



Direzione Centrale Risorse, Organizzazione e Sistemi
Centro per l'Alta Formazione

Percorso di Formazione:
“ La difesa della strada dai pericoli naturali”
Roma Febbraio-Marzo-Aprile 2015
Difesa del corpo stradale: Valanghe, debris flow e **Marittima**

Eugenio Pugliese Carratelli-Fabio Dentale
Elementi di idraulica marittima
Parte prima:
Valutazione del moto ondoso

www.eugeniopc.it/ANAS2015/ANAS2015.htm

Oppure : Google EPCDIDATTICA
epc@unisa.it

Valutazione del moto ondoso

Che cos'è un onda

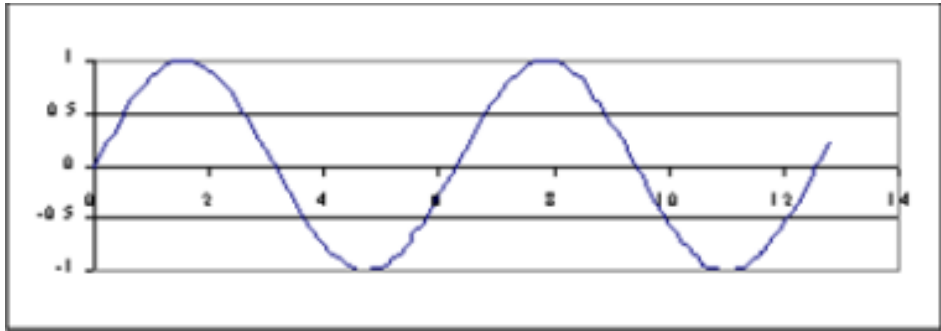
Stato di mare e mareggiata: cosa sono, come si misurano

Clima marino: cos'è, come si caratterizza

Che cos'è un'onda

non è una definizione facile. Partiamo da un'astrazione, uno schema matematico che assomiglia soltanto alle onde vere, ma che permette di ricostruire teoricamente molti effetti che sono presenti nel comportamento delle onde reali

Onda «lineare» di Airy o di Stokes I, valida a rigore per onde "infinitamente" piccole (= molto piccole) e che - nonostante questo limite - è alla base di gran parte delle applicazioni ingegneristiche. Nel seguito descriviamo le caratteristiche di questa soluzione, senza entrare nel dettaglio matematico.



$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t + \psi)$$

valida a rigore per onde "infinitamente" piccole (= molto piccole) e che - nonostante questo limite - è alla base di gran parte delle applicazioni ingegneristiche

"treno d'onda" per indicare che non si tratta di una singola onda, ma di una successione teoricamente infinita

Airy fornisce in primis il valore dell'altezza istantanea d'acqua $\eta(x,t)$ e delle altre variabili fluidodinamiche come funzione del tempo t e dello spazio x :

con:

$\sigma = 2\pi/T$ (velocità angolare, pulsazione)

$k = 2\pi/L$ (numero d'onda)

L'onda è progressiva: per chiarire questa osservazione, *si consideri cosa osserva un osservatore che misuri la η nelle seguenti condizioni:*

1 Fermo,

2 In moto lungo l'asse x con celerità $C=L/T$

3 Si consideri inoltre una configurazione istantanea ($T=T_0$)

I valori di $\sigma=2\pi/T$ e di $k=2\pi/L$ (e quindi di T ed L) non sono liberi, ma sono collegati tra di loro, e con la profondità h attraverso la seguente relazione cosiddetta “di dispersione”

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

Altre forme:

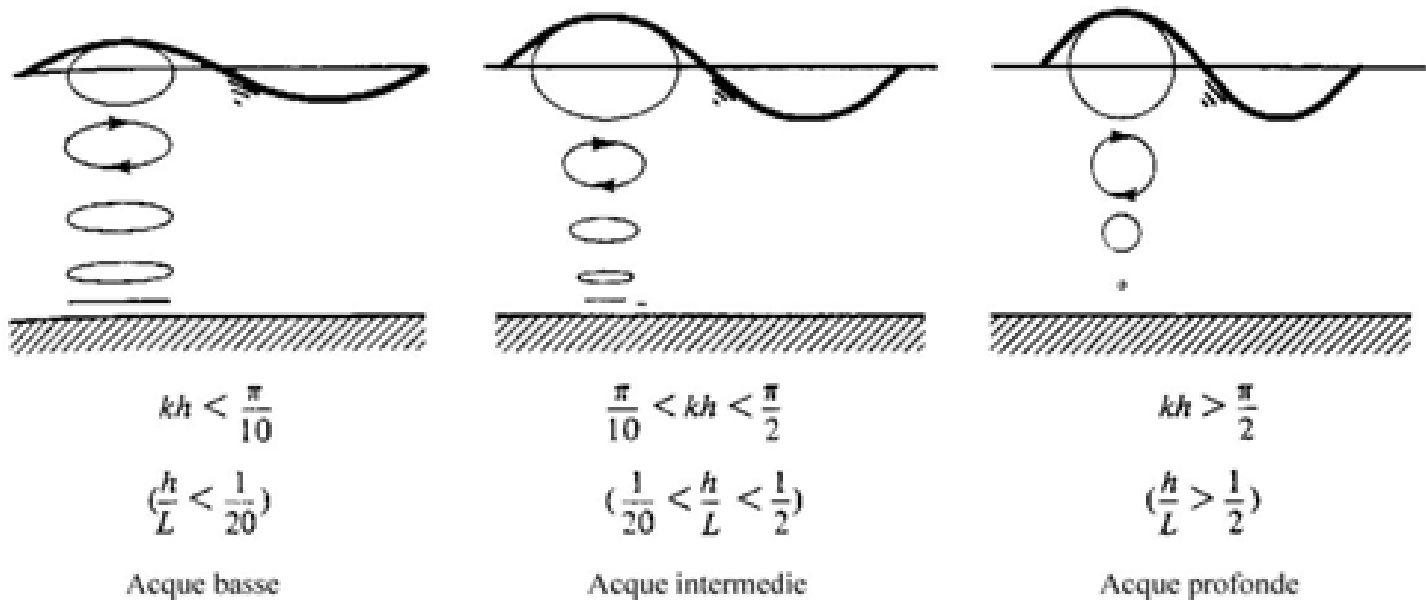
$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

$$C = \frac{g}{2\pi} T \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

C si chiama «velocità dell'onda» o «Celerità» e rappresenta la velocità con cui si muove il fenomeno

All'interno di un'onda, le particelle d'acqua si muovono : *velocità orbitale*

Le traiettorie sono diverse a seconda della profondità



Al diminuire del fondale le onde variano di altezza, di lunghezza, e di celerità. Il periodo resta costante Questo effetto si chiama shoaling.

Ad un treno d'onda è associata un'energia

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

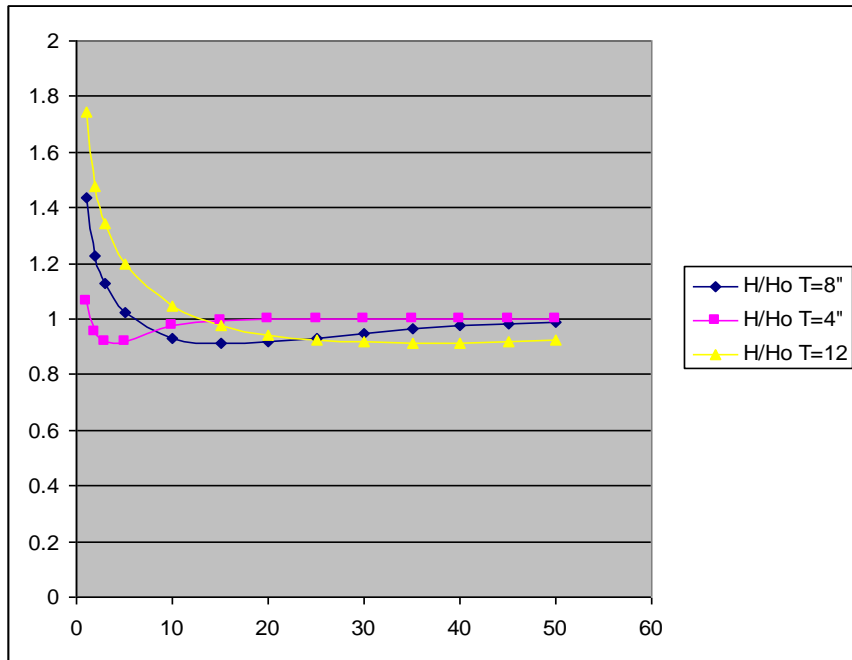
ed un flusso di energia

$$F = E C_g$$

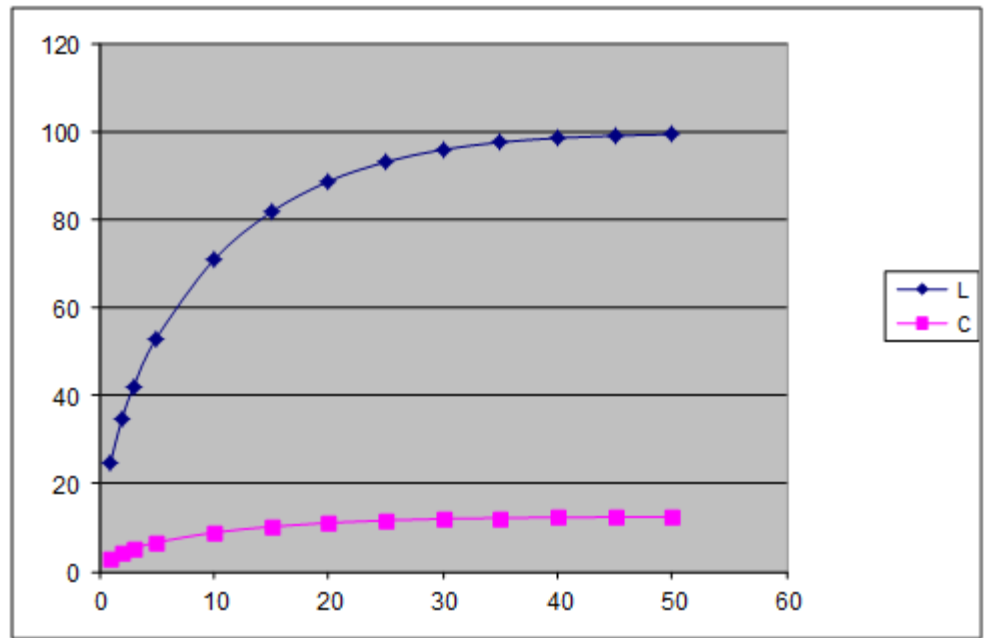
C_g si chiama velocità di gruppo e rappresenta la velocità con cui si muove l'energia

E' legata a C , ma non è eguale a C (coincide solo su bassi fondali)

shoaling.



h

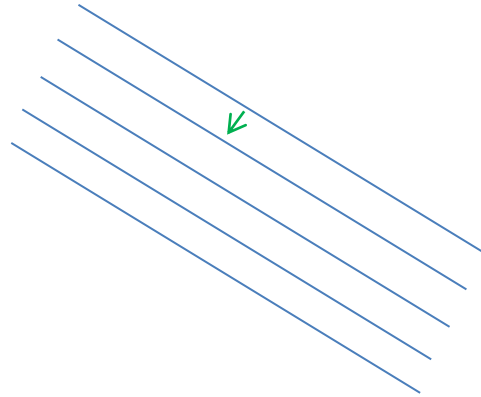


h

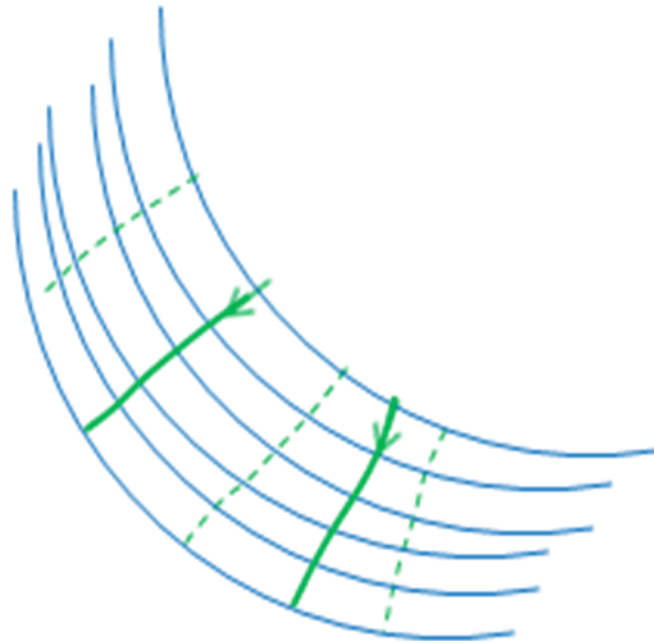
*Le onde si muovono su un piano (due dimensioni!)
Gli effetti che governano il comportamento delle onde sul piano orizzontale si
chiamano: rifrazione diffrazione riflessione*



Immaginiamo un treno d'onda di Airy/Stokes I, che si muova sulla superficie del mare. Per visualizzarlo dall'alto, immaginiamo di marcare tutti i punti di egual fase – ad esempio, tutte le creste, o tutti i cavi. Si ottengono così i *"fronti d'onda"* (anche: *"piani d'onda"*);



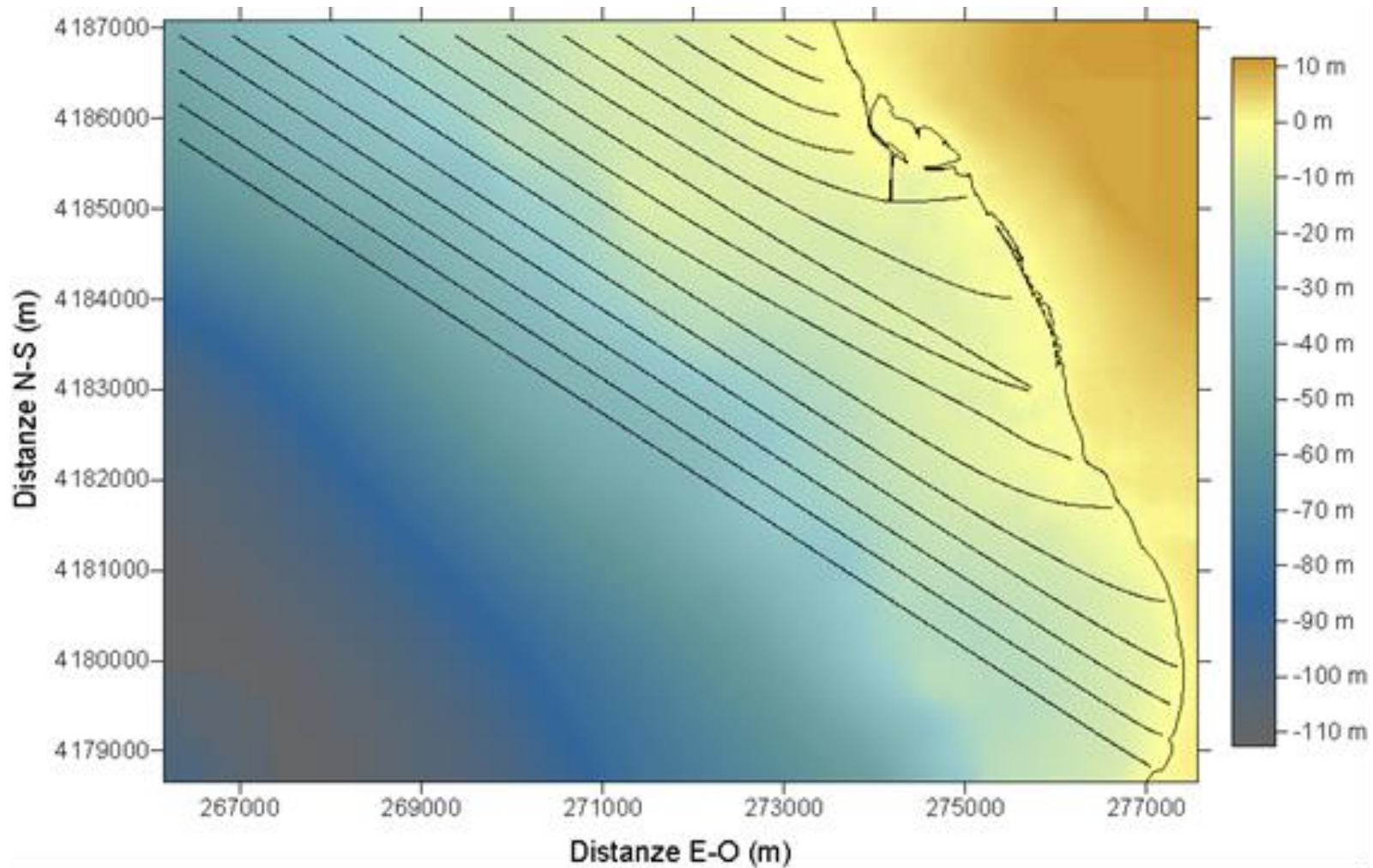
I piani d'onda (in blu nelle figure) possono però essere anche curvi: se la curvatura non è eccessiva, i risultati dell'onda monodimensionale si possano utilizzare considerando però il fenomeno, non più lungo una retta, bensì lungo linee curve ("raggi", linee verdi spesse) ortogonali localmente ai fronti.



La legge di Snell (analoga a quella dell'ottica) lega direzione θ_1 del raggio d'onda rispetto al gradiente della batimetria * in un punto in cui la celerità è C_1 , con gli stessi parametri θ_2 e C_2 in un altro punto generico:

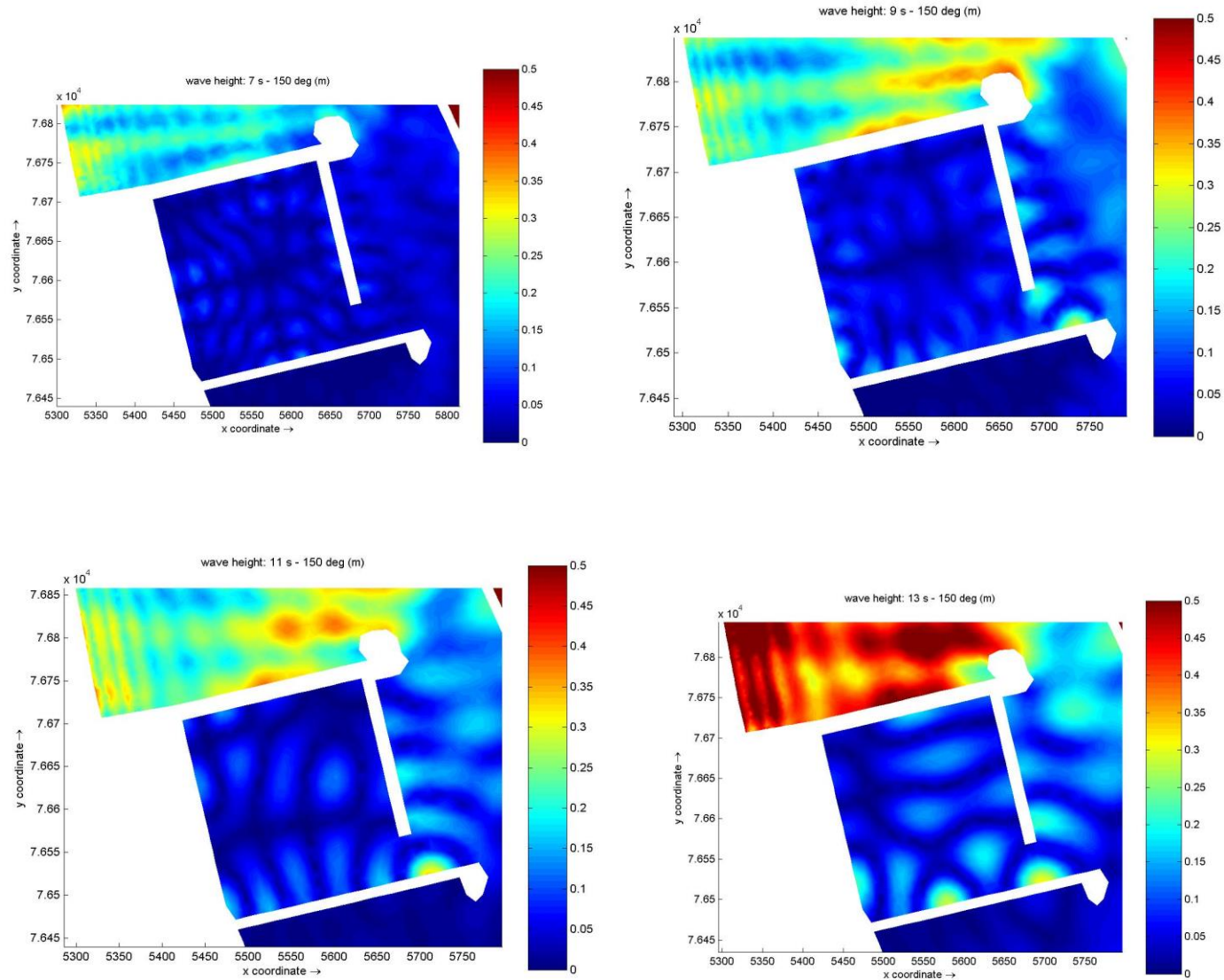
$$\frac{C_1}{\sin(\theta_1)} = \frac{C_2}{\sin(\theta_2)} \quad \sin(\theta_1) = \frac{C_1 \sin(\theta_2)}{C_2}$$

* in una batimetria rettilinea ed uniforme coincide con la perpendicolare alla costa



Lo shoaling, per semplici geometrie, si può trattare facilmente anche sui *fogli excel*
 Il calcolo della rifrazione richiede invece un software un po' più elaborato.
 Il calcolo dei raggi d'onda congloba anche il calcolo dello shoaling

In spazi ristretti (dell'ordine della lunghezza d'onda), il movimento delle onde è governato invece dalla *diffrazione* e dalla *riflessione*.
Questo è importante soprattutto nei porti ed in vicinanza delle opere costiere

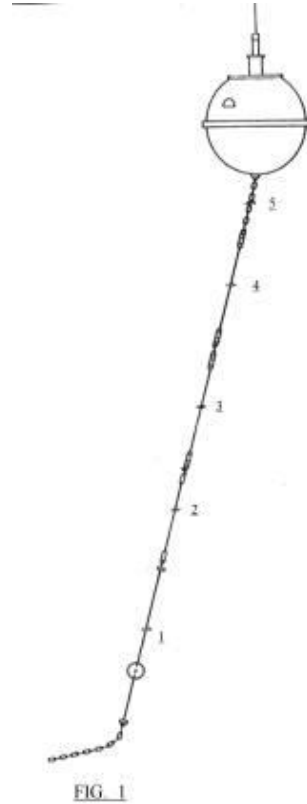


Stato di mare e mareggiata: cosa sono, come si misurano



Le onde (**onde reali**) che si generano in mare sotto l'azione del vento hanno una forma estremamente complessa; l'esperienza comune, così come le registrazioni effettuate in campo, indicano che le altezze, i periodi, le lunghezze d'onda e le direzioni di propagazione delle onde reali risultano variabili in maniera caotica.

La maggior parte rilievi del moto ondoso sono effettuati con ondametri, cioè con apparecchiature che registrano l'altezza istantanea d'acqua $\eta(t)$ in un punto ben definito.



<http://www.eugeniopc.it/investigacion/ondametricia/Field.htm>

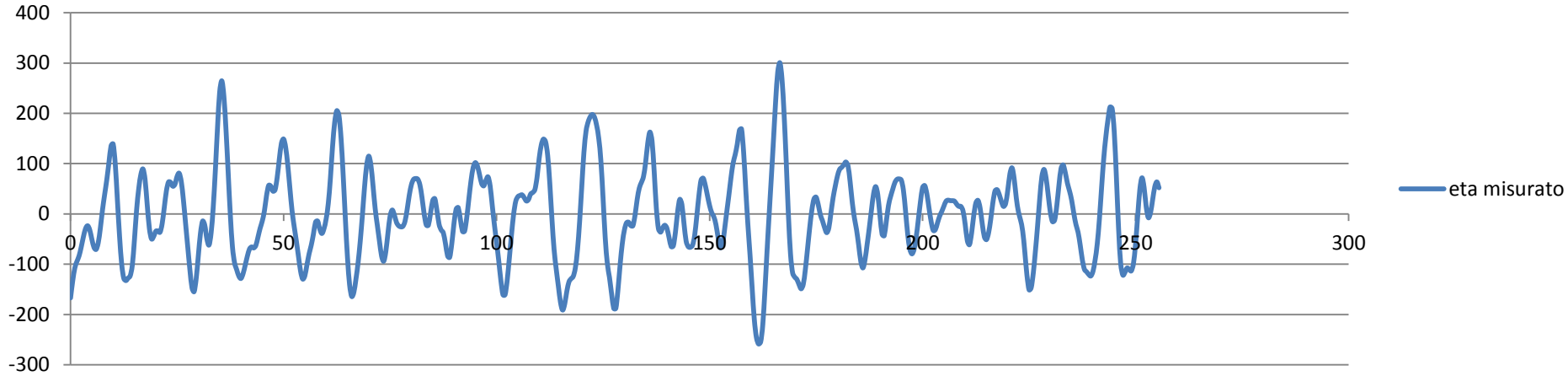
- Ecco alcuni siti che riporta(va)no dati storici o in tempo quasi reale
-
- *Il sito dell'ISPRA – ex ANPA ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale contiene utili informazioni sulla Rete Ondametrica RON. Bisogna iscriversi, e non sempre funziona!*
-
- www.telemisura.it solo dati in tempo reale
-
-
- http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html
- (Spagna)
-
- www.channelcoast.org/data_management/real_time_data/charts/
- (Regno Unito, Manica)
-

Il dato «grezzo» misurato $\eta(t)$ *misurato dall' ondometro si chiama «altezza istantanea d'acqua»

(* rispetto al valore medio: quindi il valore medio di η è =0)

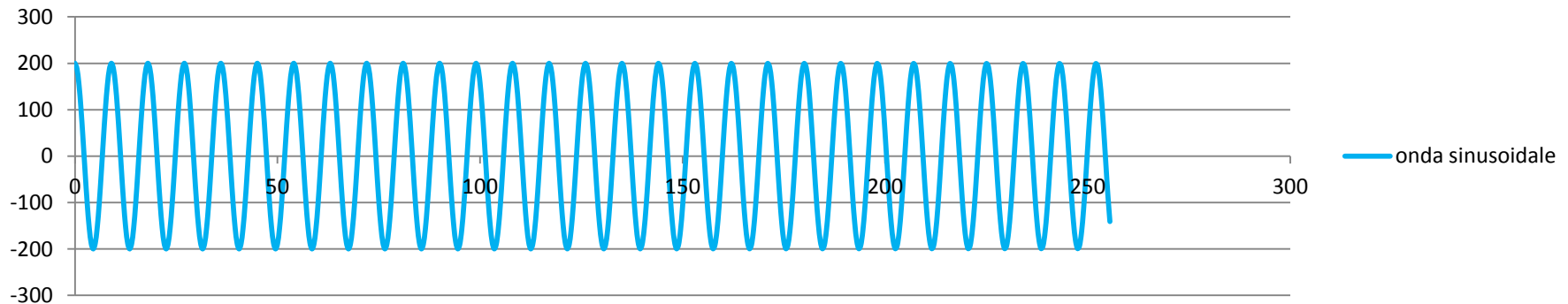
Ecco un esempio:

eta misurato



Ben diverso dalla sinusoide che avevamo immaginato!!

cos(6t)



Si deve quindi definire il concetto stesso di "onda" in un mare caratterizzato da un'agitazione caotica (si dice spesso "casuale", oppure "random");

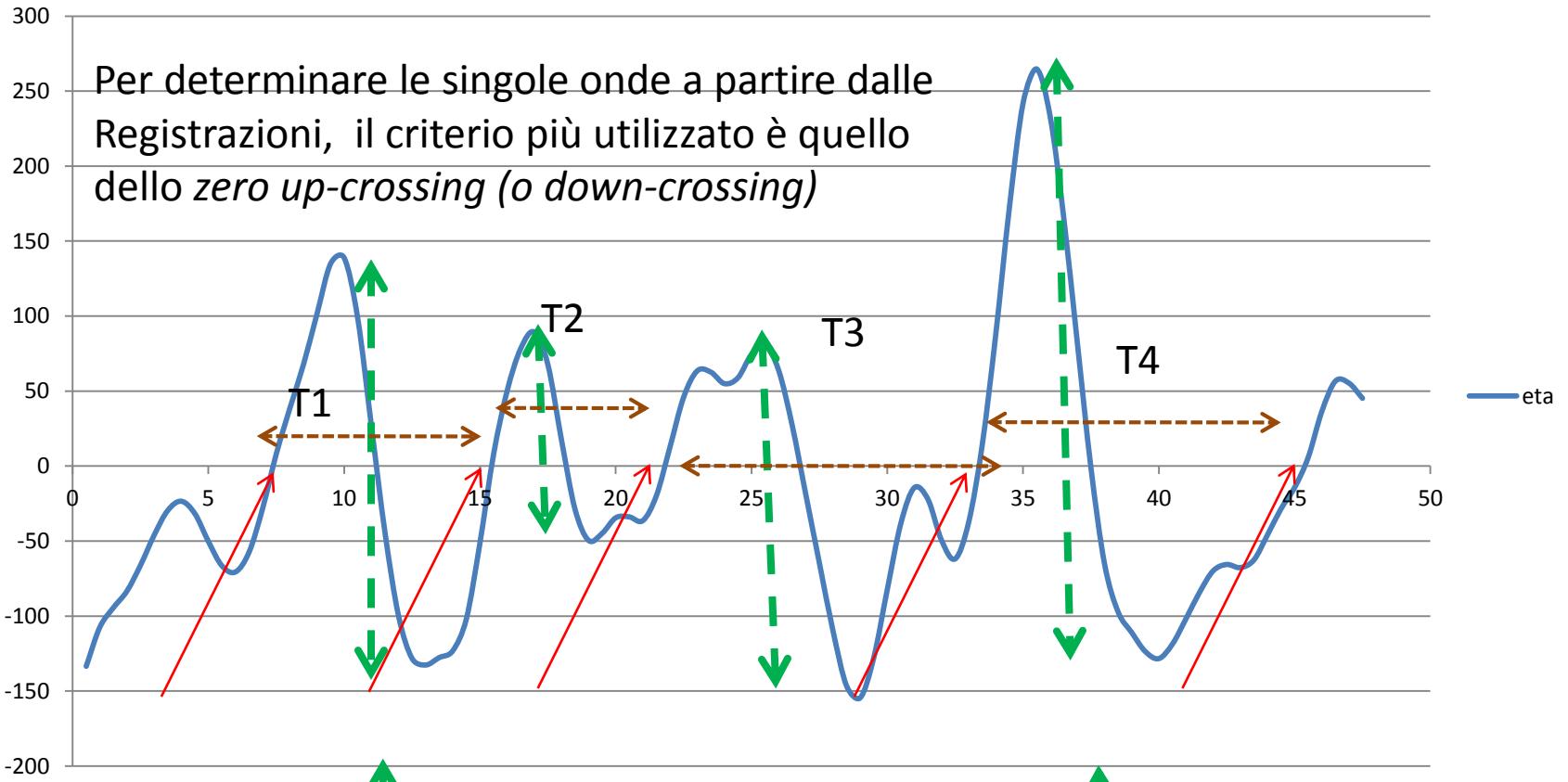
Proprio perché l'agitazione è caotica, bisogna considerare periodi di osservazione abbastanza lunghi da permettere il calcolo di parametri statistici; ci si riferisce dunque agli "stati di mare«

Tipiche lunghezze per uno «stato di mare» sono 20'-30'-, 1h, 3h, a seconda dei periodi di misura degli ondometri

Attenzione a non l'altezza istantanea d'acqua $\eta(t)$ con l'altezza di una singola onda!

analisi empirica

eta



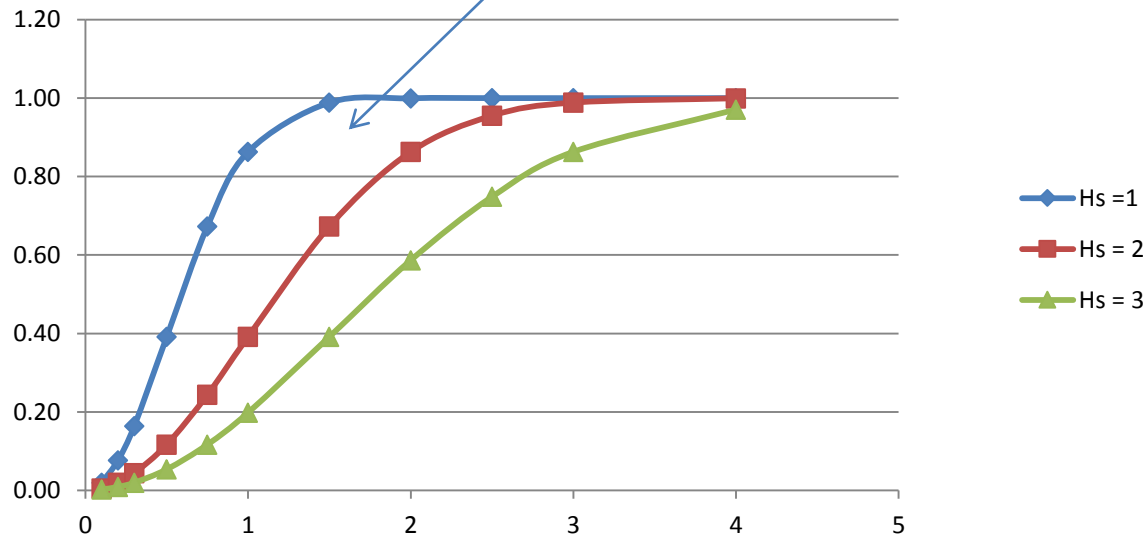
Per determinare le singole onde a partire dalle Registrazioni, il criterio più utilizzato è quello dello *zero up-crossing* (o *down-crossing*)

Si ottengono dunque serie discrete di valori:
.... H_i ...
.... T_i ...

Le altezze delle onde in un certo stato di mare si distribuiscono secondo la di distribuzione statistica ("Rayleigh"): $p(H)$, che fornisce la densità di probabilità di un'onda di altezza H in uno stato di mare caratterizzato dal parametro H_{rms} ; la corrispondente probabilità cumulata $P(H)$ fornisce la probabilità che una data onda sia minore di H .

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left(\frac{-H^2}{H_{rms}^2}\right)$$

$$P(H) = 1 - \exp\left(\frac{-H^2}{H_{rms}^2}\right)$$



Attenzione a non confondere i parametri statistici (H_m , H_s , ..) con l'altezza di una singola onda!

Dal punto di vista applicativo interessano i valori statistici delle onde in un dato stato di mare. I parametri più in uso sono i seguenti:

Hs = $H_{1/3}$ onda significativa, valore medio del terzo più alto delle H_i

Hrms onda quadratica media,
(media quadratica delle altezze d'onda H_i),

$$H_{rms} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H^2 \right\}^{1/2}$$

Tm: Periodo medio (media dei T_i)

Altri parametri di impiego meno comune:

Hm (media delle H_i),

H_{1/10} **H_{1/100}** (altezza "un decimo", "un centesimo", utili per la progettazione di alcune opere)

Ts: Periodo dell'onda significativa

Un parametro molto importante è poi $\underline{\sigma}_\eta$, (deviazione standard delle altezze istantanee d'acqua η)

$$\sigma_\eta = \frac{\sqrt{\int \eta^2 dt}}{\text{Durata}}$$

$\underline{\sigma}_\eta$ è anch'esso un parametro caratteristico dello stato di mare, ed a esso sono legati, i parametri della distribuzione delle H_i ; in particolare: $\underline{\sigma}_\eta = H_s/4$

Tutti questi parametri sono legati tra di loro attraverso semplici relazioni.

Attenzione a non confondere i parametri statistici (Hm, Hs, ..) con l'altezza di una singola onda H_i !

analisi spettrale

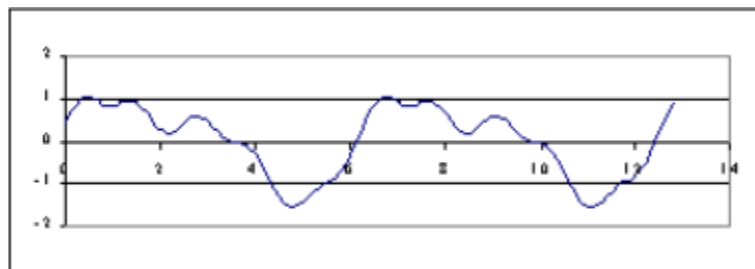
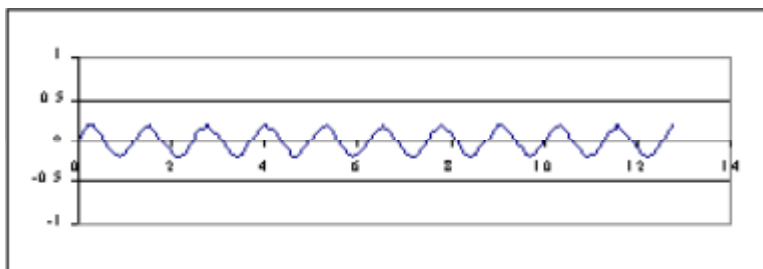
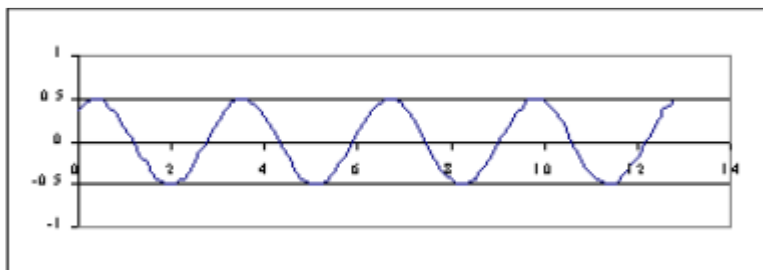
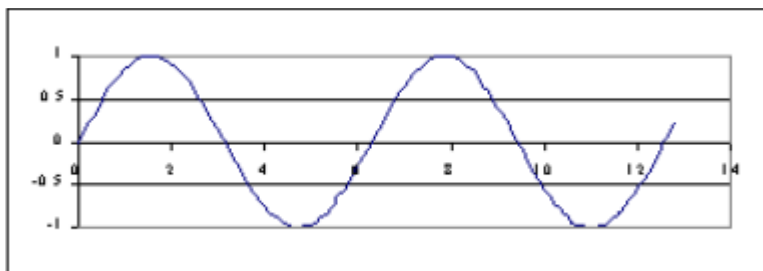
Un altro modo di caratterizzare uno stato di mare è quello basato sull'**analisi spettrale** dell'altezza d'acqua istantanea η .

In termini puramente intuitivi:

mettiamoci nei panni di un osservatore (un ondometro) che in un punto fisso misuri l'altezza istantanea $\eta(t)$. Qualunque $\eta(t)$ è rappresentabile tramite una somma di N termini (co)sinusoidali:

$$\eta(t) = \sum_{j=1}^N a_j \cos(\omega_j t - \phi_j)$$

Dove N ("numero di componenti") è in generale molto grande; a_j è l'ampiezza, ω_j la pulsazione e Φ_j la fase della j -ma "componente" a pulsazione ω_j ; i valori di Φ_j sono arbitrari e possono essere assegnati liberamente per i nostri scopi; i valori di a_j rappresentano i pesi delle varie componenti di frequenza ω_j – anche noti come **coefficienti della serie di Fourier**-.

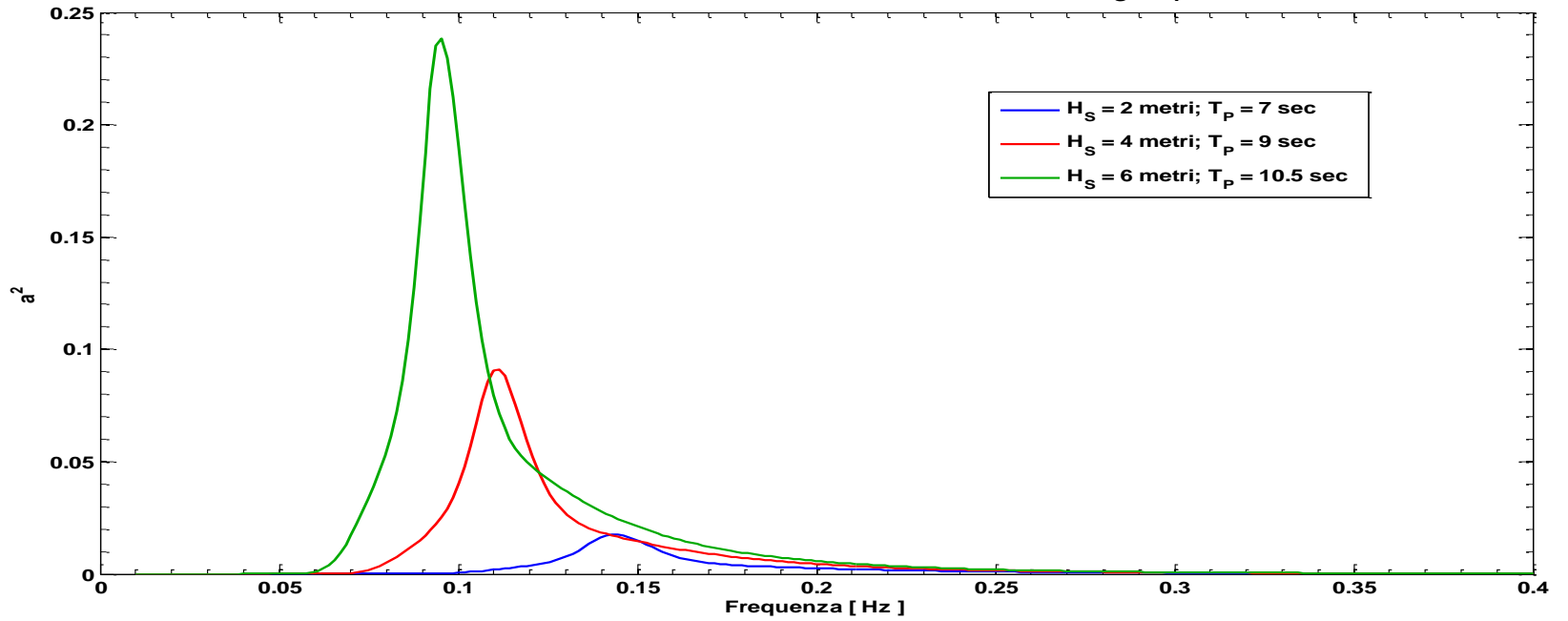


La funzione a destra puo' essere vista come somme di «molte» sinusoidi di frequenza man mano crescente, e di ampiezza a_i

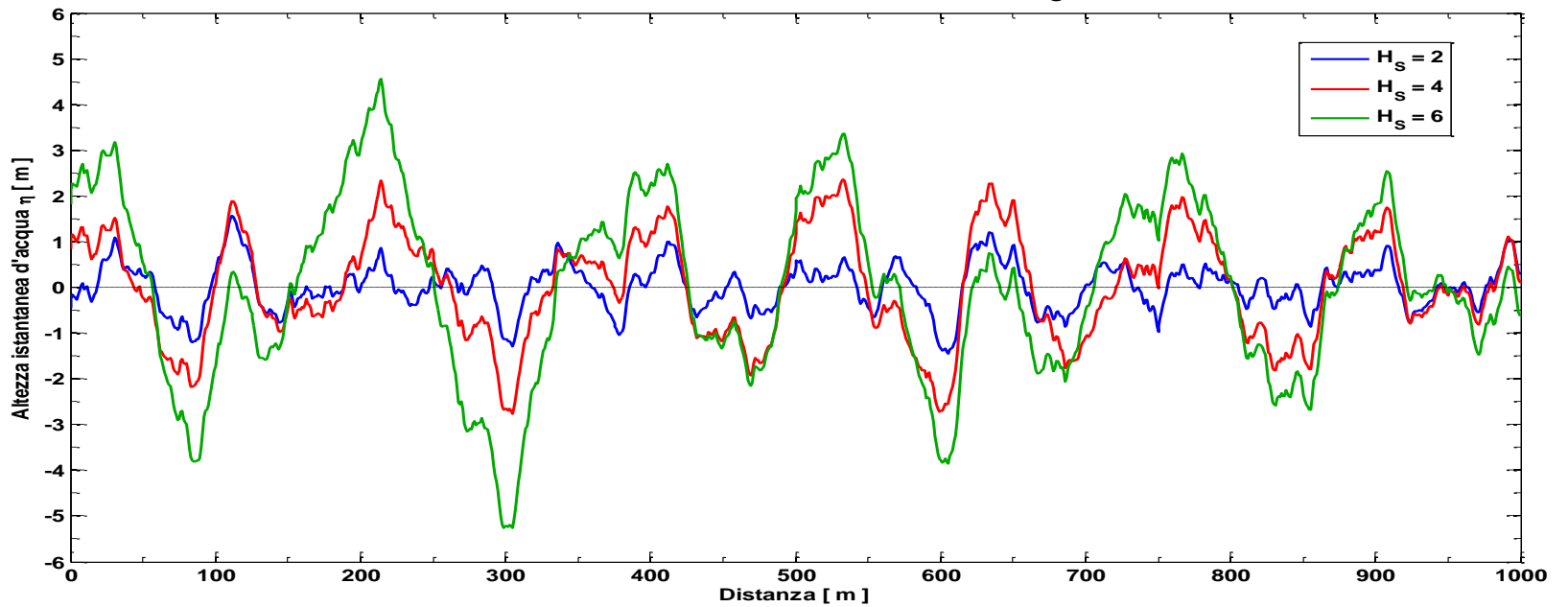
La successione delle a_i è la serie di Fourier; la successione delle a_i^2 è lo spettro di potenza (nel discreto) .

Questi concetti si possono estendere al continuo

Spettri JONSWAP per differenti valori dei parametri H_S e T_p



Confronto diverse Altezze Significative H_S



«lo studio meteomarinario» ; Come si misura, come si caratterizza il clima del moto ondoso

«*Clima* « è un termine generico; intendiamo qui i parametri – di carattere necessariamente probabilistico - degli stati di mare in un determinato sito, necessari alla valutazione del rischio ed alla progettazione delle opere.

I parametri da determinare dipendono dal tipo di opera e dalla sua posizione: nel caso che trattiamo qui – la strada litoranea – interessano due tipi di valutazioni:

1) I valori dei parametri degli stati di mare (H_s , T_m ...) più intensi (**Valori estremi**) in funzione della loro probabilità («tempo di ritorno») : per la valutazione del rischio di allagamento o di non percorribilità o di danni strutturali diretti della strada

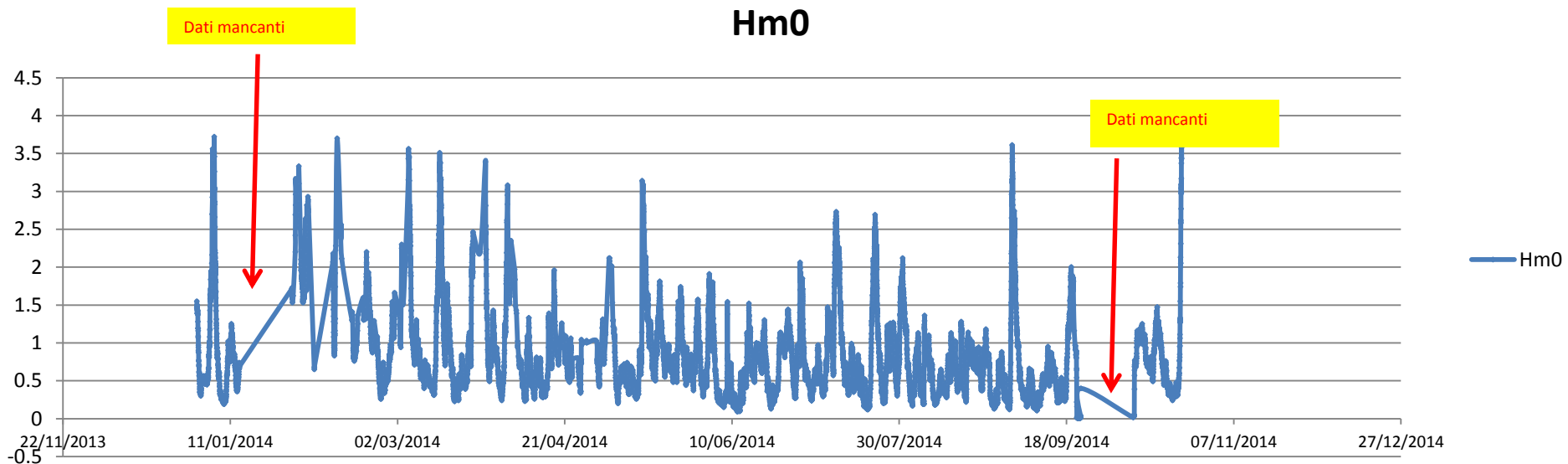
2) I **valori medi e le direzioni medie** degli stati di mare: per la valutazione del rischio di danni indiretti, causati dall' erosione

Per l'uno e per l'altro caso ci limiteremo a illustrare i metodi di studio relativi ad un sito al largo; i metodi per il trasporto dei risultati alla costa sono basati sulle tecniche illustrate prima

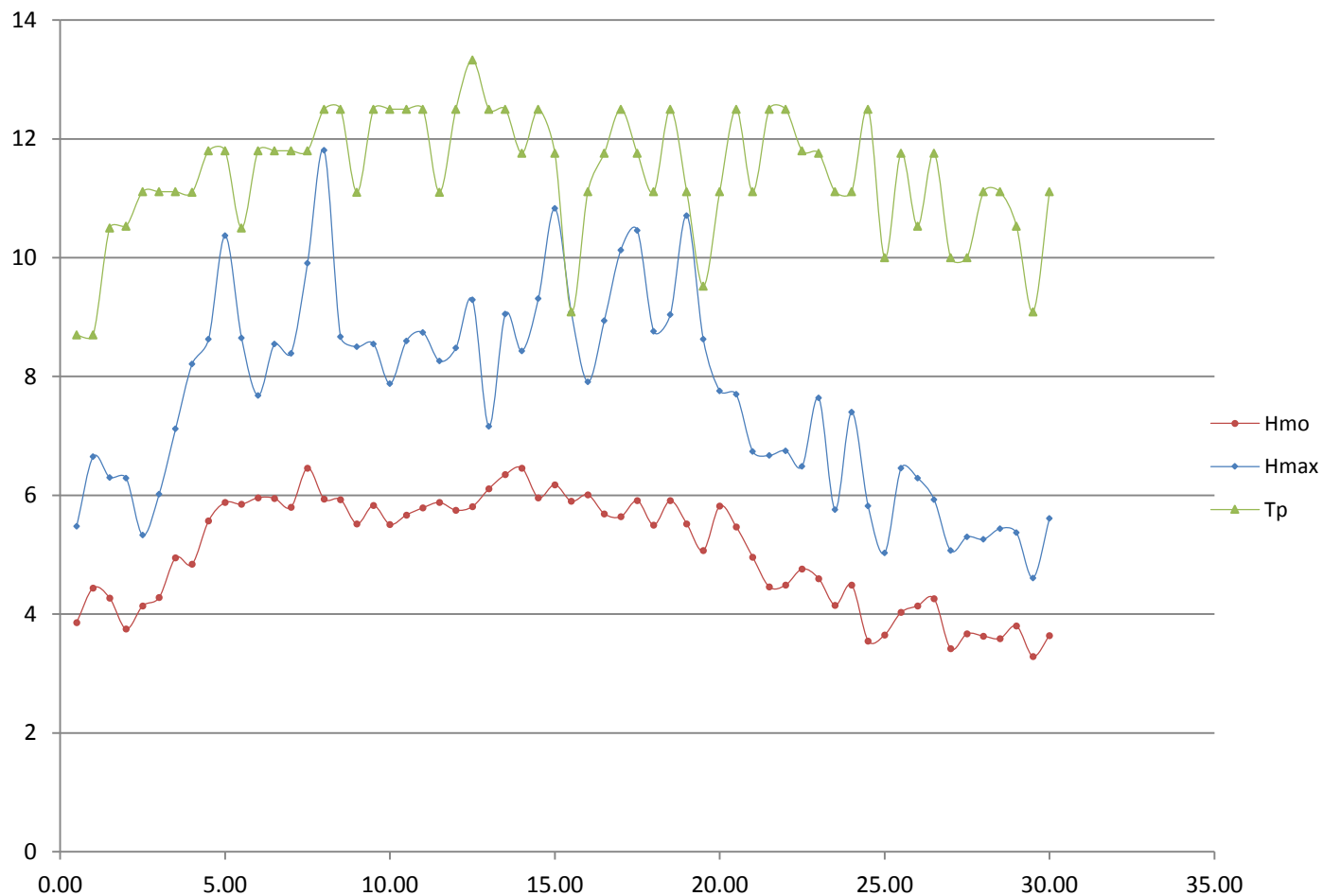
L'universo statistico è quello degli stati di mare; in particolare degli Hs o dei Tp, o dei Tm, - degli eventi triorari o semi-orari misurati dagli ondometri o prodotti dai modelli. Gli Hs o gli Tp, o gli Tm sono parametri statistici del gruppo di onde di ciascuno stato di mare: diventano poi a loro volta le variabili casuali delle analisi statistiche, .

Dati di origine per la valutazione delle azioni del «clima ondoso»:
Una successione di parametri di stati di mare Misurati o «sintetici»

Spesso provenienti da un ondometro: (Normalmente ogni 20'-30')



Dati ISPRA- boa di Mazara Cortesia Ing Nardone



Valori dell'altezza significativa H_s (SWH) rilevati e mediati ogni 30' dalla boa ISPRA di Crotona – dalle 01/12/2013 ore 0.00 alle 02/12/2013 del 7.00.00 (la recente tempesta "Nettuno"), Notare che i valori di H_{m0} ($=H_{1/3}$) non sono poi eccezionali. Invece quelli di H_{max} sono molto alti ed anche stranamente irregolari. *Dati ISPRA non ancora verificati ed analizzati - Cortesia Ing Nardone*

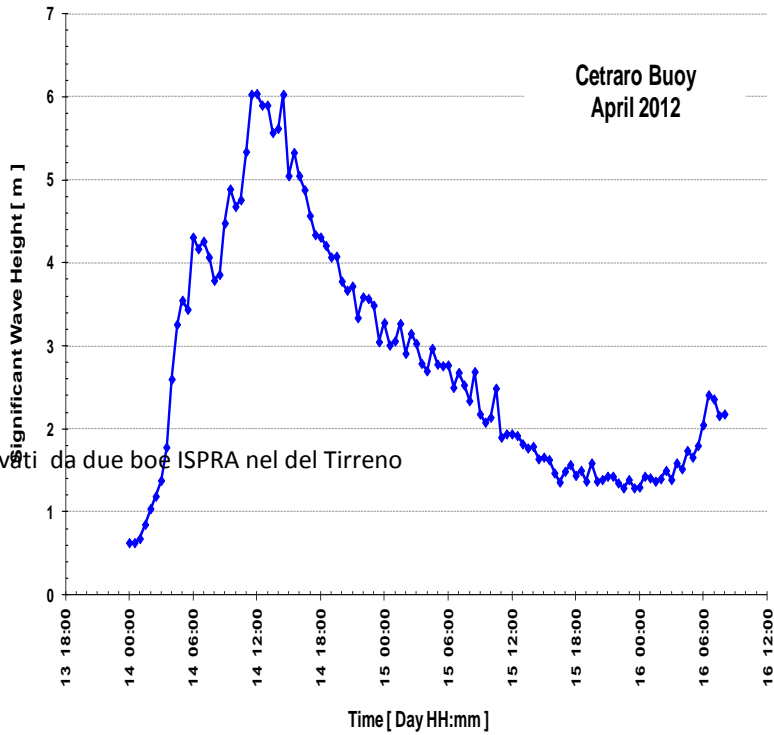
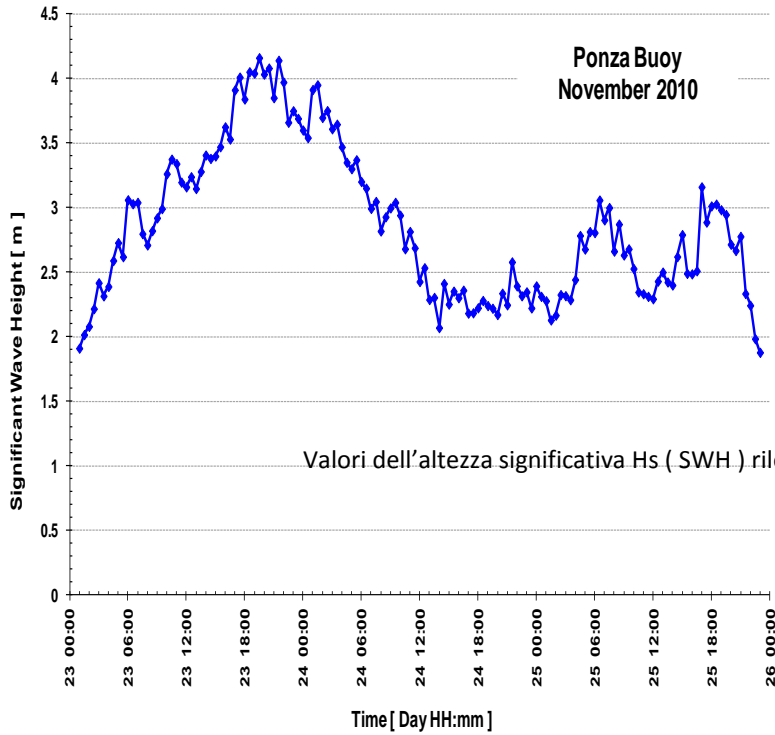
Richiamando quanto detto prima:

Onde: ricavabili dalla registrazione dell' altezza d'acqua $\eta(t)$

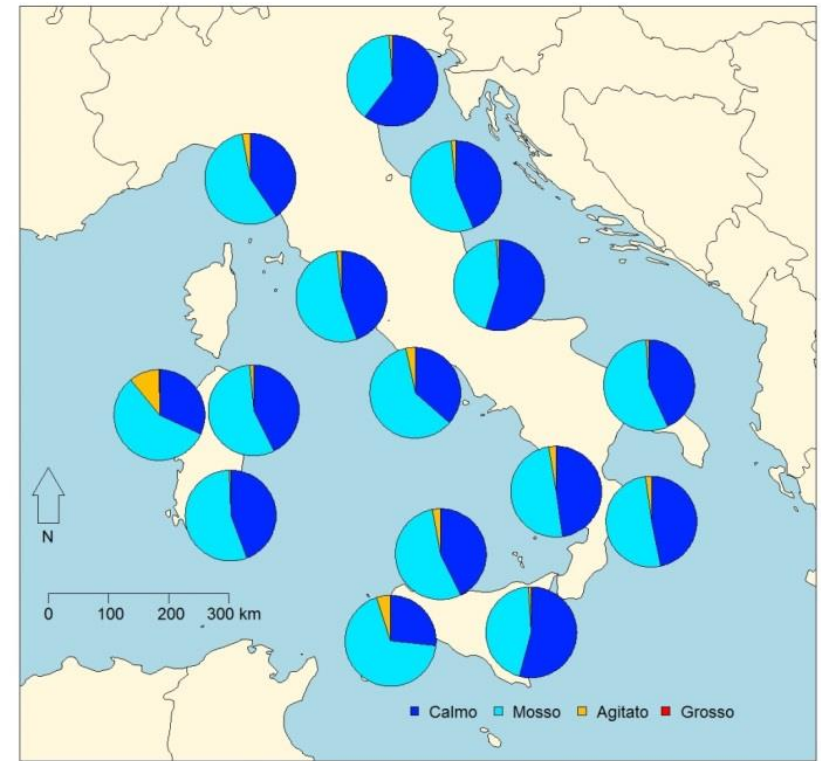
Parametri statistici delle onde : H_s , H_{rms} , T_p , T_m ...

Stato di mare: periodo in cui i parametri statistici del moto ondoso si possono ritenere costanti

Mareggiata: successione di stati di mare



Valori dell'altezza significativa H_s (SWH) rilevati da due boe ISPRA nel del Tirreno



Un buon riferimento:

www.isprambiente.it/it/servizi-per-lambiente/stato-delle-coste/atlante-delle-coste

<http://annuario.isprambiente.it>

DISTRIBUZIONE DEI VALORI ESTREMI

Un'informazione molto importante è quella della ricerca delle probabilità di stati di mare molto alti (**valori estremi**). Si usano le stesse tecniche (adattamento delle distribuzioni di valori estremi quali Gumbel, esponenziale etc) impiegate ad esempio nelle Costruzioni Idrauliche ; il problema dei valori estremi è infatti comune a molti settori dell'ingegneria, ad esempio: le portate di un fiume, le piogge, l'intensità di un terremoto.

In idraulica marittima spesso la variabile che interessa è *l'altezza d'onda significativa H_s* di uno stato di mare. H_s è un parametro statistico che caratterizza un evento complesso (una serie di onde).

Non è rilevante in questa sede la distribuzione statistica delle singole onde nel corso di un dato stato di mare (è stato già fatto con la distribuzione di Rayleigh).

Bisogna abituarsi a distinguere con chiarezza nella mente e nell'espressione i concetti di:

- *Altezza significativa di uno stato di mare H_s*
- *Altezza di una singola onda H*
- *Altezza d'acqua istantanea η*

TEMPO DI RITORNO

Obiettivo dell'analisi statistica degli eventi estremi, è quello stabilire per ciascuna altezza d'onda significativa di una mareggiata), il relativo **tempo di ritorno**.

Si definisce *tempo di ritorno* T_r di uno stato di mare di altezza significativa H_s l'intervallo medio tra due eventi aventi altezza significativa eguale o maggiore di H_s .

Si indica con $P(H_s)$ la probabilità di accadimento di un evento avente altezza significativa minore di H_s (Probabilità cumulata di non superamento):

Riferendosi a serie storiche, cioè a successioni temporali di eventi, essa è relativa alla lunghezza del periodo di osservazione L .

Si ha che

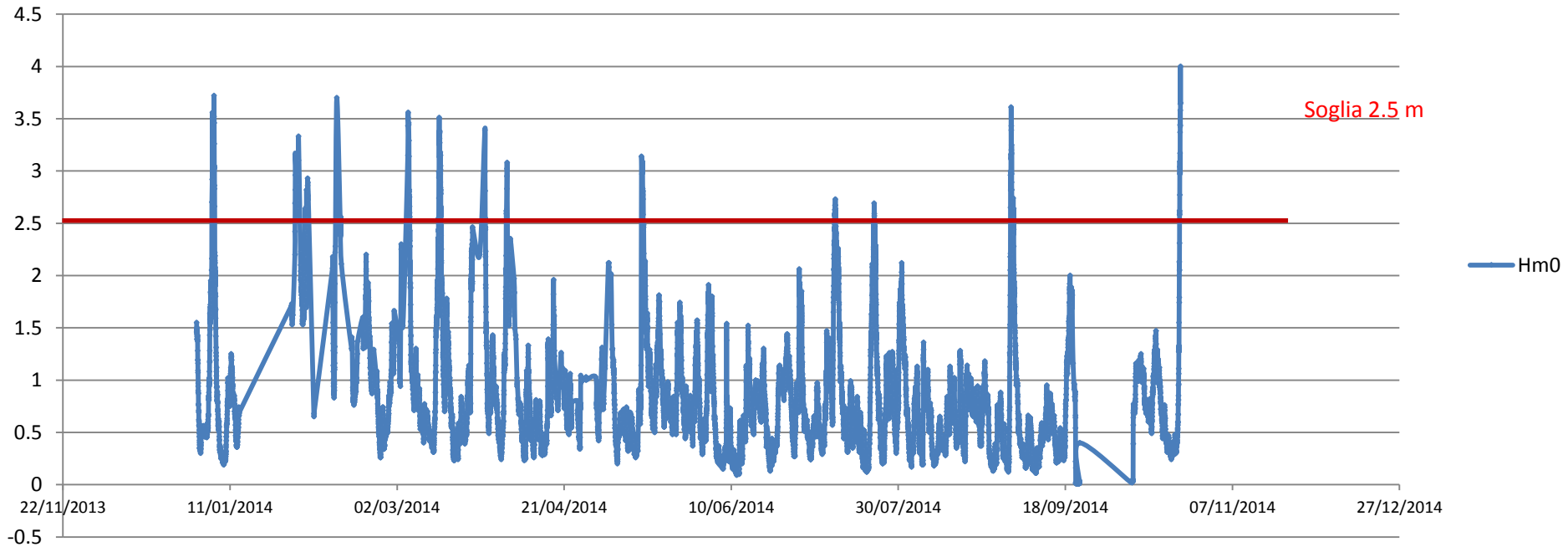
T_r è legato a P dalla seguente relazione

$$T_r(H_s) = L / (1 - P(H_s))$$

Esistono altre espressioni che legano T , L , e P ; quella sopra è la più semplice e fornisce, nella maggior parte dei casi pratici, valori non molto diversi da quelli ottenuti impiegandone le altre più complesse.

Ricerca valori estremi : Valori sopra soglia

Hm0



L'ADATTAMENTO DI FUNZIONI DI PROBABILITA'

Determinato il campione di dati su cui operare è necessario innanzitutto valutare i valori empirici della frequenza cumulata di non superamento. Assumendo di aver scelto gli n stati di mare $H_1 \dots H_n$ di maggior intensità, si riordinano tali valori in senso crescente

la frequenza dei valori minori o eguali a H_{si} è evidentemente dall'ordine di

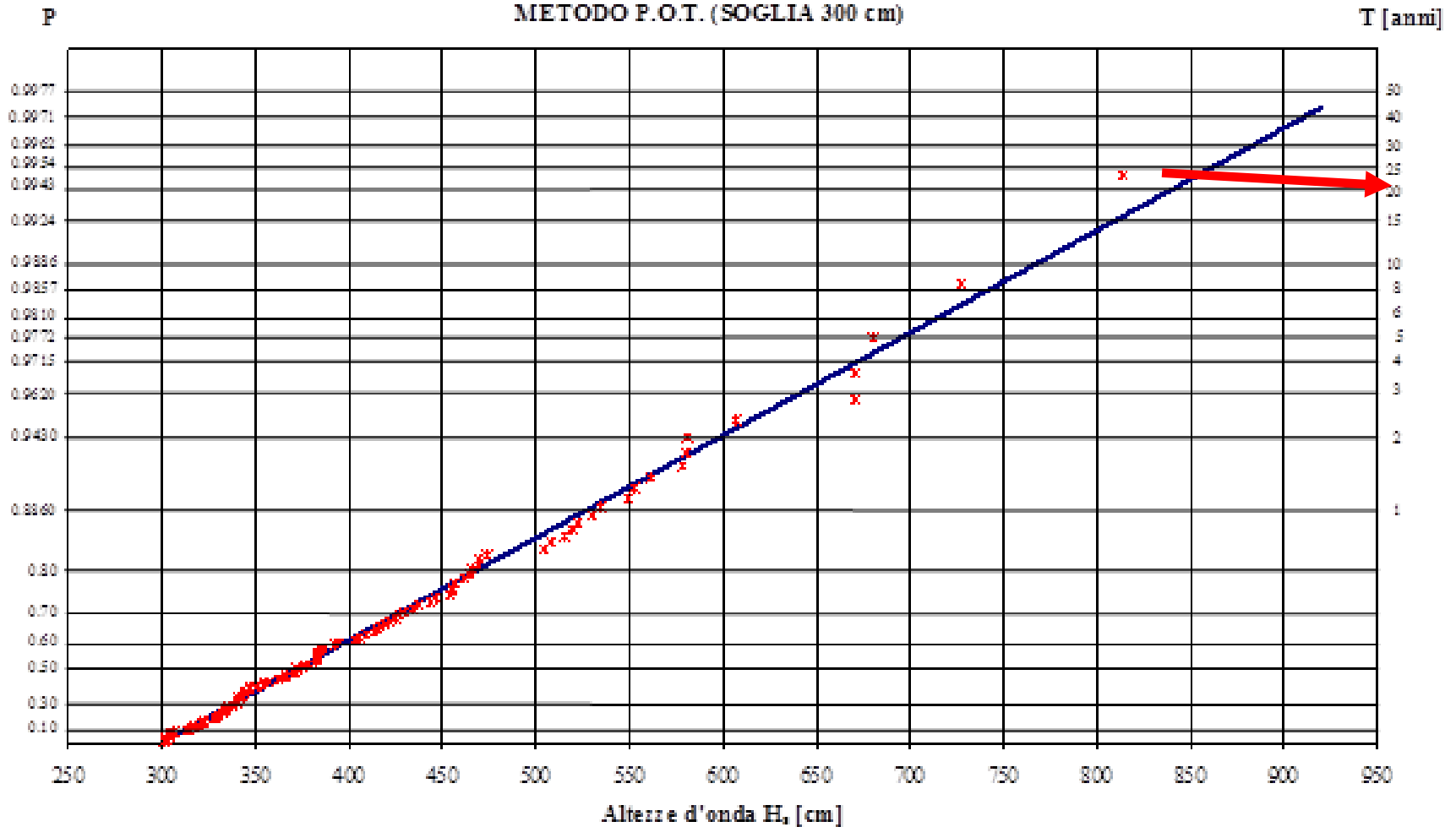
$$F(H_{si}) = i / n$$

Per convincersene: la frequenza di "non superamento" dei valori minori o eguali al massimo del campione è 1 (tutti i valori sono minori o eguali al massimo); la frequenza dei valori più piccoli o eguali al minimo è $1/n$

Messi i dati in ordine crescente, si caratterizza la Frequenza empirica con: $F(X_i) = i / (n+1)$

$$\text{Tempo di Ritorno: } T_r(H_s) = L / (1 - P(H_s))$$

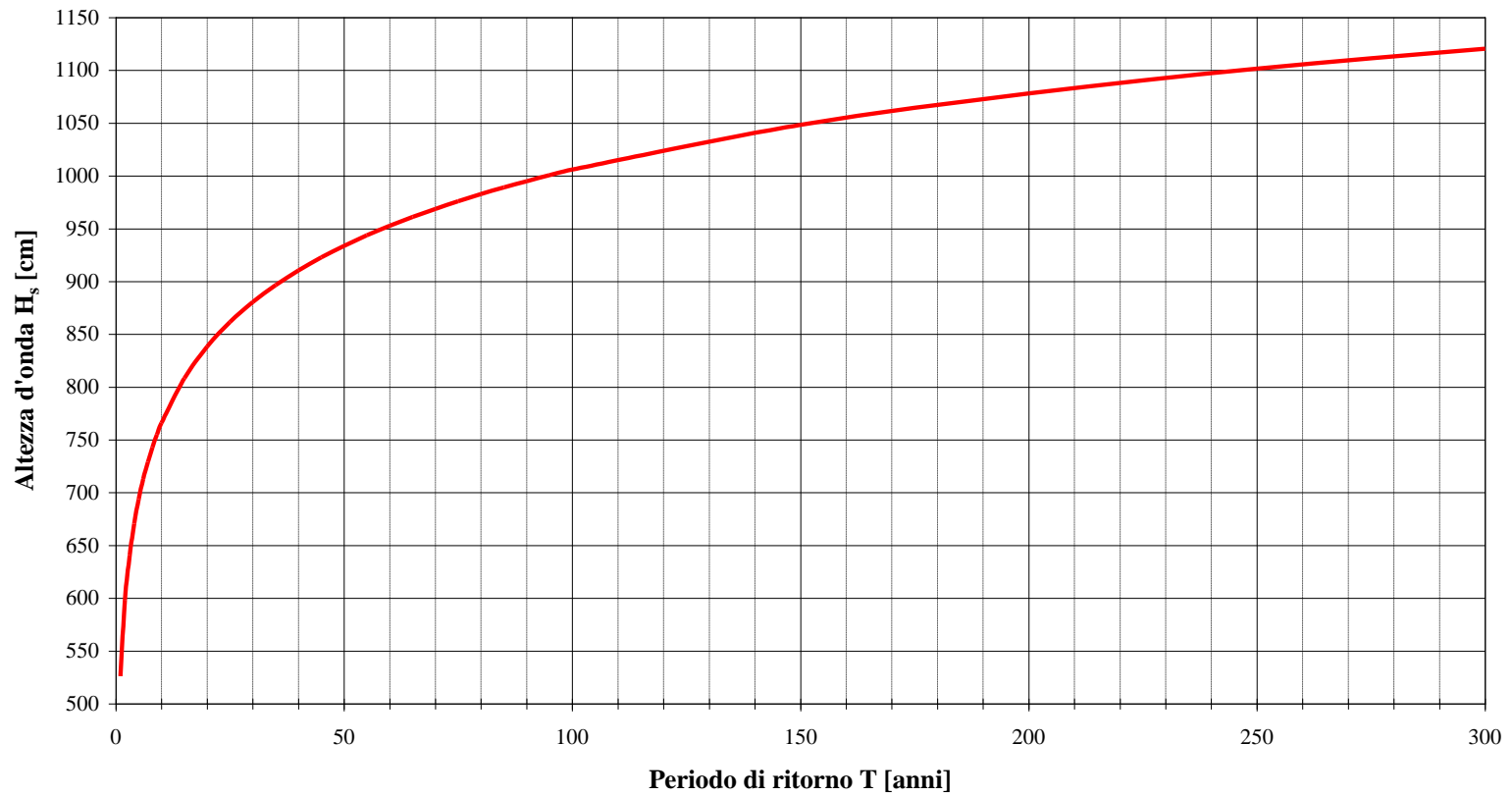
CARTA PROBABILISTICA DISTRIBUZIONE ESPONENZIALE A DUE PARAMETRI
METODO P.O.T. (SOGLIA 300 cm)



1) $P(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x - \varepsilon)]\}$

$$P(x) = 1 - \exp\left[-\frac{x - x_0}{K}\right]$$

**ALTEZZE D'ONDA - PERIODI DI RITORNO
DISTRIBUZIONE ESPONENZIALE (METODO P.O.T.)**

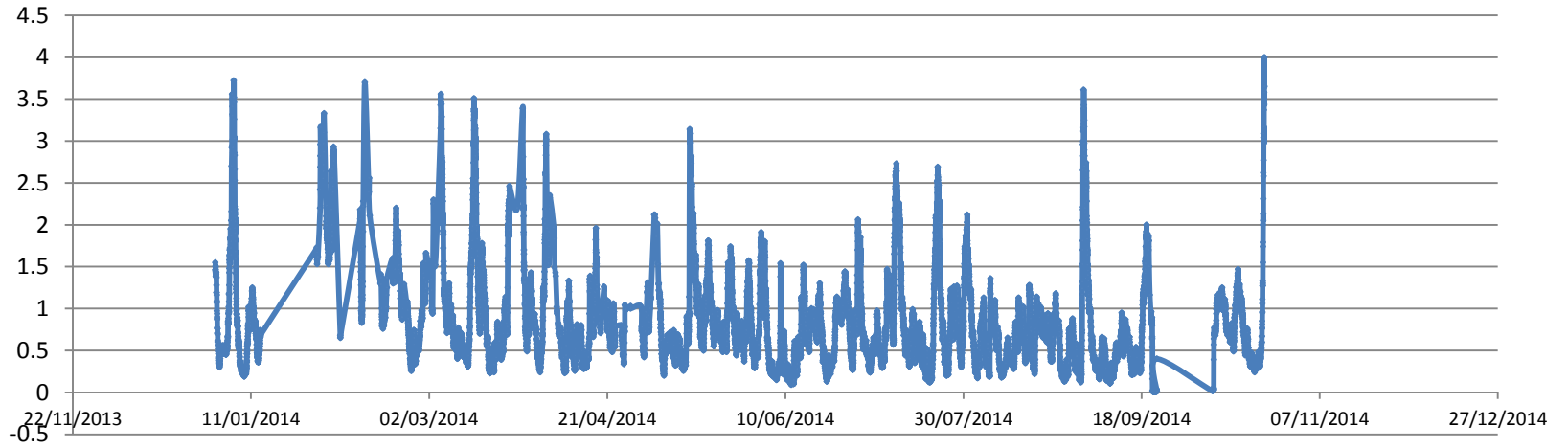


DISRIBUZIONE DEI VALORI MEDI

Altre informazioni utili sono date dai **valori medi e le direzioni medie**, che servono a valutare ad esempio la tendenza all'erosione di un litorale; oppure la durata al di sopra di una certa soglia, cosa utile ad esempio per determinare la frequenza di non agibilità dell'ingresso di un porto: uno strumento essenziale è lo studio delle distribuzioni del flusso di energia.

In particolare è importante la distribuzione direzionale

Hm0



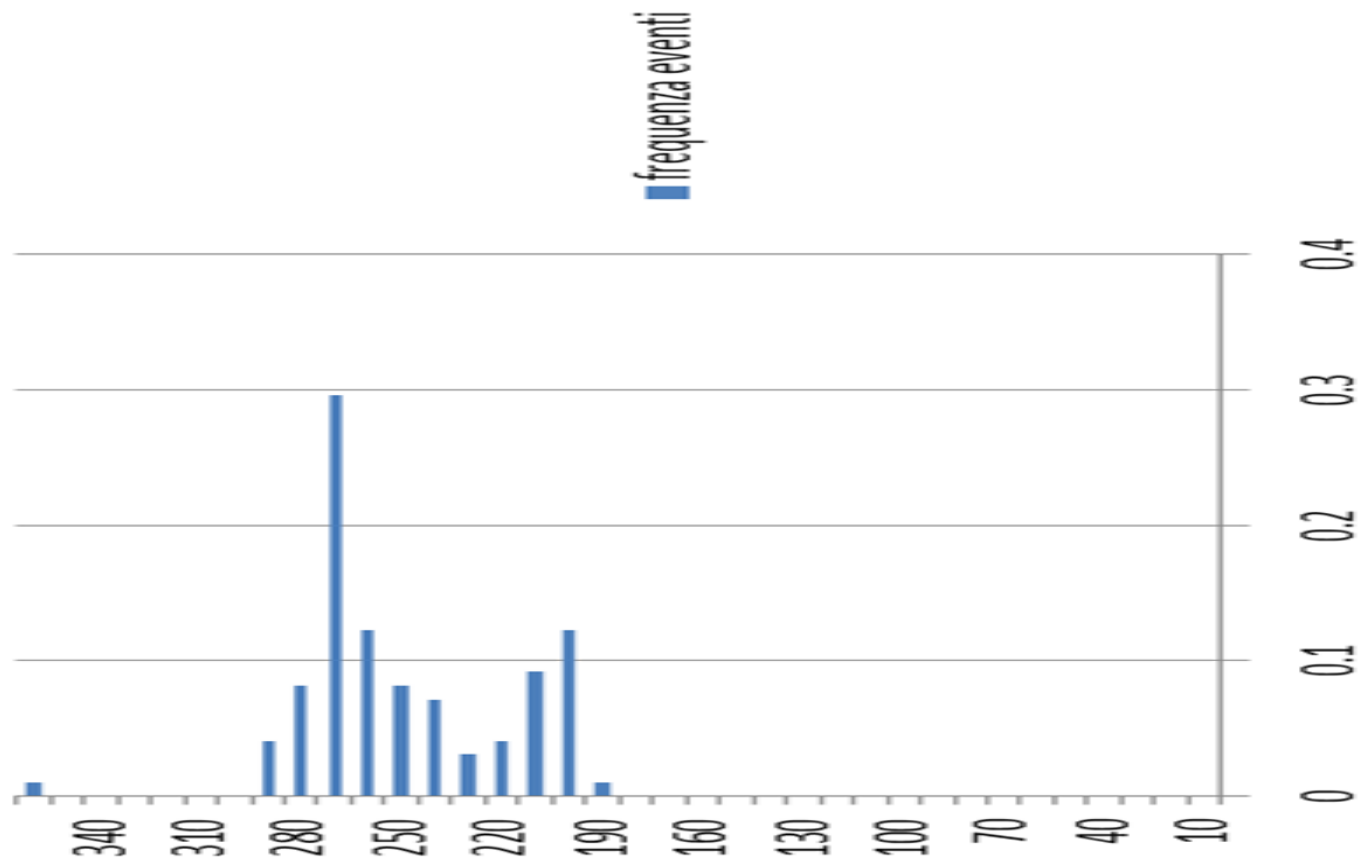
Storia delle Hm



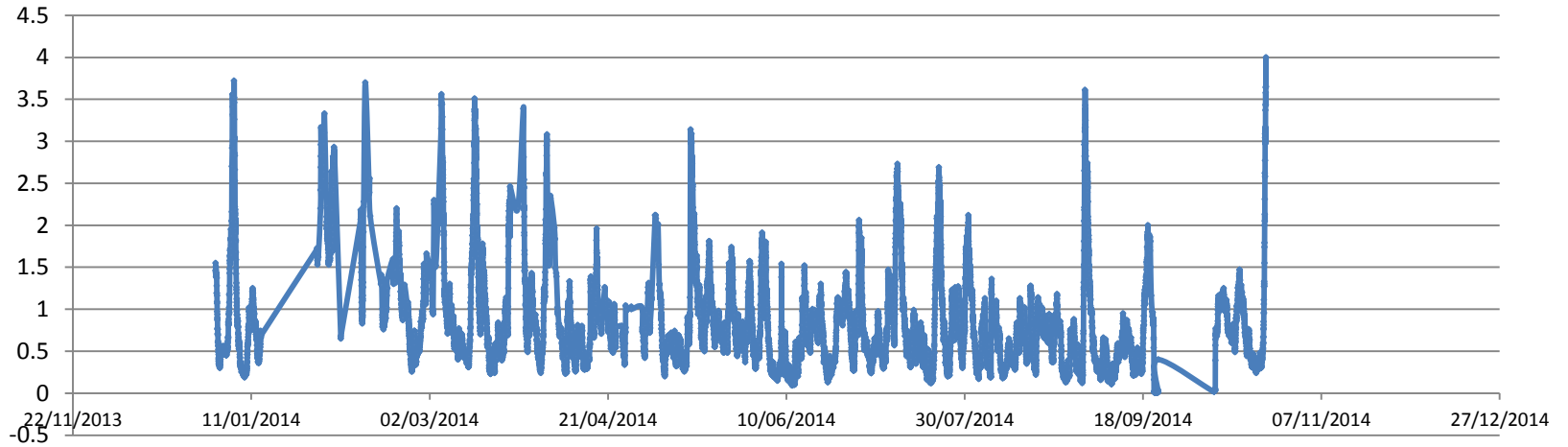
Distribuzione direzionale

Direzione eventi

frequenza eventi



Hm0



Storia delle Hm

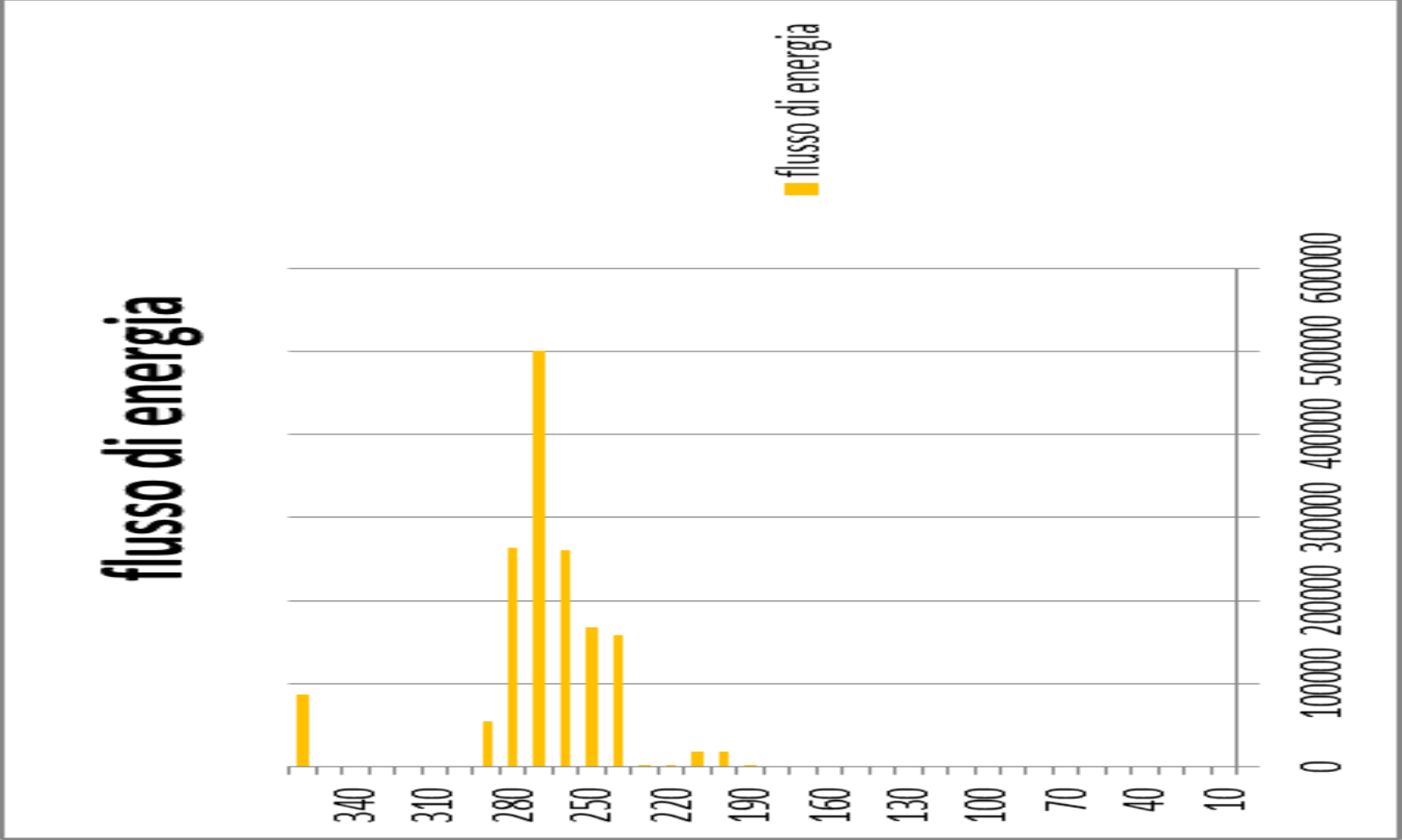


Storia dei flussi di energia

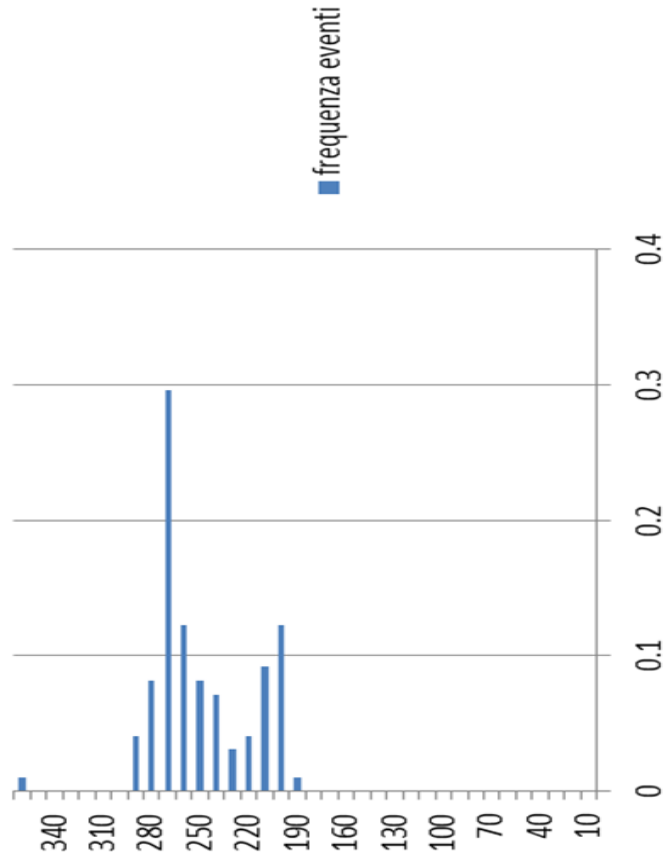


Distribuzione direzionale

direzioni flussi di energia



frequenza eventi



flusso di energia

