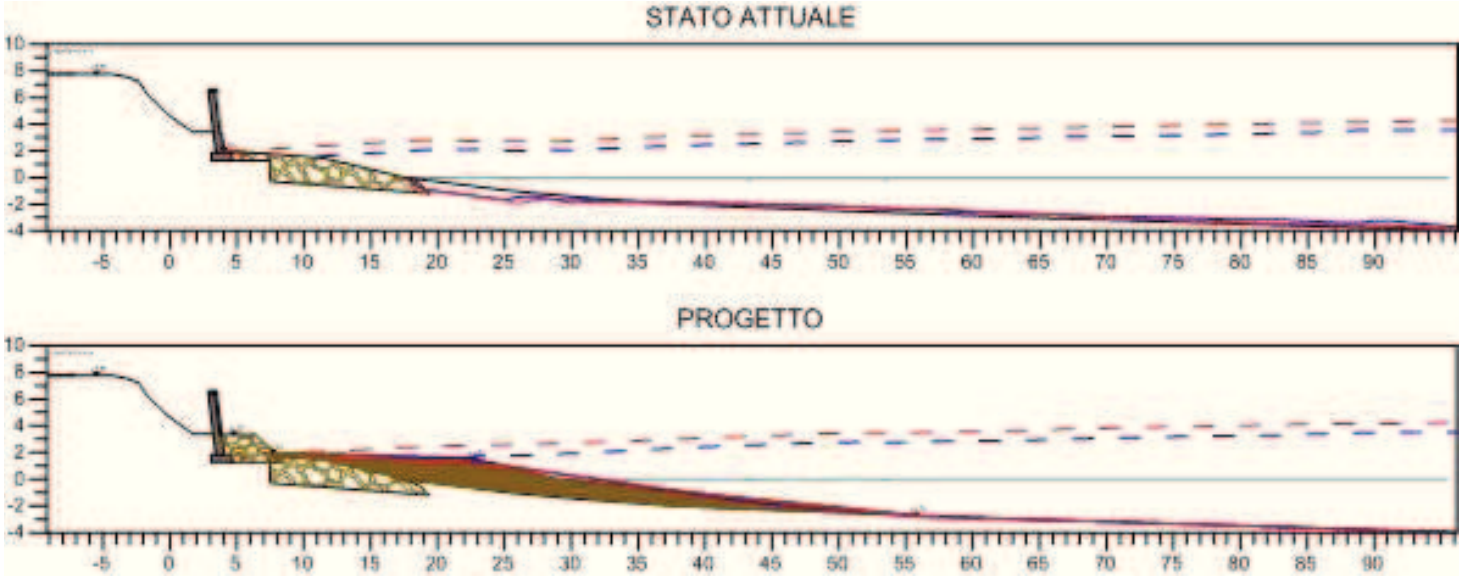


FIG. 9.8 – PROFILI DEL FONDALE E INVILUPPO DELL'ALTEZZA D'ONDA INDOTTI DALLA MAREGGIATA ANNUALE (linee blu) E DECENNALE (linee rosse)

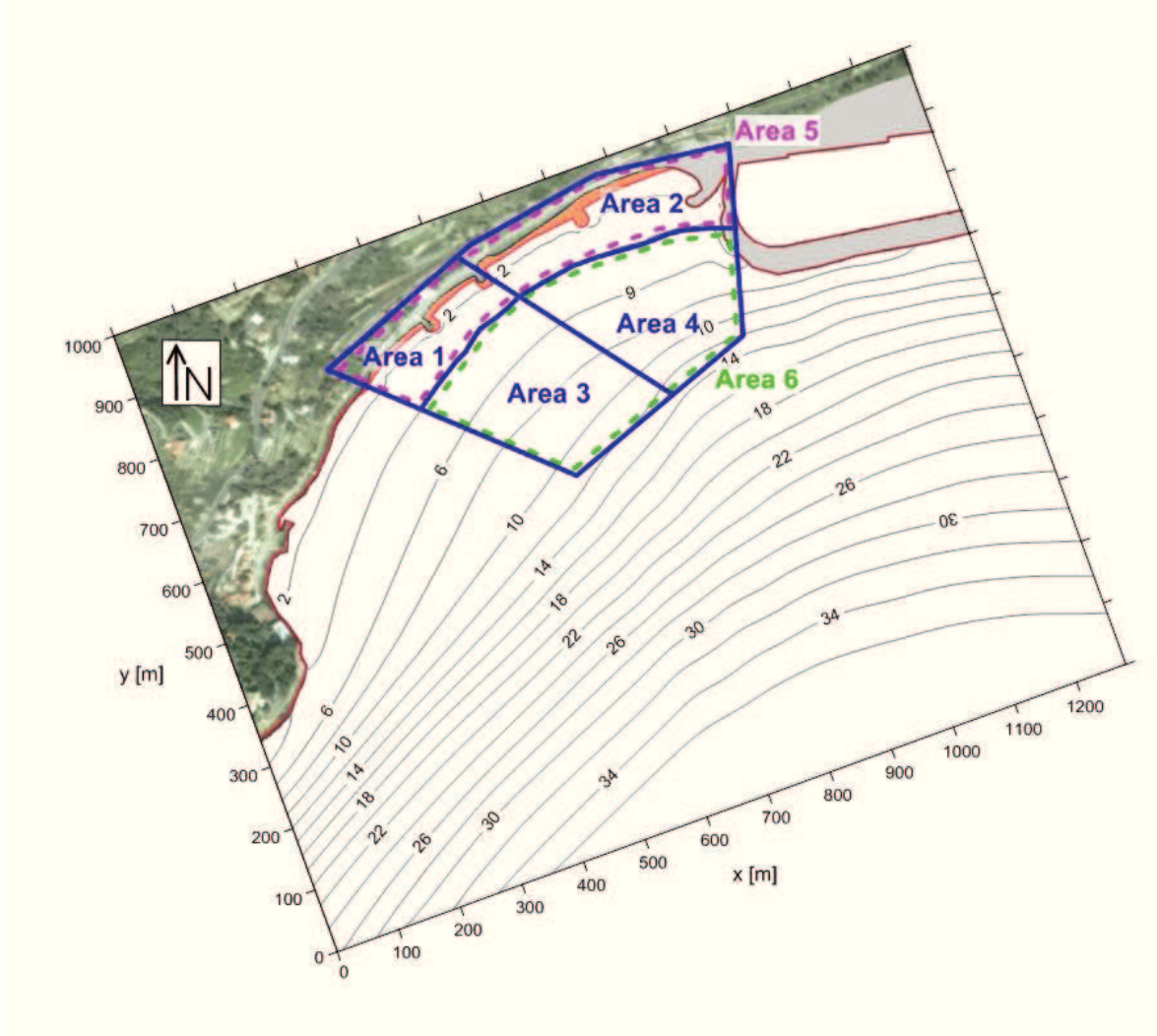


FIG. 10.1 – SUDDIVISIONE DELLA ZONA IN AREE DI STUDIO

APPENDICE A: MODELLO MORFODINAMICO

MODELLO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI COSTIERI

Il modello morfodinamico consiste in un sistema integrato di modelli numerici, operanti sulla stessa griglia di calcolo, capace di simulare la propagazione delle onde a costa, di simulare la corrente costiera generata da marea, vento e onde, di calcolare il trasporto del sedimento, di fondo e in sospensione, determinato dal campo di corrente.

In input occorre fornire la geometria del bacino, lo schema delle strutture costiere presenti (anche sommerse), la profondità in ogni maglia del reticolo, la curva granulometrica dei sedimenti (o almeno il diametro medio dei sedimenti), la densità del sedimento, la densità dell'acqua e l'eventuale presenza di "sorgenti" di sedimento, quali ad esempio l'apporto fluviale.

In output vengono prodotti: il campo di onde a costa, i valori di radiation stress in tutta la griglia, il campo di corrente (corrente e velocità orbitali), i valori del trasporto longitudinale e trasversale alla costa.

Nella figura seguente viene mostrato il diagramma di flusso delle varie fasi considerate dal modello morfodinamico.
Si sottolinea la necessità, evidenziata dalla freccia in grassetto, di ri-calcolare il forzante ondoso ad ogni variazione significativa del fondale, in quanto le variazioni batimetriche influenzano ovviamente la propagazione delle onde a costa, le profondità di frangimento delle onde e il campo di corrente.

Il modello morfodinamico è composto dai seguenti moduli:

1. Modulo idrodinamica costiera – Modello IDRODINAMICO BAROTROPICO per la simulazione della circolazione Costiera, **Sez. A.1**;
2. Modulo numerico per la propagazione del moto ondoso verso costa – Modello SWAN (Simulating Waves Nearshore), **Sez. A.2**;
3. Modulo idro-morfodinamico – Modello SCEM per la simulazione della circolazione e dell'evoluzione morfodinamica costiera di dettaglio, **Sez. A.3**;
4. Modulo evoluzione del fondale – Modello TRASBJ per la valutazione dell'evoluzione del fondale, **Sez. A.4**.

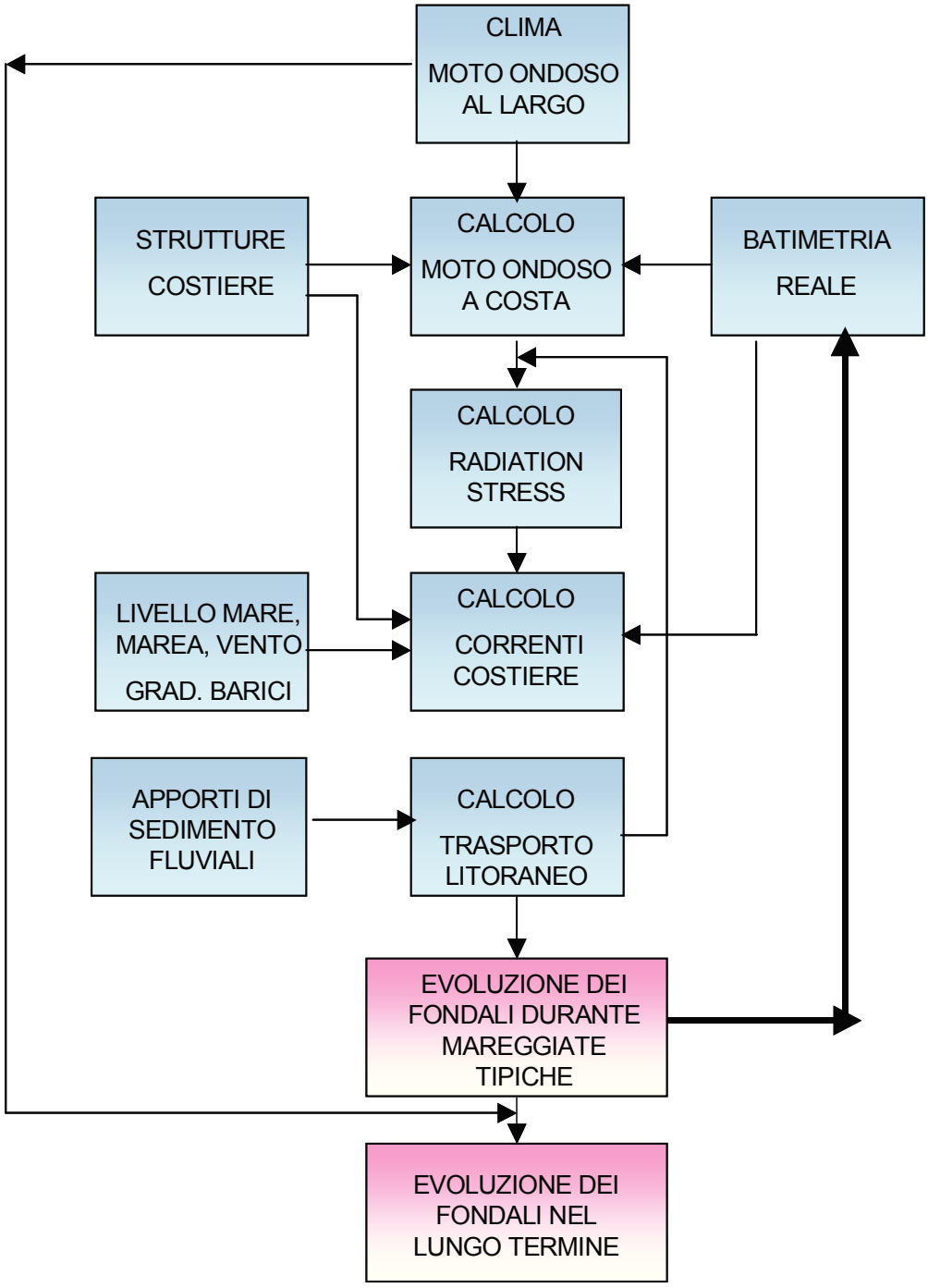


FIG. A1 – DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL MODELLO MORFODINAMICO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI COSTIERI

A.1 MODULO IDRODINAMICO PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA

A.1 Equazioni

Il modello è basato sulle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, mediate sulla verticale e su di un intervallo di tempo pari al periodo dell'onda.
Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial (uh)}{\partial x} - \frac{\partial vh}{\partial y} \qquad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} - g\frac{u|\vec{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h}\tau_x - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \qquad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} - g\frac{v|\vec{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h}\tau_y - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \qquad [3]$$

dove:

h: profondità riferita al livello medio del mare;

η: elevazione della superficie libera;

u,v: componenti della velocità orizzontale mediate sulla verticale.

$$v = \frac{1}{h}\int_{-h}^{\eta} v(z)dz \qquad u = \frac{1}{h}\int_{-h}^{\eta} u(z)dz \qquad [4]$$

f: parametro di Coriolis;

$C=C_o h^{1/6}$ coefficiente di Chezy;

C_o: coefficiente di scabrezza del fondo;

$\tau_x\,\tau_y$: componenti dello stress superficiale del vento, legate alla velocità del vento W dalle relazioni

$$\tau_y = \rho_{aria} C_D W_y |\vec{W}| \qquad \tau_x = \rho_{aria} C_D W_x |\vec{W}| \qquad [5]$$

S_{xx}, S_{yy}, S_{xy} componenti del radiation stress del moto ondoso, fornite secondo la teoria lineare da

$$S_{xx} = E\left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}\right) + E\left(\frac{n}{2}\right)\cos(2\theta)$$

$$S_{yy} = E\left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}\right) + E\left(\frac{n}{2}\right)\cos(2\theta) \qquad [6]$$

$$S_{xy} = En\cos(2\theta)\sin(2\theta)$$

dove:

$E = \frac{1}{8}\rho g H^2$ densità di energia dell'onda;

H: altezza dell'onda;

ϑ: angolo tra la direzione di propagazione dell'onda e l'asse x;

$n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2Kh}{sinh(Kh)}\right]$ rapporto tra la velocità di gruppo e la velocità di fase dell'onda.

A.2 Il metodo di integrazione

Per l'integrazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto è stato adottato uno schema numerico alle differenze finite di tipo esplicito.
Lo schema opera su di un reticolo regolare a maglie quadrate o rettangolari di tipo "traslato" nel quale, cioè, l'elevazione della superficie libera e le componenti della velocità sono definite in punti diversi della maglia, secondo lo schema indicato in **Fig. 1**.
Anche nel tempo la rappresentazione è di tipo "traslato", in quanto l'elevazione della superficie libera è definita al tempo n-1/2, n+1/2, n+3/2, ..., mentre le componenti della velocità sono definite al tempo n, n+1, n+2, ...

L'integrazione del sistema di equazioni viene effettuata in due passi: dapprima viene integrata l'equazione di conservazione della massa e viene calcolata l'elevazione della superficie libera al tempo n+1/2 a partire dai valori di η al tempo n-1/2 e di u e v al tempo n, successivamente vengono integrate le equazioni di conservazione della quantità di moto calcolando i valori di u e v al tempo n a partire dai valori al tempo n-1 e dai nuovi valori η al tempo n+1/2.

Questa procedura è necessaria per garantire la stabilità della soluzione numerica.
Nelle equazioni della conservazione della quantità di moto i termini non lineari di tipo avvettivo vengono schematizzati mediante uno schema "upwind", mentre i termini di attrito sono calcolati mediante uno schema di tipo semi-implicito, allo scopo di migliorare la stabilità della soluzione.
A causa della natura esplicita dello schema numerico adottato, il passo temporale Dt e le dimensioni spaziali Dx e Dy devono comunque soddisfare il criterio di stabilità di Courant-Levy:

$$D_t \leq \frac{\max(D_x, D_y)}{\sqrt{2}\left(|\vec{v}|\right) + \sqrt{gh)}} \qquad [7]$$

Per l'integrazione del sistema di equazioni debbono essere assegnate opportune condizioni iniziali e al contorno.
Nelle acque basse l'effetto accentuato dell'attrito determina il rapido attenuarsi delle perturbazioni del moto, per cui l'influenza delle condizioni iniziali tende a divenire trascurabile e dopo breve tempo si stabilisce una condizione di regime dipendente dall'equilibrio tra le condizioni al contorno ed i termini forzanti.
Ciò semplifica notevolmente il problema della determinazione delle condizioni iniziali per le quali in generale viene assunto uno stato di quiete:

$$\eta, u, v = 0 \quad \text{per } t=0 \qquad [8]$$

Per quanto riguarda le condizioni al contorno vengono effettuate le seguenti assunzioni:

ai contorni chiusi viene imposto l'annullamento delle componenti normali della velocità (u_n) e della derivata normale al contorno della componente longitudinale della velocità (u_l):

$$u_n = 0 \qquad \frac{\partial u_l}{\partial n} = 0 \qquad \text{per } t \geq 0 \qquad [9]$$

al contorno aperto parallelo alla costa, corrispondente al contorno con il mare aperto, viene imposto l'annullamento dell'elevazione della superficie libera;

ai contorni trasversali alla costa vengono imposte condizioni periodiche. Queste ultime corrispondono ad imporre l'uguaglianza dei flussi e dell'elevazione della superficie nei due contorni trasversali e presuppongono che il tratto di costa in esame presenti caratteristiche simili in corrispondenza ai due contorni.

A.3 Parametri di input

Per l'applicazione del modello sono necessari i seguenti dati di input:
geometria del bacino;

profondità in ogni maglia del reticolo;
rugosità del fondo in ogni maglia;
i termini del radiation stress in ogni maglia;
condizioni iniziali di u, v e η in ogni maglia;
condizioni ai contorni aperti ad ogni passo di integrazione δti;
è oscillazione di marea;
il vento superficiale (direzione ed intensità) ad ogni passo di integrazione δti e per ogni maglia.

A.4 Caratteristiche dell'output

Come risultato dell'integrazione numerica, il modello fornisce, ad intervalli prefissati, il valore di U, V e η in ciascuna maglia del bacino.
E' inoltre possibile ottenere una rappresentazione grafica dell'andamento del campo di corrente e dell'elevazione della superficie libera.

A.5 Referenze Bibliografiche

RAMMING H. G., 1972: "Reproduction of physical processes in coastal areas", Proc. of 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver, Vol. 3;

HSU S.A., 1986: "A mechanism for the increase of wind stress (drag) coefficient with wind speed over water surfaces: a parametric model", J. of Phys. Oceanography, 16, 144-150;

HANSEN W., 1962: " Hydrodynamical methods applied to oceanographyc problems", Proc. of the Symposium on Mathematical Hydrodynamical Methods of Physical Oceanography. Institut fur Meerskunde der Universitat, Hamburg;

REID R.O. e BODINE B.R., 1968: "A Numerical model for storm surges in Galverston Bay", Journal of the Waterways Harbours and Coastal Division, ASCE, Vol. 102, n. WW1;

NODA, E.K., SONU C.J., RUPERT, V.C. and COLLINS, J.I. 1974: "Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf-zone", Tetra Tech Report TC-149-4;

ALLENDER, J.H., DITMARS, J.D., HARRISON, W. and PADDOCK, R.A. 1978: " Comparison of model and observed nearshore circulation", Proc. of 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg;

LIU, P. and LENNON, G.P., 1978: " Finite Element Modelling of Nearshore Currents", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, WW2.

BIRKEMEIER, W.A. and DALRYMPLE; R.A., 1976: " Nearshore Water Circulation Induced by Wind and Waves", Proc. of the Symposium on Modelling Technique, ASCE;

BRUCE A., EBERSOLE, DALRYMPLE R.A. 1980: "Numerical modelling of nearshore circulation", Procedings of VII Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia;

BACKHAUS J.O. 1983: "A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling", Continental Shelf Research, 2.

A.2 MODULO NUMERICO PER LA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA - MODELLO "SWAN" (Simulating Waves Nearshore)

La propagazione delle onde estreme a costa viene simulata mediante il ben noto modello "SWAN", che rappresenta lo stato dell'arte.
Lo SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello numerico che produce stime realistiche dei parametri delle onde in aree costiere, a partire da condizioni definite al largo, tenuto conto delle condizioni del vento, delle correnti e delle caratteristiche del fondale.
L'entità dei diversi fenomeni è calcolata a partire dalla batimetria reale dell'area oggetto di studio.

SWAN è un modello spettrale di terza generazione, che tiene conto dei seguenti processi:

- rifrazione dovuta a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- "shoaling" dovuto a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- attrito e rifrazione indotti da correnti contrarie;
- trasmissione o dissipazione dovuti alla presenza di ostacoli (ad esempio barriere frangiflutti).
-

In SWAN sono formulati I seguenti processi di generazione e dissipazione:

- vento;
- "white-capping";
- frangimento;
- attrito al fondo;
- interazioni non-lineari onda-onda.

SWAN differisce dagli altri modelli analoghi e dai suoi predecessori per i seguenti aspetti principali:

- è un modello spettrale (è, quindi, possibile selezionare il profilo spettrale da definire per le condizioni al contorno così come la funzione di "spreading" direzionale);
- considera la generazione di onde da vento anche in acque basse;
- considera l'interazione onda-corrente anche in acque basse;
-
- Grazie ai tre punti sopra enunciati, SWAN definisce con maggiore completezza la dissipazione dell'energia rispetto ad altri modelli che tengono conto solo dell'attrito al fondo.

A.2.1. Formulazione generale

SWAN descrive le onde mediante lo spettro bidimensionale di densità di azione d'onda, anche in condizioni in cui prevalgono fenomeni non lineari (ad esempio nella "*surf-zone*"). Anche in condizioni fortemente non lineari, infatti, è possibile stimare con ragionevole accuratezza la distribuzione spettrale al secondo ordine.

SWAN utilizza lo spettro di densità di azione N(k,θ) anziché lo spettro di densità di energia E(k, θ) perché, in presenza di correnti, la densità di azione si conserva mentre la densità di energia non si conserva.
La densità di azione è uguale al rapporto tra la densità di energia e la frequenza relativa σ:

$$N(\sigma,\theta) = E(\sigma,\theta)/\sigma.$$

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ (misurata rispetto ad un sistema di riferimento che si muove con la velocità di propagazione dell'azione d'onda) e la direzione dell'onda θ (direzione perpendicolare alla cresta di ciascuna componente spettrale).
L'evoluzione dello spettro viene descritta mediante l'equazione di bilancio dell'azione spettrale, di seguito riportata, rispetto ad un sistema di coordinate cartesiane (Hasselmann et a., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_x N + \frac{\partial}{\partial y}c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

Il primo termine a sinistra rappresenta il gradiente locale di densità di azione, il secondo ed il terzo termine rappresentano la propagazione di densità di azione nello spazio geografico.
Il quarto termine rappresenta lo spostamento della frequenza relativa dovuto alle variazioni di profondità e corrente, mentre il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta dalla corrente e dalle variazioni di profondità.

Le velocità di propagazione (c_x, c_y, c_σ, c_θ) all'interno del modello sono definite mediante la teoria lineare.
Il termine **S** (=S(θ,σ)) a destra della precedente equazione è il termine sorgente espresso come densità di energia, ed è costituito dagli effetti di generazione, dissipazione, e interazioni non-lineari onda-onda.
Per maggiori dettagli si rimanda al manuale del modello (SWAN User Manual).

A.2.2. Parametri principali

In SWAN le principali grandezze sono così definite:

Altezza d'onda significativa: **Hs** (in m):

$$Hs = 4\sqrt{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}$$

dove $E(\omega,\theta)$ è la densità spettrale della varianza, ω la frequenza determinata dallo shift in frequenza della relazione di dispersione.

Periodo medio d'onda: **Tm_{01}** (in s):

$$Tm01 = 2\pi\left(\frac{\iint \omega\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}{\iint E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}\right)^{-1} = 2\pi\left(\frac{\iint \omega\, E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}\right)^{-1}$$

Periodo medio d'onda: **Tm_{02}** (in s):

$$Tm_0 2 = 2\pi\left(\frac{\iint \omega^2\, E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}\right)^{-1/2} = 2\pi\left(\frac{\iint \omega^2\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}{\iint E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}\right)^{-1/2}$$

Direzione media dell'onda: **Dir** (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica), come convenzionalmente definita (Kuik et al., 1988).

$$Dir = \arctan[\int \sin(\theta)\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta \,/\, \int \cos(\theta)\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta\,]$$

Direzione del picco d'onda: **PDir** (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica):

$$PDir = E(\theta) = \int E(\sigma,\theta)\, d\sigma = \int E(\omega,\theta)\, d\omega$$

Velocità orbitale "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo: **U_{rms}** (in m/s)

$$U_{rms} = < (U^2) >^{1/2}$$

Velocità orbitale massima "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo: **U_{bot}** (in m/s)

$$U_{bot} = \sqrt{2}\, U_{rms}$$

A.2.3. Schematizzazione

L'area di studio viene discretizzata mediante un reticolo di maglie quadrate o rettangolari e ad ogni maglia viene assegnata la corrispondente profondità del fondale.

Il modello non ha particolari problemi nella risoluzione spaziale: possono così essere effettuate simulazioni della propagazione dell'onda a costa considerando reticoli di estremo dettaglio o reticoli a vasta scala.
E' inoltre possibile effettuare, ove necessario, l'innesto, "**nesting**", di uno o più reticoli dettagliati su uno a vasta scala, garantendo in questo modo condizioni ai contorni oggettive dei modelli di dettaglio.

A.2.4. Referenze Bibliografiche

Andorka Gal, J.H., L.H. Holthuijsen, J.C.M. de Jong and A.T.M.M. Kieftenburg, 1998, Wave transformation near a quasi-1D coast, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen,150-160

Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1996, The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp. 668-676

Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, A nonstationary, parametric coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 99-107

Booij, N., L.H. Holthuijsen, N. Doorn and A.T.M.M. Kieftenburg, 1997, Diffraction in a spectral wave model, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 243-255

Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, Numerical wave propagation on a curvilinear grid, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 286-294

Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1998, Shallow water wave modelling, Oceanology International 98, The Global Ocean, Brighton, Conference Proceedings, 3, 483-491

Booij, N., L.H. Holthuijsen and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing the second-generation HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 215-222

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph.Research, 104, C4, 7649-7666

Cavaleri, L. and L.H. Holthuijsen, 1998, Wave modelling in the WISE group, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 498-508

Gorman, R.M. and C.G. Neilson, 1999, Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary, Coastal Engineering, 36, 197-217

Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641

Holthuijsen, L.H., N. Booij and R. Padilla-Hernandez, 1997, A curvi-linear, third-generation coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 128-136

Holthuijsen, L.H., N. Booij, R. Ris, J.H. Andorka Gal and J.C.M. de Jong, 1997, A verification of the third-generation wave model "SWAN" along the southern North Sea coast, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 49-63

Holthuijsen, L.H., R.C. Ris and N. Booij, 1998, A verification of the third-generation wave model SWAN, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 223-230

Holthuijsen, L.H., N. Booij and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing 1st-, 2nd - and 3rd-generation coastal wave modelling, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 140-149

Padilla-Hernandez, R., P. Osuna, J. Monbaliu and L. Holthuijsen, 1998, Intercomparing third-generation wave model nesting, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 102-112

Ris, R.C., L.H. Holthuijsen and N. Booij, 1994, A spectral model for waves in the near shore zone, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engng, Kobe, Oct. 1994, Japan, pp. 68-78

Ris, R.C. and L.H. Holthuijsen, 1997, Modelling of current induced wave-blocking in a spectral wave model, 8th International Biennal Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas, J. Dronkers and M.B.A.M. Scheffers (eds.), The Hague, 139-144

Ris, R.C., N. Booij and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification, J.Geoph.Research, 104, C4,7667-7681

Wood, D.J., M. Muttray and H. Oumeraci, 2000, The SWAN model used to study wave evolution in a flume, Coastal Engineering, accepted for publication.

A.3 MODULO IDRO-MORFODINAMICO – MODELLO SCEM PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE E DELL'EVOLUZIONE MORFODINAMICA COSTIERA DI DETTAGLIO

Il modello SCEM è un modello quasi-3D idro-morfodinamico, di tipo "wave-averaged", che trova applicazione nella zona costiera. Tale modello ha la possibilità non solo di calcolare il campo idrodinamico costiero indotto da onde, vento e marea, considerando anche gli effetti 3D di dispersione laterale, ma anche di valutare la conseguente evoluzione morfodinamica del fondale.

Il modello ha la possibilità di operare su griglie innestate su cui il campo idrodinamico è stato calcolato dal modello stesso o dal modello idrodinamico a grande scala (**Sez. A.3**).

Il forzante ondoso viene calcolato dal modello attraverso un wave-driver scelto tra REF-DIF (CACR, University of Delaware) o SWAN (**Sez. A.2**).

Il calcolo del trasporto solido indotto dal campo di corrente avviene sulla stessa griglia utilizzata per la valutazione dell' idrodinamica locale. Il modello calcola, in corrispondenza dei punti di griglia relativi alle componenti u e v della velocità, le corrispondenti componenti del trasporto. L'evoluzione del fondale può esser poi determinata per differenti steps temporali e attraverso l'utilizzo della tecnica di "accelerazione di evoluzione" (i.e. Lesser et al., 2004)che rende il calcolo morfodinamico più veloce permettendo la simulazione di periodi lunghi.

A.3.1 Equazioni

Le equazioni idrodinamiche su cui è basato il modello sono ottenute dall'equazioni di Reynolds, integrate sulla direzione verticale e mediate sul periodo d'onda (Putrevu & Svendsen, 1999) e in forma vettoriale si presentano come segue::

$$\overline{\zeta}_{,t} + \nabla \cdot \left(h\tilde{\mathbf{v}} \right) = 0$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_{,t} + \left(\tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla \right)\tilde{\mathbf{v}} = -g\nabla\overline{\zeta} - \frac{1}{\rho h}\nabla \cdot \left(\mathbf{S} - \mathbf{T} + \mathbf{L} \right) - \frac{1}{\rho h}\tau^{B} + \frac{1}{\rho h}\tau^{S}$$

dove *g* è l'accelerazione di gravità, $\overline{\zeta}$ è l'elevazione media, *h* è la profondità in condizioni di quiete, $\tilde{\mathbf{v}}$ è la velocità media sulla verticale, ***S*** è il forzante ondoso (Radiation Stress), ***L*** è il contributo di mescolamento laterale (dispersione 3D) dovuto alla non uniformità nella direzione verticale della corrente, ***T*** è il tensore delle tensioni turbolente integrate sulla verticale, τ^{B} e τ^{S} sono rispettivamente le tensioni indotte dal fondale (Svendsen & Putrevu, 1990) e del vento (Smith et al. 1992).

La formulazione utilizzata per il calcolo del flusso indotto dal moto ondoso e per il calcolo del Radiation Stress è quella proposta da Svendsen (1984), mentre il calcolo del tensore delle tensioni turbolente viene effettuato al di fuori della surf zone mediante la formulazione proposta da Coffey & Nielsen (1984) e dentro la surf zone con la formulazione di Battjes (1975).

La chiusura turbolenta è effettuata con il modello di viscosità turbolenta proposto da

Smagorinsky (1963), che considera le dissipazioni dovute a strutture vorticose con dimensioni minori della griglia di calcolo.

Lo schema numerico utilizzato è di tipo Predictor-Corrector sviluppato originariamente per le Equazioni di Boussinesq sviluppate da Wei & Kirby(1995).

A.3.2 Trasporto solido

Il modello da la possibilità di scegliere tra diverse formulazioni di trasporto slido a seconda delle condizioni in cui ci si trova, in particolare le seguenti formulazioni sono implementate:

A. formulazione di Bijker (1971);
B. formulazione di Bagnold-Bailard-Bowen (i.e. Bailard & Inman, 1981);
C. formulazione di Bagnold-Bailard-Bowen modificata per il moto ondoso da Qin & Svendsen (2003);
D. formulazione di Meyer-Peter & Muller (1948).

Tutte le formulazioni utilizzate per il calcolo del trasporto di sedimento tengono conto sia del trasporto per trascinamento sul fondo ("*bed load*"), sia del trasporto del sedimento in sospensione ("*suspended load*"), ad eccezione della formulazione di Mayer-Peter & Muller che si limita alla modellazione del trasporto sul fondo, prevalentemente indotto dalla corrente.

Le prime due formulazioni, *A* e *B*, si adattano bene alla modellazione di litorali in sabbia, mentre le formulazioni *C* e *D* possono anche essere utilizzate per applicazioni su spiagge/litorali in materiale grossolano quale ghiaia, grazie alla presenza di una soglia limite al movimento dei sedimenti sul fondo.

Per valutare la stabilità del sedimento e quindi la possibilità che il sedimento si muova sotto l'effetto del moto del fluido il parametro di Shields corrispondente al caso in esame si confronta con un parametro di Shields critico, che rappresenta la soglia limite al movimento dei sedimenti, **Fig. A.2**. Tale soglia critica dipende da diversi fattori quali la dimensione del sedimento, il regime di moto, etc., e solitamente, è ricavata da relazioni empiriche. In particolare, nel caso di ghiaie sottoposte all'azione del moto ondoso, il parametro critico di Shields può essere stimato utilizzando la relazione proposta da Soulby & Whitehouse (1997):

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1+1.2D_*} + 0.055[1-\exp(-0.020D_*)]$$

dove

$$D_* = \left[\frac{g(\rho_s-\rho)}{\rho\nu^2}\right]^{1/3} d_{50}$$

con ν la viscosità cinematica del fluido.

Nel caso del moto ondoso il valore del parametro di Shields istantaneo è ricavato considerando la forma asimmetrica che assume l'onda in acque basse e lo shift di fase φ (i.e. Fredsøe & Deigaard, 1992, e Nielsen, 1992) tra il picco della tensione tangenziale e il picco della velocità, secondo la relazione (i.e. Terrile et al., 2009):

$$\theta(t) = \frac{\frac{1}{2} f_{2.5}}{(s-1) g d_{50}} \left[u \cos\varphi + \frac{1}{\omega_p} \left(\frac{du}{dt} - S(t,\Phi) \right) \sin\varphi \right]^2$$

dove $f_{2.5}$ è il fattore d'attrito (Nielsen, 1992), u la velocità al fondo e $S(t,\Phi)$ una funzione che dipende dal tempo t e dal parametro di forma d'onda Φ (Elgar & Guza, 1985) dalla relazione introdotta da Terrile et al. (2009).

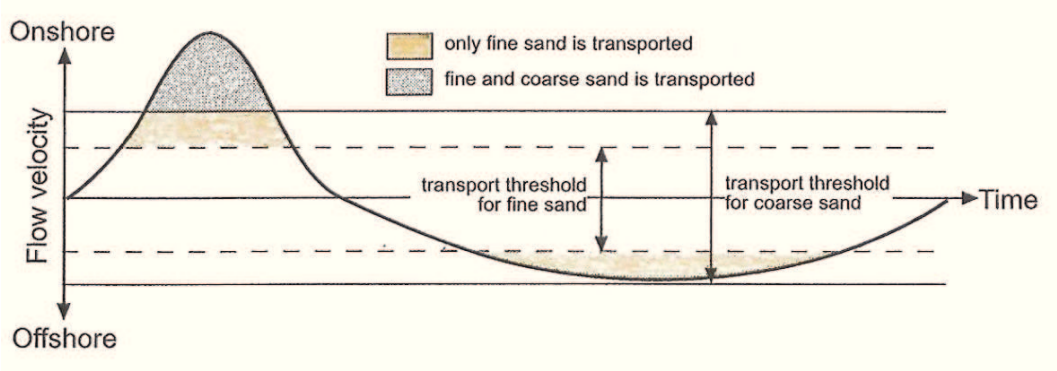


FIG. A.2 - SCHEMA PROFILO DI VELOCITA' E TRASPORTO SOLIDO

A.3.3 Referenze Bibliografiche

Battjes, A.J., 1975, "*Modelling of turbulence in the surf zone*". ASCE Proc. Symp. On Modelling Techniques, San Francisco;

Bailard, J.A., and Inman, D.L., 1981, "*An energetics bedload model for a plane sloping beach: local transport*". J. Geophys. Res., 86, 2035-2043;

Bijker, E.W., 1971, *"Longshore Transport Computations*", Proc. A.S.C.E., Journal of Waterways, Harbours and Coastal Eng. D.V., WW4;

Coffey, F.C., and Nielsen, P., 1984, "*Aspects of wave current boundary layer flows*". Proc. of the 19th Int. Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2232-2245;

Elgar, S., and Guza, R.T., 1995 "*Observation of bispectra of shoaling surface gravity waves*". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 167, pages 425-448;

Fredsøe, J., and Deigaard, R., 1992, "*Mechanics of coastal sediment transport*". Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Singapore;

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., and Stelling, G.S., 2004. "*Development and validation of a three-dimensional morphological model.*" Coastal Engineering 51, 883–915.

Meyer-Peter, E., and Mueller, R., 1948, "*Formulas for bed-load transport.*" Proc., 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Research, Stockholm, 26 pp.

Nielsen, P., 1992, "*Coastal bottom boundary layers and sediment transport*". Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Singapore;

Putrevu, U., and. Svendsen, I.A., 1999, *"Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents*" Eur. J. Mech. B , pp. 409-427.

Qin, W., and Svendsen, I.A., 2003, "*Modeling Nearshore Processes*". Research report CACR-03-04, Center for Applied Coastal Research;

Smagorinsky, J., 1963, "*General Circulation experiments with the primitive equations.*" Mon. Wea. Rev. 91, 99-164.

Smith, S. D., R. J. Anderson, W. A. Oost, C. Kraan, N. Maat, J. DeCosmo, K. B. Katsaros, K. L. Davidson, K. Bumke, L. Hasse, and H. M. Chadwick, 1992, *"Sea surface wind stress and drag coefficients: The HEXOS results*". Bound.-Layer Meteorol., 60, 109-142;

Soulby, R.L., and Whitehouse, R.J.S.W., 1997, "*Threshold of sediment motion in coastal environments*". Pacific Coasts and Ports '97 Conf. University of Canterbury, Christchurch, New Zeland, pp. 149-154;

Svendsen, I.A., 1984, "*Mass flux and undertow in a surf zone*". Coastal Eng., 8, 347-365;

Svendsen I.A. and Putrevu U., 1990, "*Nearshore circulation with 3-D profiles*" Proc. 22nd Int. Conference on Coastal Engineering, ASCE, 241-254;

Terrile, E., Reniers, A.J.H.M., and Stive, M.J.F., 2009, "*Acceleration and Skewness Effects on the Instantaneous Bed Shear Stresses in Shoaling Waves*". Journal of Waterway, Port, Coastal and ocean Engineering, 5(135), 228-234;

Wei, G., and Kirby, J.T., 1995, "*A time dependent numerical code for extended Boussinesq equations*". Journal of Waterway, Port, Coastal and ocean Engineering, 120, pp. 251-261.

A.4 MODULO NUMERICO PER LA SIMULAZIONE DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI COSTIERI

Il modello calcola il trasporto del sedimento determinato dal campo di corrente. Esso è basato sull'applicazione della formula di Bijker ed opera sulla stessa griglia del modello idrodinamico (i.e. IDRODINAMICO o SCEM), al quale è interfacciato.
Il modello calcola, in corrispondenza dei punti di griglia relativi alle componenti u e v della velocità, le corrispondenti componenti del trasporto di sedimento.
Per la sua applicazione è necessario fornire in input sia la velocità di corrente, sia le velocità orbitali associate al campo di moto ondoso.

A.4.1 Equazioni

La formula di Bijker utilizzata per il calcolo del trasporto di sedimento tiene conto sia del trasporto per trascinamento sul fondo ("bed load"), sia del trasporto del sedimento in sospensione ("suspended load").
Il trasporto di fondo è dato da:

$$S_b = BD_{50}\sqrt{g}\frac{V}{C}\exp\left[\frac{-0.27\Delta_S D_{50} g}{\mu(\tau_{WC}/p)}\right] \qquad [1]$$

dove:

g è l'accelerazione di gravità;

ρ la densità dell'acqua;

$\Delta_S = \frac{(\rho_S - \rho)}{\rho}$ la differenza tra la densità relativa del sedimento e quella dell'acqua;

V la velocità media della corrente;

D_{50} il diametro medio del sedimento;

C=18log(12h/r) il coefficiente di Chezy;

h la profondità dell'acqua;

r la scabrezza del fondo;

μ il "ripple factor", che può essere stimato mediante la relazione empirica:

$$\mu = \left(\frac{C}{C'}\right)^{3/2} \qquad [2]$$

dove C' è analogo al coefficiente di Chezy e viene calcolato sostituendo nella relativa formula il diametro D_{90} del sedimento alla scabrezza r del fondo ($C'=18\log(12h/D_{90})$;

B un coefficiente (generalmente posto uguale a 5);

τ_{wc} lo stress sul fondo dovuto alle onde e alla corrente. Lo stress sul fondo dovuto all'azione combinata di onde e correnti è dato da:

$$\tau_{wc} = \rho \frac{V^2}{C^2} g \left[1 + 0.5 \left(\xi \frac{U_o}{V} \right)^2 \right] \qquad [3]$$

dove:

$\mathbf{U_o}$ è la velocità orbitale massima sul fondo,

$\xi = C(f_w/2g)^{0.5}$

$\mathbf{f_w}$ il fattore di attrito di Jonsson, che può essere stimato mediante la relazione:

$$f_w = \exp\left[-5.977 + 5.213 \left(\frac{a_b}{r} \right)^{-0.194} \right] \qquad [4]$$

nella quale a_b è l'ampiezza dello spostamento orbitale in prossimità del fondo.
Il trasporto in sospensione è legato alla componente di "bed load" dalla relazione:

$$S_s = 1.83 \left[I_1 \ln \frac{(33h)}{r} + I_2 \right] \qquad [5]$$

dove $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$ sono gli integrali di Einstein:

$$I_1 = \frac{0.216 (z/h)^{(z_x - 1)}}{(1 - z/h)^{z_y}} \int_{z/h}^{1} \left(\frac{1-y}{y} \right)^{z_x} dy \qquad [6]$$

$$I_2 = \frac{0.216(a/h)^{(z_x-1)}}{(1-z/h)^{z_Y}} \int_{z/h}^{1} \left(\frac{1-y}{y}\right)^{z_x} \ln(y)dy$$

k è la costante di Von Karman;

w la velocità di caduta del sedimento.

Quest'ultima può essere valutata, in funzione del diametro del sedimento e della temperatura, mediante le seguenti relazioni empiriche, valide per $50\mu<D_{50}<300\mu$:

$$\log\frac{1}{w} = 0.4949(\log D_{50})^2 + 2.4113\log D_{50} + 3.7394 \quad \text{per T =18°C}$$

$$\log\frac{1}{w} = 0.47584(\log D_{50})^2 + 2.1795\log D_{50} + 3.1915 \quad \text{per T =10°C} \qquad [7]$$

Il trasporto totale è dato infine dalla somma dei due contributi:

$$S_t = S_b + S_s \qquad [8]$$

A.4.2 Metodo di calcolo

L'evoluzione dei fondali viene calcolata sulla base dei valori di trasporto del sedimento integrando nel tempo, in ciascuna maglia del modello, l'equazione di conservazione della massa M del sedimento:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = -\frac{\delta(S_{tot})_x}{\delta x} - \frac{\delta(S_{tot})_y}{\delta y} \qquad [9]$$

a partire dalla evoluzione temporale delle componenti (S_x,S_y) del trasporto del sedimento. Dalle variazioni di volume del sedimento si ottengono le variazioni della profondità media delle maglie, note le dimensioni delle maglie stesse.

A.4.3 Parametri di input

In input occorre fornire:

la geometria del bacino;

la profondità in ogni maglia del reticolo;

la curva granulometrica dei sedimenti (o almeno il diametro medio dei sedimenti);

la densità del sedimento;

la densità dell'acqua;

il campo di corrente (corrente e velocità orbitali) in ogni maglia.

A.4.4 Output

Per ogni miglia del modello vengono forniti i valori medi di profondità e la variazione di volume rispetto alle condizioni batimetriche iniziali. Vengono poi fornite rappresentazioni grafiche, sia in termini di nuove isobate, sia in termini di isolinee di variazione del fondale e di volumi spostati nelle varie aree.

A.4.5 Referenze Bibliografiche

BIJKER E.W., 1967, "Some Considerations about Scales for Coastal Models with movable Bed", D.H.L. publ. n. 50;

BIJKER E.W., 1968, "Littoral Drift as Function of Waves and Current", Delft Hydraulics Laboratory, publ. n. 58;

BIJKER E.W., 1971, "Longshore Transport Computations", Proc. A.S.C.E., Journal of Waterways, Harbours and Coastal Eng. D.V., WW4;

BIJKER E.W., 1980, "Sedimentation in Channels and Trenches" Proc. of Coastal Engineering, 1709-1718.

APPENDICE B: MODELLO NUMERICO "TRALIT"
CALCOLO DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO

La disponibilità di una stima statisticamente valida del clima del moto ondoso al largo consente di valutare con analoga significatività il flusso di energia del moto ondoso incidente ed il conseguente trasporto solido litoraneo.
Il trasporto litoraneo longitudinale può essere infatti direttamente collegato alla componente longitudinale alla costa del flusso di energia associata al moto ondoso in fase di frangimento, come emerge da numerose osservazioni effettuate sia su modello fisico che in ambienti naturali.
Il modello qui descritto calcola il trasporto longitudinale potenziale nelle diverse sezioni in cui viene suddivisa la costa.
Il calcolo viene effettuato sulla base del clima $P(H,\theta, T)$ del moto ondoso al largo (frequenza di eventi suddivisi per periodo e direzione di provenienza) e tiene conto dei contributi al trasporto dovuti a tutti gli elementi del clima che, per direzione di incidenza, risultano significativi per il tratto di litorale, pesati con la rispettiva probabilità di occorrenza.
Poiché in generale il clima è rappresentativo delle condizioni medie annuali (stagionali) del moto ondoso nell'area, il modello fornisce il trasporto potenziale medio annuo (stagionale) che si verifica lungo il tratto di costa, tenendo conto delle dimensioni del sedimento lungo il profilo batimetrico interessato dai fenomeni di trasporto e dalle modalità di frangimento delle onde.

B.1. EQUAZIONI

Il trasporto longitudinale del peso immerso I_l (dyne/sec) del materiale sedimentario è legato alla componente litoranea del flusso di energia associata al moto ondoso in fase di frangimento P (erg/seccm) secondo la seguente relazione empirica:

$$I_l = Kp_l = K\,(E_b cn)_b \,\text{sen}\,\alpha_b \cos\alpha_b \qquad [1]$$

dove:

$E_b = .25\,\sigma_a\, g\, H_b^2$	energia dell'onda in fase di frangimento;
$(Cn)_b$	è la velocità di gruppo delle onde in fase di frangimento;
α_b; H_b	sono l'angolo di incidenza e l'altezza d'onda al frangimento;
K	è un coefficiente empirico.

La grandezza I_l è legata alla variabile trasporto longitudinale Q (cm/s) dalla relazione:

$$I_l = (\sigma_s - \sigma_a)\, ga'Q \qquad [2]$$

dove σ_s e σ_a rappresentano la densità del sedimento e dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità e $a' \approx 0.6$ tiene conto della porosità del sedimento.

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso si fa riferimento al clima del moto ondoso al largo (frequenza di eventi suddivisi per periodo, direzione ed altezza).
Per utilizzare il clima osservato al largo nel calcolo del flusso di energia a costa e quindi del trasporto è necessario eseguire una trasformazione opportuna, valutando le modifiche a cui è soggetto il moto ondoso nella propagazione verso costa per gli effetti combinati di shoaling, rifrazione e dissipazione fino al fenomeno di frangimento delle onde.
Nel modello l'entità di tali effetti è calcolata nell'ipotesi che la batimetria sia schematizzata mediante piani inclinati caratterizzati da pendenze diverse. La sua applicazione implica quindi che la configurazione morfologica della spiaggia sommersa sia sufficientemente regolare e il processo propagativo del moto ondoso per le principali direzioni di incidenza risulti uniforme.
L'effetto dell'attrito è stato introdotto in forma parametrica.
Per la sezione j della costa è quindi possibile calcolare il flusso di energia longitudinale P_{lji} introdotto dall'elemento i-esimo costituente il clima e il valore del contributo al trasporto del sedimento Q_{ji}.
La somma dei diversi contributi, pesati con la loro frequenza percentuale $p_i = P(T,\theta_b,H_b)$ fornisce il valore del trasporto longitudinale netto di materiale sedimentario. Pertanto il trasporto longitudinale Q_j in una sezione j della costa può essere espresso come:

$$Q_j = \Sigma_i Q_{ji} = \Sigma_i K\, P_{lji}\, p_i \qquad [3]$$

La quantità P_{lji} viene calcolata secondo la formula:

$$P_{lji} = [(E_i\, Cn_i)_b \text{ sen } \alpha_{ib} \cos \alpha_{ib}]_j \qquad [4]$$

I valori di altezza d'onda, corrispondenti alla matrice del clima al largo $P(T,\theta,H)$, sono propagati verso costa fino al verificarsi del frangimento. Tale procedura è estesa a tutti gli elementi del clima al largo la cui direzione di incidenza è compresa nel settore di esposizione della costa. Si ottiene quindi "un vettore di breaking" contenente tutti i parametri di interesse fisico e statistico necessari per calcolare il trasporto longitudinale.
I valori ottenuti applicando le formule precedenti sono rappresentativi di un trasporto longitudinale potenziale, quale derivante esclusivamente da considerazioni energetiche del moto ondoso. In realtà il trasporto effettivo dipende dalla disponibilità e dalla granulometria del sedimento, dalla morfologia del fondale e dalla modalità di frangimento delle onde.
Oltre ai valori di trasporto potenziale il modello fornisce anche una stima del trasporto effettivo ottenuto introducendo una dipendenza del coefficiente K (supposto costante nella formulazione originale di Komar e dello Shore Protection Manual), dal diametro medio del sedimento nell'area di profilo interessata dai fenomeni di trasporto, secondo la relazione proposta da Swart (1976), e dall'indice di breaking ε_b, secondo quanto proposto da Kamphuis e Readshow (1978).
La relazione proposta da Swart è la seguente:

$$K = A \log(0.00146/D_{50}) \qquad [5]$$

Dove A è una costante e D_{50} è il diametro medio del sedimento.

Nel modello il profilo batimetrico viene schematizzato, dal punto di vista sedimentologico, in 4 fasce (caratterizzate dal diametro medio D_{50} e dalla lunghezza l).

Il coefficiente K risulta dipendente dalla media di diametri medi del sedimento D_{50}, pesati con la larghezza delle fasce corrispondenti, calcolata nella zona interessata dai fenomeni di trasporto. Tale calcolo è effettuato per ogni elemento della matrice del clima $P(H,\theta,T)$ che influisce sul tratto del litorale in esame, in quanto per ogni elemento varia l'estensione della fascia di profilo trasversale interessata da un trasporto attivo del sedimento.
I risultati sperimentali di Kamphuis e Readshow indicano una minore efficienza nel sollevamento del sedimento per le onde che si rompono per "spilling" rispetto alle onde che si rompono per "plunging" o "surging".
Gli autori suggeriscono di introdurre una dipendenza di K dall'indice di breaking ε_b, il cui valore tende a crescere passando da condizioni di rottura per spilling a quelle per plunging e surging, risultando inferiore a 0.4 nel caso di spilling, compreso tra 0.4 e 2 nel caso di plunging e maggiore di 2 nel surging.
La relazione proposta risulta essere la seguente:

$$\begin{array}{ll} K = 0.28 & \text{per } \varepsilon_b < 0.4 \\ K = 0.7\varepsilon_b & \text{per } 0.4 \le \varepsilon_b \le 1 \\ K = 1. & \text{per } \varepsilon_b > 1 \end{array} \qquad [6]$$

dove l'indice di breaking è dato da:

$$\varepsilon_b = \tan(\alpha)/(H_b/L_o)^{1/2}$$

in cui $\tan(\alpha)$ è la pendenza del fondale, H_b/L_o è la ripidità dell'onda.
Nel modello, per ogni elemento della matrice del clima $P(H,\theta,T)$ si calcola il valore dell'indice di breaking e quindi il corrispondente contributo al trasporto.

B.1.1 Criterio di frangimento dell'onda

Nel modello si utilizza il criterio di frangimento riportato in SPM (1977):

$$H_b/d_b = \Gamma \qquad [7]$$

in cui Γ dipende dalla ripidità dell'onda e dalla pendenza m del fondale, secondo le relazioni seguenti:

$$\Gamma = b-(aH_b)/(gT^2)$$

$$b = 1.56/(1+e^{-19.5m})$$

$$a = 1.36\ g(1-e^{-19m})$$

Per la valutazione di Γ si effettua una stima iniziale di $H_b = H_o K_r K_f K_s$ in cui:

$K_s = 0.76\ m^{1/7}\ (H_o/L_o)^{-1/4}$ — coefficiente di shoaling (Wang e Le Mehautè, 1980)

$K_r = (\cos\alpha_o/\cos\alpha_b)^{1/2}$ — coefficiente di rifrazione

mentre il coefficiente di attrito K_f è introdotto in forma parametrica.
Per quanto riguarda la modalità di frangimento delle onde sul profilo in esame, il modello fornisce la distribuzione dei valori dell'indice di breaking ε_b che permette di individuare la modalità di rottura prevalente, tenendo conto della ripidità dell'onda e della pendenza del profilo.

B.1.2 Calcolo dei parametri caratteristici della spiaggia

Il modello fornisce alcuni parametri utili a caratterizzare la fascia costiera ed in particolare a definire il limite al largo e a costa dell'area interessata dai fenomeni di trasporto e la zona dei frangenti.

B.1.2.1 Il limite al largo

La massima profondità verso il largo a cui si ha un trasporto attivo del sedimento dovuto al moto ondoso è valutata mediante la formula di Hallermeier (1978):

$$d_{lim} = 2.28\ H - 68.5\ H^2/(gT^2) \qquad [8]$$

dove H è l'altezza d'onda locale.
Nel modello la profondità limite d_{lim} è calcolata per ogni elemento della matrice del clima, ottenendo una distribuzione della profondità limite per ogni punto di calcolo del trasporto.

B.1.2.2 La linea dei frangenti

La profondità di frangimento è calcolata applicando la formula [7] per ogni elemento del clima.
Il modello fornisce la distribuzione della profondità di rottura per ogni punto di calcolo del trasporto.

B.1.2.3 Il limite a costa

Nell'area costiera assumono importanza i fenomeni di "set-up" e di "run-up": il primo è l'innalzamento medio del livello del mare che si ha in seguito alla diminuzione delle altezze d'onda conseguenti al flusso di massa verso profondità decrescenti; il secondo è la massima elevazione, al di sopra dell'innalzamento medio, raggiunta a riva dall'onda dopo il frangimento, dovuta al flusso di energia verso costa.
Il modello fornisce i valori massimi a riva del set-up e del run-up ed i valori corrispondenti al 50% e al 95% dei casi per i diversi punti di calcolo del trasporto, tenendo conto delle condizioni meteo-marine e morfologiche locali. Per il calcolo del set-up si utilizza la seguente relazione:

$$S = 5/16\Gamma H_b\ [1-5/6\pi\ H_b/(\Gamma L_o)\sin^2\alpha_o] \qquad [9]$$

dove:

L_o è la lunghezza;
α_o è l'angolo di incidenza dell'onda al largo;

$\Gamma=H_b/d_b$, H_b è l'altezza dell'onda alla rottura e d_b è la profondità dell'acqua al frangimento.

Per il calcolo del run-up R si utilizzano le formule di Svendsen e Jonsson(1976):

$$R = C_{pr} \tan(\beta)(H_o/L_o)^{-1/2} \qquad \text{per } \tan(\beta)(H_o/L_o)^{-1/2}$$

dove:

$\tan(\beta)$ è la pendenza del fondale
H_o/L_o è la ripidità dell'onda
C_{pr} è un coefficiente di riduzione che tiene conto della permeabilità e della rugosità del fondo ($C_{pr} \leq 1$).

B.1.3 Analisi delle condizioni di equilibrio del profilo di spiaggia

Da osservazioni effettuate da diversi autori è stato evidenziato il fenomeno di selezione dei sedimenti nella direzione ortogonale alla costa dovuto al trasporto trasversale; è stato così sviluppato un modello interpretativo del fenomeno basato sul concetto di dimensioni del sedimento in equilibrio.
Secondo tale modello, fissate le caratteristiche del moto ondoso, per ciascuna posizione nella zona di frangimento delle onde esiste una dimensione del sedimento tale per cui esso risulta in equilibrio. Il sedimento di dimensione minore della "dimensione di equilibrio" si muove verso il largo, quello di dimensione maggiore si muove verso costa.
E' possibile pertanto, note le caratteristiche del moto ondoso e la natura del sedimento, prevedere la direzione prevalente del trasporto trasversale; non è possibile invece valutare su tale base la sua intensità.
Hattori e Kamawata (1980) hanno evidenziato anche l'importanza della ripidità dell'onda e della pendenza del fondale sulla direzione del trasporto trasversale.
La relazione da loro proposta è:

$$I_H = (H_o m g T)/[L_o W(D_{50})] \qquad [10]$$

dove H_o, L_o, T sono rispettivamente l'altezza, la lunghezza e il periodo dell'onda al largo, $W(D_{50})$ è la velocità di sedimentazione delle particelle di diametro D_{50}, m è la pendenza del profilo del fondo, g è l'accelerazione di gravità.
Per valori dell'indice di Hattori $I_H < 0.5$ si ha trasporto verso costa, per $I_H > 0.5$ si ha trasporto verso il largo.
Il modello calcola la distribuzione dei valori dell'indice di Hattori mediante la [10], fornendo alcune indicazioni generali sull'equilibrio del profilo nelle condizioni di moto ondoso studiate, indicando se il profilo tende all'erosione, all'accrescimento oppure è in sostanziale equilibrio.

B.2. PARAMETRI DI INPUT

I parametri di input del modello sono:

- clima ondoso al largo;
- pendenza al largo e a costa del fondale nelle sezioni considerate;
- diametro medio del sedimento (D_{50}) in quattro fasce lungo la sezione considerata;
- l'orientazione della costa;
- il settore di esposizione della costa.

B.3. CARATTERISTICHE DELL'OUTPUT

Il modello fornisce in output:

- valori del trasporto netto e del trasporto longitudinale nei due sensi;
- distribuzione del trasporto per classi di altezza d'onda e direzione;
- distribuzione del trasporto in funzione della profondità;
- distribuzione della profondità di frangimento delle onde;
- distribuzione della profondità limite della spiaggia sommersa in funzione dell'altezza d'onda;
- distribuzione dell'indice di Hattori e dell'indice di frangimento;
- valori medi al 95% e massimi del set-up e run-up delle onde;
- flusso medio di energia a costa e direzione media del flusso.

B.4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Komar P.D., 1976 - "Beach Processess and Sedimentation"; Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs.
- Kamphuis J.W., Readshow J.S., 1978 - "A Model Study alongshore Sediment Transport Rate"; XVI Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany.
- Swart D.H, 1976 - "Predictive Equation regarding Coastal Transport", XV Coastal Engineering Conference, Honolulu, Hawaii.
- Shore Protection Manual, 1977 - U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Department of the Army Corps of Engineers.
- Wang D.J., Le Mehaute B., 1980 - "Breaking Wave Characteristics on a Plane Beach"; XVII Coastal Engineering Conference.
- Hallermeier R.J., 1978 - "Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion", XVI Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany.
- Basco D.R., 1982 - "Surf Zone Currents"; Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Miscellaneous Report N. 82-7.
- Svendsen I.A., Jonsson I.G., 1975 - "Hydrodynamics of Coastal regions"; Den Private Ingenirfond; Technical University of Denmark, Lyngby.

- Hattori M., Kawamata R., 1980 - “Onshore - Offshore Transport and Beach Profile Change”, XVII Coastal Engineering Conference, Sidney, Australia.

- Sunamura T., 1980 “A Laboratory Study of offshore Transport of Sediment and a Model for Eroding Beaches”; XVII Coastal Engineering Conference, Sidney, Australia.

APPENDICE C: MODELLO NUMERICO "SBEACH"
"STORM INDUCED BEACH CHANGE MODEL"

Sviluppato presso l'US Army Corps of Engineers (Larson *et al.,* 1990), il modello **SBEACH** simula in maniera accurata l'evoluzione di un profilo di spiaggia arbitrario sottoposto a variazioni del livello del mare e dell'energia del moto ondoso incidente.
Tale modello è stato sviluppato a seguito di uno studio finalizzato alla comprensione dei rapporti "causa-effetto" tra i fattori che determinano il profilo di spiaggia e, quindi, alla previsione dell'evoluzione del profilo.

La proprietà fondamentale del modello è riprodurre in modo deterministico le principali caratteristiche del profilo a partire da relazioni empiriche per il trasporto sedimentario trasversale alla costa ("cross-shore") indotto dalle onde, trascurando gli aspetti su piccola scala ed evitando descrizioni complesse del flusso del trasporto sedimentario: l'analisi a macroscala (metri, ore) ha permesso la semplificazione della trattazione delle variazioni del profilo di spiaggia, nonostante la complessità dei processi coinvolti.

Il punto di maggiore forza di **SBEACH** consiste nell'inserimento della crescita e del movimento delle barre come parte integrante delle variazioni del profilo di spiaggia, considerando che queste strutture costituiscono una protezione naturale per le spiagge esposte a forti processi erosivi.

Dato un profilo iniziale del fondo, il modello assume che le variazioni del profilo siano dovute alle onde che frangono, e principalmente alle onde corte (con periodi compresi tra 3 e 20 secondi).
L'area investigata dal modello è la spiaggia "emersa e sommersa" compresa tra il limite superiore rappresentato dal limite di run-up, ed il limite inferiore posto al largo alla profondità a cui non avviene trasporto trasversale significativo. Una delle assunzioni fondamentali del modello è l'esistenza di un profilo di equilibrio della spiaggia, se sottoposta a condizioni costanti di moto ondoso per tempi sufficientemente lunghi.
Il trasporto "cross-shore" è determinato dalle caratteristiche dell'onda locale, del livello del mare e dalle proprietà del profilo iniziale.

La distribuzione delle altezze d'onda utilizzata per il calcolo del trasporto è ottenuta applicando la teoria lineare delle onde al di fuori della "surf-zone" , mentre all'interno della fascia dei frangenti (dalla profondità di frangimento fino alla costa) la distribuzione delle altezze d'onda è ottenuta applicando il modello di decadimento dei frangenti (Dally, 1980), ampiamente validato.
Nel calcolo della distribuzione delle altezze d'onda sono incorporati gli effetti di "set-up" e "run-up" delle onde, mediante la risoluzione dell'equazione:

$$\frac{d\,S_{xx}}{dx} = -\,\rho\, g(h+\eta)\frac{d\eta}{dx} \qquad [1]$$

dove S_{xx} è il radiation stress diretto verso la costa e η è l'elevazione della superficie del mare.

Il modello è strutturato in modo tale che ad ogni passo temporale di calcolo:

- effettua la suddivisione del profilo di spiaggia in regioni specifiche a seconda delle caratteristiche delle onde locali, allo scopo di specificare le caratteristiche del trasporto;
- calcola il trasporto trasversale alla costa in ciascuna delle suddette regioni del profilo;
- calcola, infine, le variazioni indotte nel profilo applicando l'equazione di conservazione della massa al trasporto trasversale.

Le quattro regioni specifiche sono la *zona I* ("prebreaking") compresa tra il limite al largo ed il punto di breaking, la *zona II (*di transizione dei frangenti) compresa tra il punto di frangimento ed il "plunge point" (punto in cui il frangente si ricurva su se stesso movendosi verso la spiaggia), la *zona III* compresa tra il "plunge point" ed il punto in cui le onde si riformano, rappresenta la l'area in cui le onde sono completamente rotte e la loro energia decade gradualmente, ed infine la *zona IV* ("swash zone") che si estende fino al limite di "run-up".

Nella zona I la distribuzione del trasporto viene determinata nei pressi del punto di frangimento, secondo l'equazione

$$q = q_b \, e^{-\lambda (x - x_b)} \qquad [2]$$

dove q_b rappresenta la frazione del trasporto nel punto di frangimento, x_b è la posizione del punto di frangimento rispetto alla linea di costa e λ è un coefficiente di decadimento spaziale stimato empiricamente. Quindi nella zona I il trasporto decade in maniera esponenziale con la distanza dalla costa.

La limitata estensione della zona II non permette la definizione quantitativa delle caratteristiche del trasporto netto, che viene derivato calcolato a partire dalle variazioni medie del profilo, mentre nella zona III l'andamento del trasporto mostra una buona correlazione con quello dell'energia dissipata per unità di volume di acqua, derivante dal modello di decadimento di energia dei frangenti di Dally.

$$q = \begin{cases} 0 & D < D_{eq} - \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \\ K\,(D - D_{eq} + \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} & D > D_{eq} - \dfrac{\varepsilon}{K}\dfrac{dh}{dx} \end{cases} \qquad [3]$$

Dove K è un coefficiente empirico per il trasporto, il cui valore è può essere compreso tra 1.1-1.9 10^{-6} m^4/N, D è l'energia dissipata per unità di volume, ε un coefficiente empirico

per il termine del trasporto dipendente dalla pendenza pari a 0.001 m^2/sec., D_{eq} è l'energia dissipata in condizioni di equilibrio (quando il trasporto netto mediato nel tempo è nullo attraverso una qualunque sezione del profilo).

In corrispondenza della zona IV il trasporto è una funzione della pendenza del profilo, delle caratteristiche del sedimento e delle proprietà delle onde che risalgono la spiaggia emersa. La mancanza di dati relativi a tali fattori non ha permesso la derivazione di una relazione tra la quantità di materiale trasportato ed i suddetti fattori.
Tuttavia sono state effettate varie osservazioni qualitative, che hanno dimostrato la riduzione approssimativamente lineare del trasporto in direzione della spiaggia.

La direzione prevalente del trasporto trasversale è determinata mediante l'equazione:

$$\frac{H_0}{L_0} = M\left[\frac{H_0}{wT}\right]^3 \qquad [4]$$

che rappresenta la relazione tra la ripidità delle onde in acque profonde (H_0/L_0) ed il parametro dimensionale che tiene conto della velocità di caduta del sedimento (H_0/wT), sviluppato inizialmente come criterio per la previsione di formazione di profili di berma (trasporto "onshore" prevalente) o di barra (trasporto "offshore" prevalente).

Un'ampia descrizione del modello è riportata nel documento " Mathematical modeling of the fate of beach fill" (M. Larson, N.Kraus, Coastal Engineeering, 16 (1991) 83-114) al quale si rimanda per i dettagli.