



# **Il monitoraggio in situ dello stato fisico del mare**

*21 Settembre 2022*

**Ing. Marco Picone**

**Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale (ISPRA)**

Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale  
e la protezione della fascia costiera,  
la climatologia marina  
e l'oceanografia operativa

# Perché osservare lo stato fisico del mare

## **Conoscenza dell'ambiente marino:**

Stato energetico del mare, fenomeni ondosi e mareali, stato biogeochimico del mare;

## **Conoscenza dell'ambiente terrestre:**

Fascia costiera, interazione con masse terrestri, topografia;

## **Conoscenza dell'ambiente atmosferico:**

Interazione acqua aria, scambi termici, scambi energetici;

## **Clima e cambiamenti climatici;**

## **Uso antropico della risorsa marina.**

## Come osservare lo stato fisico del mare

- Misure in-situ → Effettuate nello stesso punto in cui si verifica il fenomeno
  - Telerilevamento → Osservazione «a distanza» del fenomeno
  - Modelli previsionali → Stima del fenomeno
-

## Il sistema di monitoraggio integrato



### **Perché utilizzare diverse tipologie di stazioni di misura, strumenti e sensori?**

- Rispondere diversi obiettivi (osservazione, previsione, controllo)
- Minimizzare gli svantaggi di ogni singola modalità (costi, risoluzione)
- Ottimizzazione delle risorse rispetto agli obiettivi scientifici
- Costruire applicazioni e servizi ad alto valore aggiunto, con forti implicazioni per settori economici di grande importanza

## Misure in-situ dello stato del mare

### Vantaggi

- Permette di acquisire informazioni in continuo costituendo una lunga serie di dati su cui effettuare analisi di lungo periodo. Ottima scala temporale;
- Sono misure dirette ed affidabili;
- Facilmente interpretabili;
- Misure si ottengono in tutte le condizioni meteo-climatiche, sia di giorno che di notte.

### Svantaggi

- La scala spaziale non è sempre adeguata;
  - I costi di gestione e manutenzione sono elevati.
-

# Misure in-situ dello stato del mare

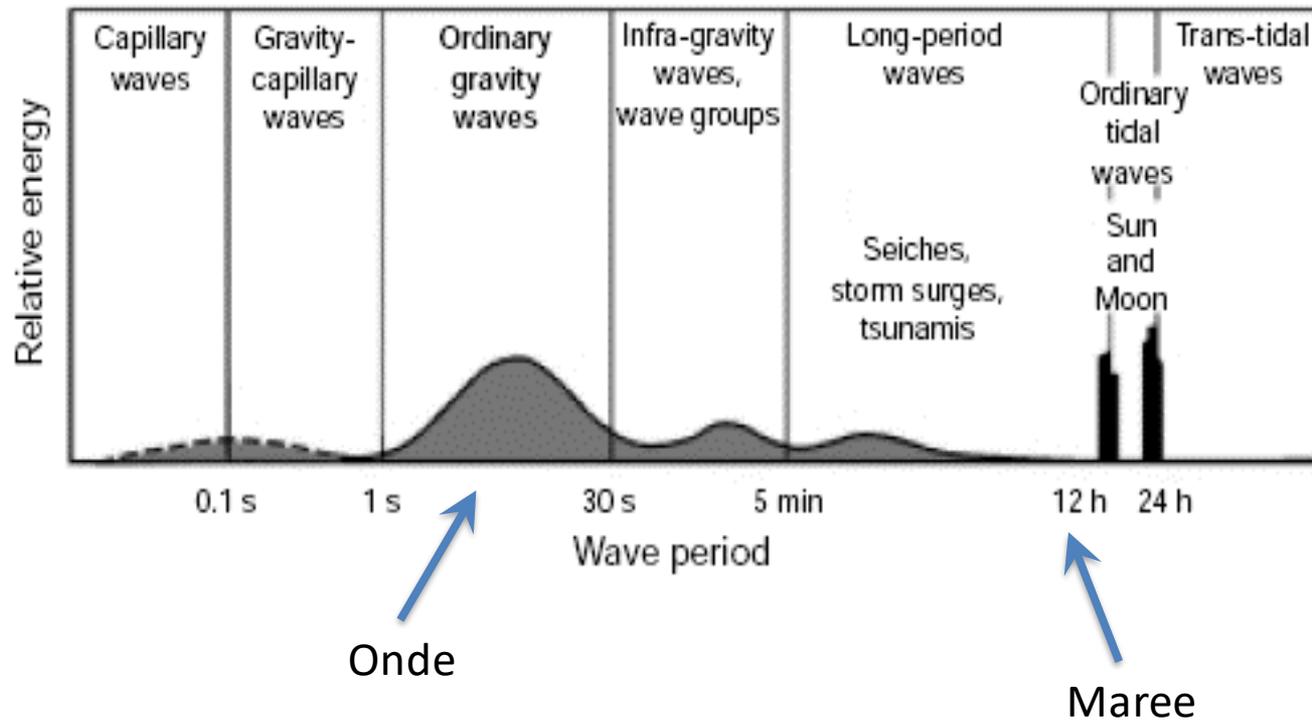
## Misure strumentali semplici

- Variazione della superficie libera (idrometro/ondametro);
- Temperatura del mare (termometro);
- Velocità e Direzioni delle Correnti (correntometro).

## Osservazioni complesse

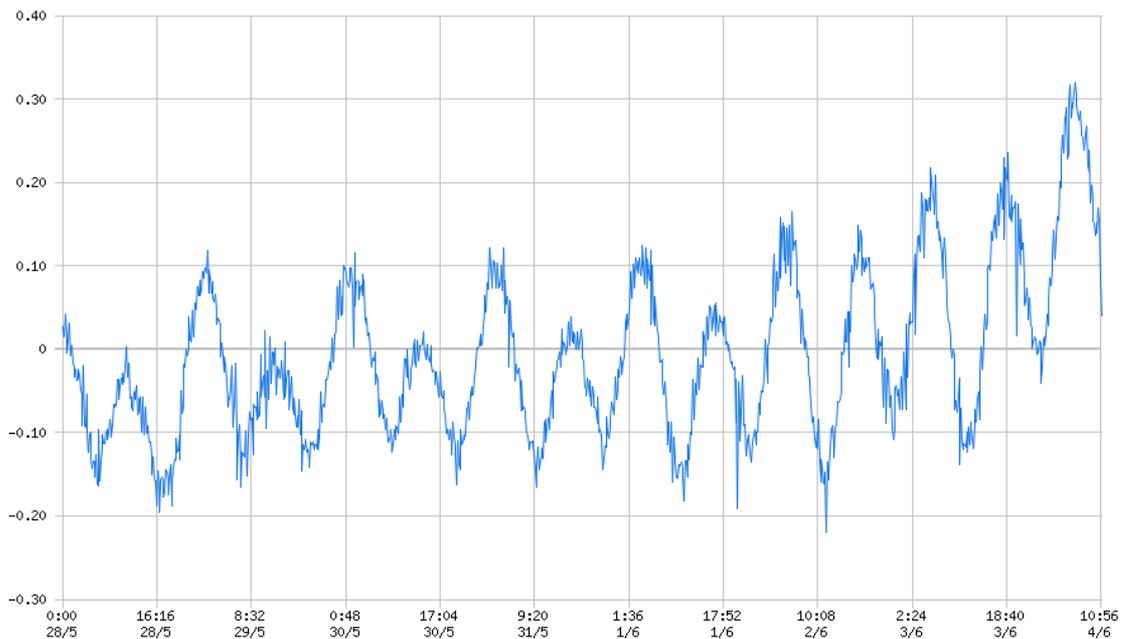
- Maree;
  - Onde;
  - Tsunami, Storm Surge.
-

# La variazione della superficie libera del mare



# La marea

RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE  
LIVORNO  
LIVELLO IDROMETRICO (m)  
00:00 28.05.2020 ÷ 11:00 04.06.2020 GMT



$$Z(t) = Z_0 + A(t) + M_a(t) + M_m(t) + \varepsilon$$

Livello medio  
del mare

Effetti di lungo periodo/trend  
(cambiamento di volume degli  
oceani, variazione della capacità di  
contenimento dei bacini oceanici)

Marea  
astronomica

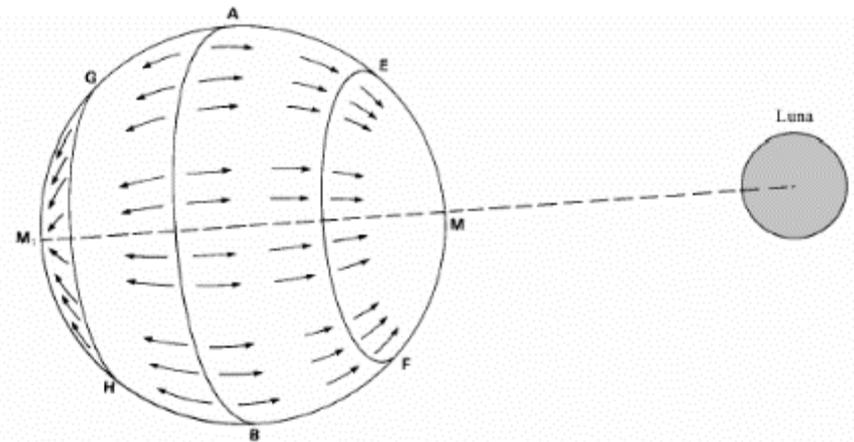
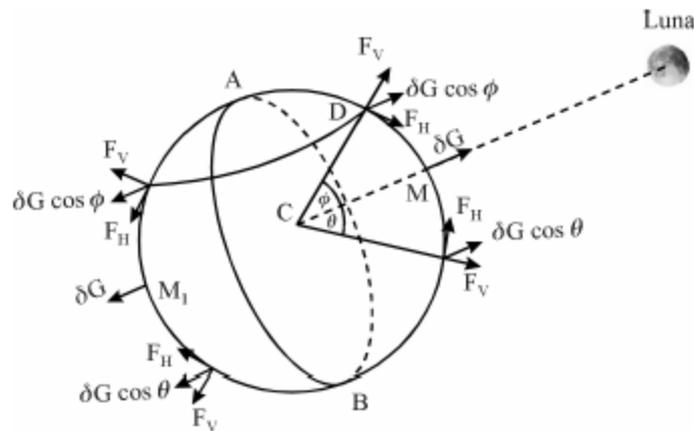
Marea  
meteorologica

Effetti locali (es.  
eccitazione delle  
frequenze di modo  
proprio di un bacino)



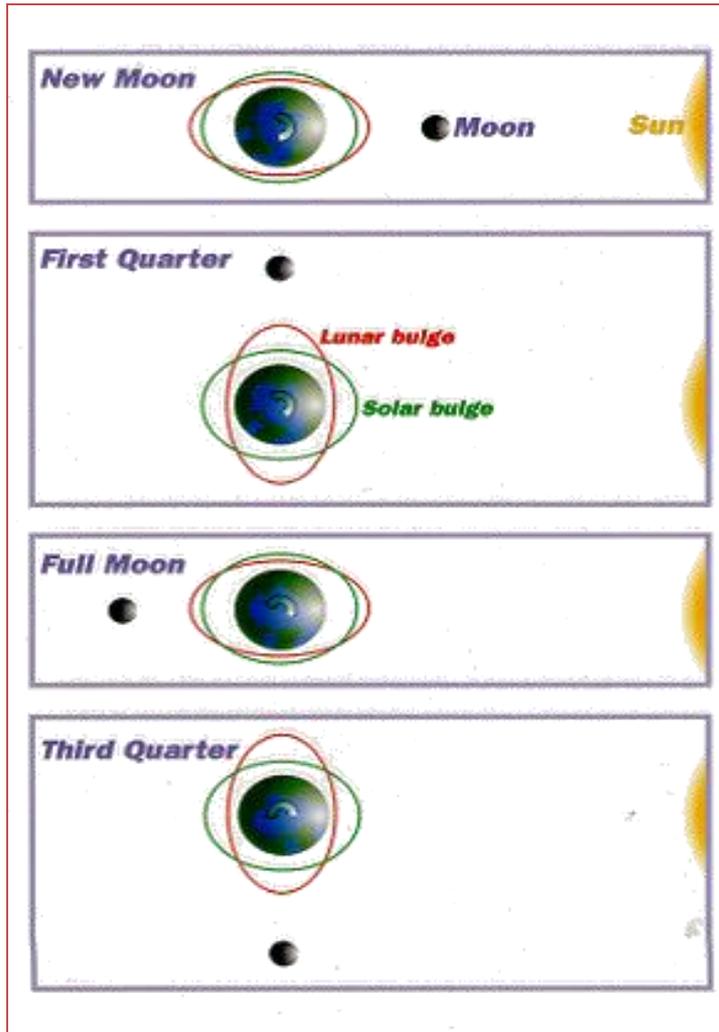
# La marea astronomica

La risultante delle forze si scompone nelle due componenti



- verticale: produce un sollevamento della particella d'acqua, trascurabile rispetto al campo gravitazionale
- orizzontale: provoca lo spostamento dell'acqua verso il punto sublunare e il suo antipodo finché non sia raggiunto l'equilibrio della superficie libera dell'acqua

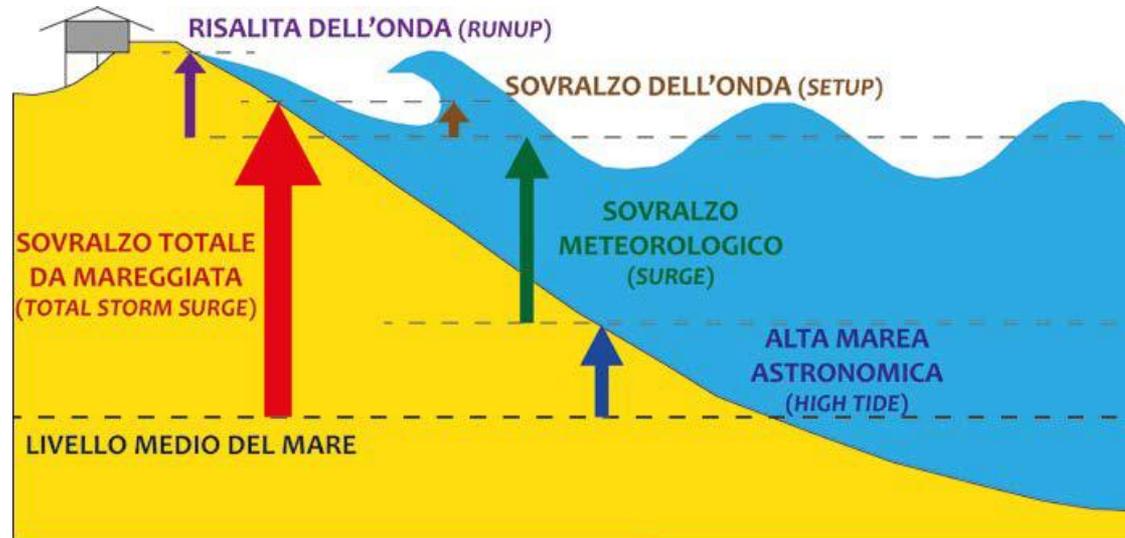
## La marea astronomica



La marea Lunisolare (effetto del sistema Terra-Luna e Terra-Sole) costituisce la componente maggiore della marea astronomica.

La marea prodotta dal Sole è pari a circa il 45% della marea indotta dalla Luna.

# La marea meteorologica



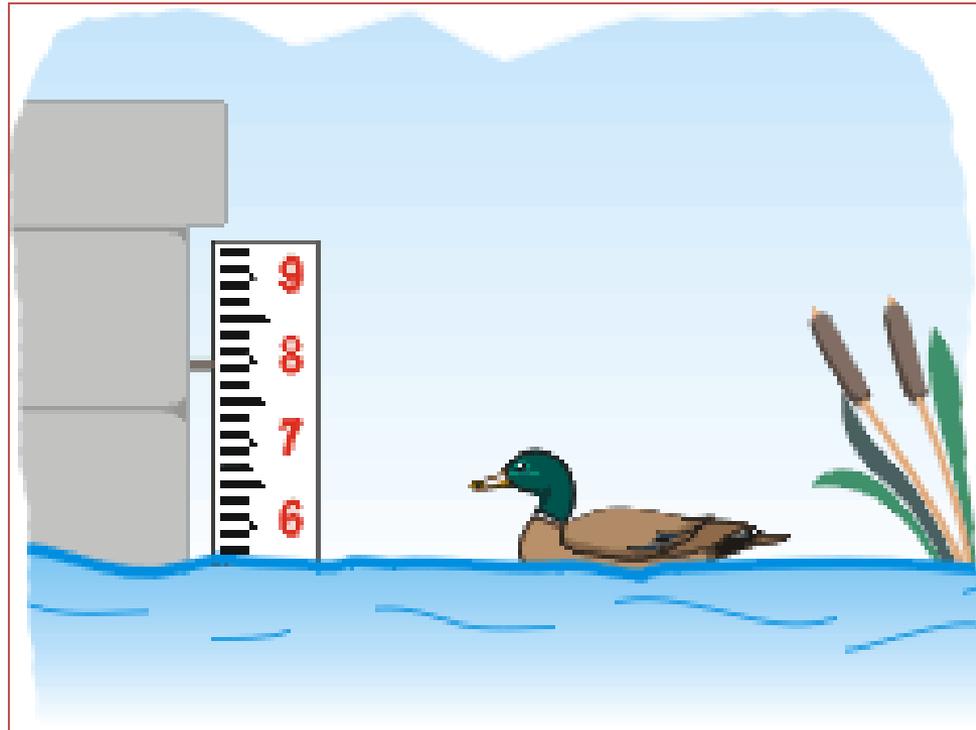
Dipende dalla stagione, dalla latitudine e dalla piattaforma continentale.

L'azione tangenziale del vento tende a spingere la massa d'acqua verso la costa, accelerandola (sovrалzo di vento). Al raggiungimento di condizioni stazionarie, l'acqua risulta in equilibrio sotto l'azione del gradiente di pressione dovuto alla pendenza assunta dalla superficie del mare e le azioni agenti alla superficie libera e al fondo rispettivamente legate alla resistenza del vento e all'attrito sul fondo.

Le variazioni di livello determinate da un aumento o da una diminuzione della pressione atmosferica (pressione media 1013 mbar) sono comunemente indicate come effetto barometrico inverso [1 mbar - 1 cm].

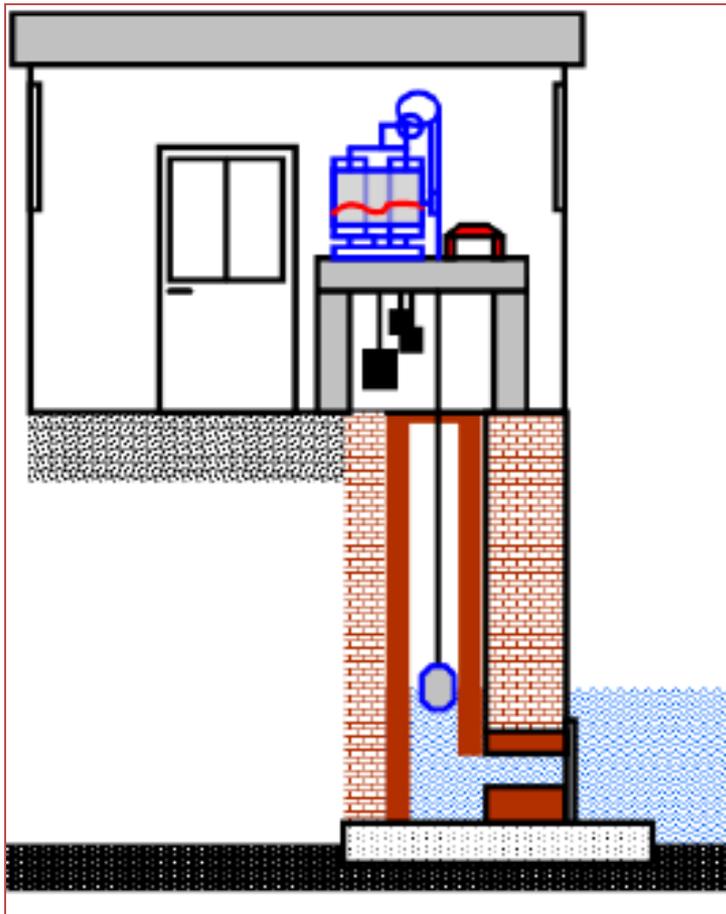
# Osservazione in situ

Asta idrometrica



# Osservazione in situ

Mareografo



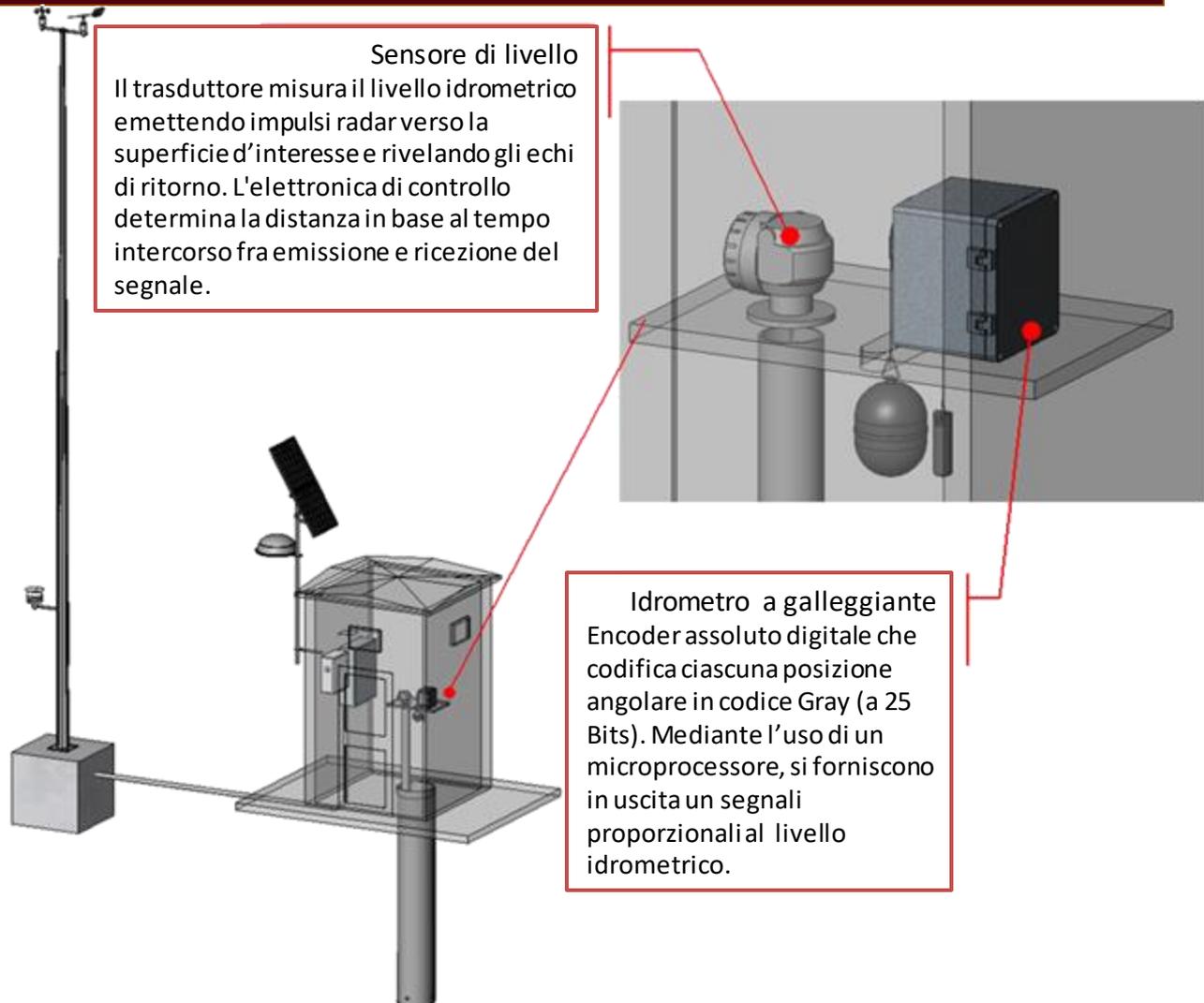
# Osservazione in situ

## Mareografo ISPRA

Gli strumenti per la misurazione del livello sono collocati in un pozzetto di calma e agiscono su una sezione controllata. Restituiscono un valore ogni minuto (in alcuni ogni 15 sec.)

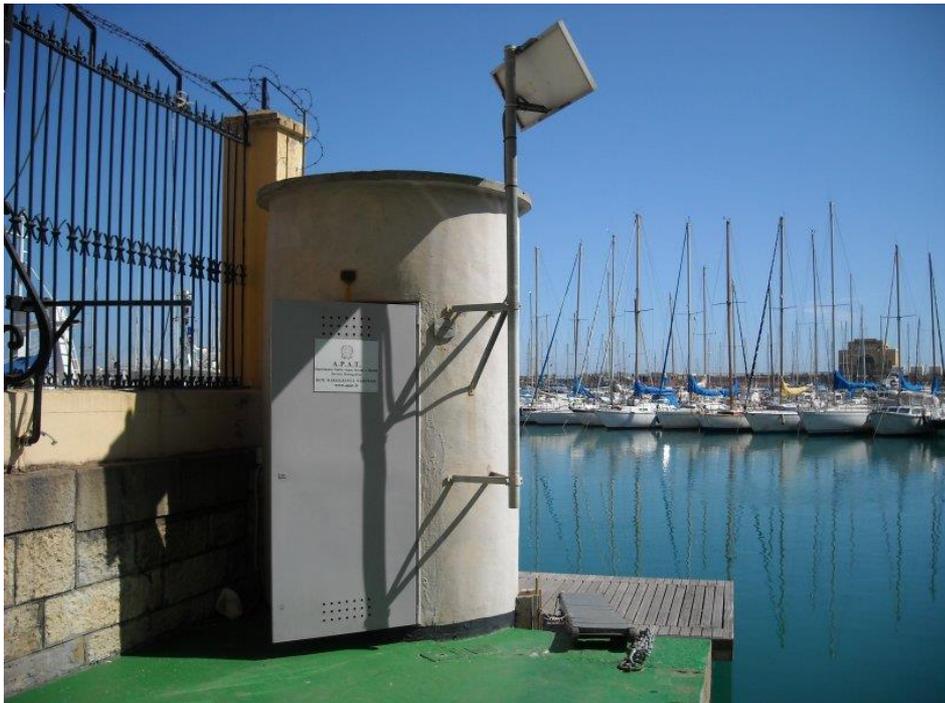
Ulteriori parametri osservati:

- temperatura acqua
- temperatura aria
- umidità aria
- pressione atmosferica
- direzione vento
- velocità vento
- onde e correnti (ADCP RMLV)
- videomonitoraggio



# Cabine mareografiche RMN - ISPRA

Stazione mareografica di Imperia



Stazione mareografica di Vieste

## Cabine mareografiche RMN - ISPRA



Stazione mareografica di Otranto



Stazione mareografica di Anzio



Stazione mareografica di Venezia  
Punta della Salute (RMLV)

# Cabine mareografiche RMN - ISPRA

Stazione mareografica di Livorno



# Cabine mareografiche RMN - ISPRA



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

Rete idrografica e mareografica nazionale  
LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE

Rilievi anno 2009 - 2010

Stazione mareografica di Livorno

ORIGINE IGM

Csv: 0028\_D02\_003P  
Punto GPS: 111601

Annotazioni: il csv mareografico ISPRA è stato misurato  
utilizzando la stadietta invar da 60 cm. con staffetta di  
sospensione (vedi foto laterale)



## CSO MAREOGRAFICO

Coordinate piane UTM - ETRF 2000 N: 4822300.609  
E: 604989.189  
Quota s.l.m.: **m. 1.6926** quota italgeo 2005: **m.1.510**  
Bullone in acciaio inox murato sulla banchina lato destro della cabina



## CSV MAREOGRAFICO

Quota s.l.m.: **m. 3.6925**  
Piastra mensolata murata sulla parete a sinistra della porta di accesso alla cabina mareografica



## CSO RIFERIMENTO STAFFA MAREOGRAFICA

Quota s.l.m. 2009: **m. 2.1843**  
Bullone in acciaio inox murato davanti al boccaforno del pozzo di calma allineato con la staffa mareografica



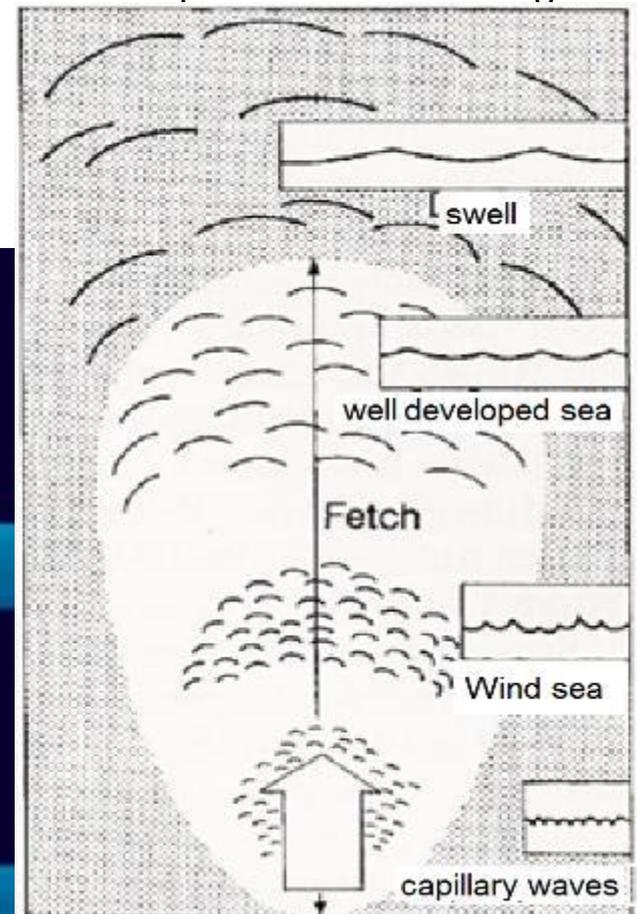
## STAFFA MAREOGRAFICA

Quota s.l.m. 1999: **m. 2.1350**  
Quota s.l.m. 2009: **m. 2.1623** Differenza di quota  $\Delta = 0,02730$   
Staffa in acciaio zincato aggettante sul pozzo di calma



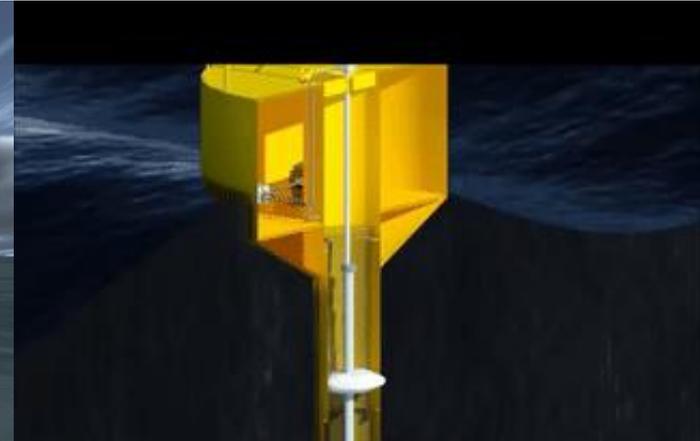
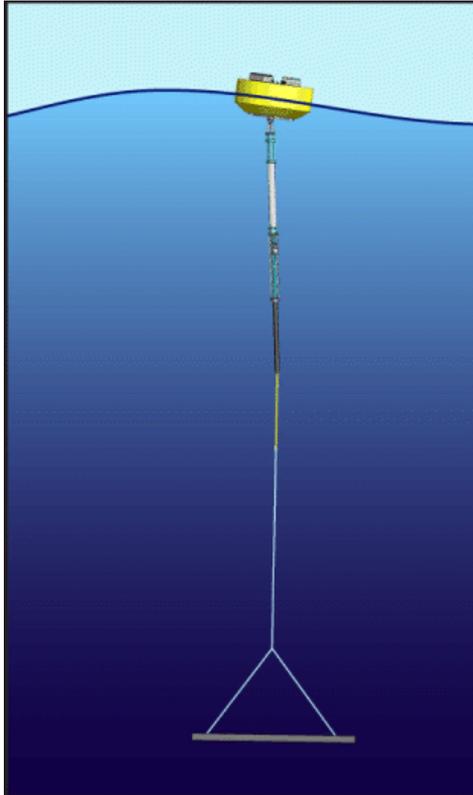
## Le onde da vento

Il vento è in grado di trasferire grandi quantità di energia alle masse d'acqua attraverso la superficie libera del mare. Maggiore l'intensità, la durata, la persistenza lungo una determinata direzione e la superficie su cui agisce il fenomeno anemometrico, maggiore sarà il quantitativo di energia trasmessa. La **forma delle onde** che si generano in mare sotto l'azione del vento è estremamente complessa; con altezze, i periodi, le lunghezze d'onda e le direzioni di propagazione delle onde reali risultano variabili in maniera caotica.



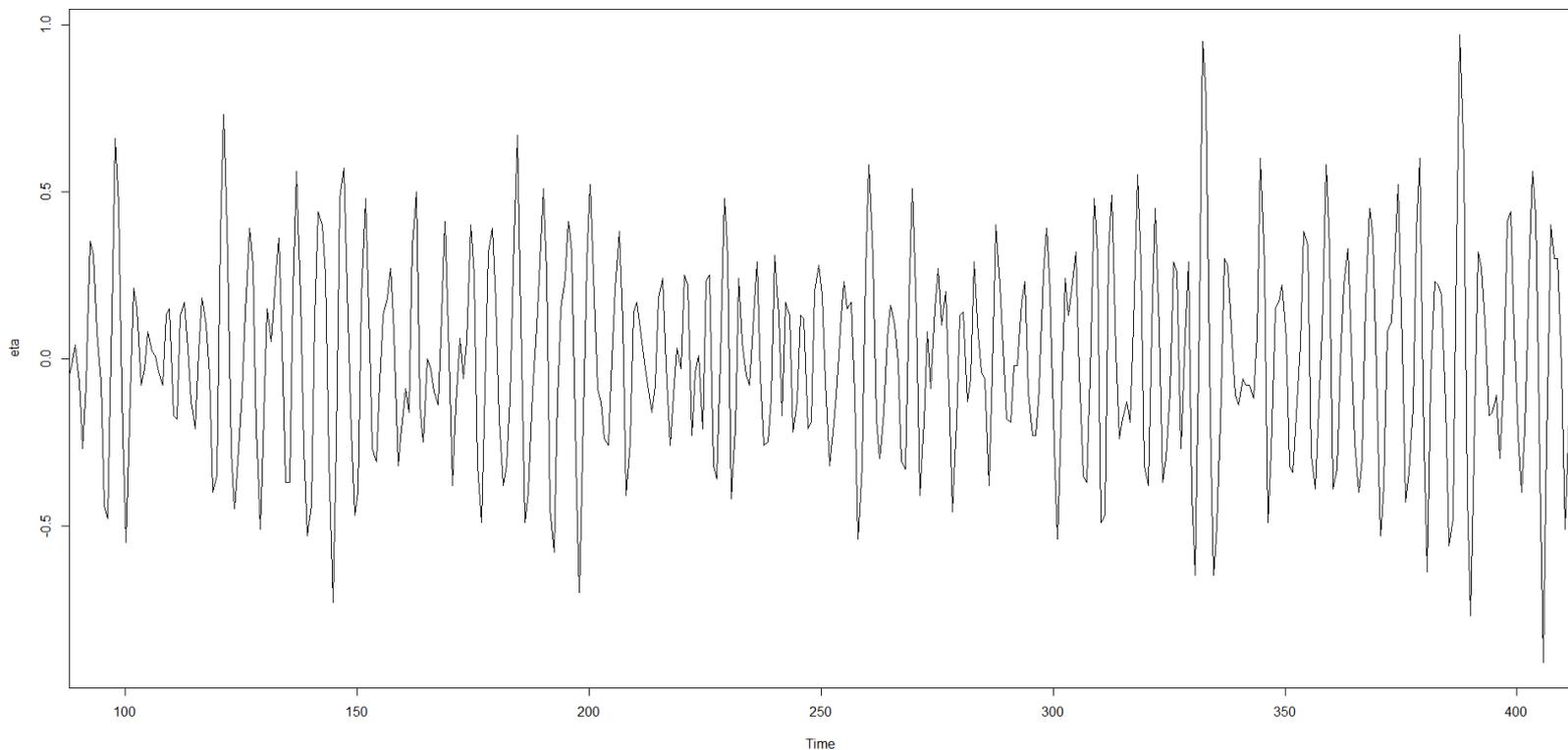
## Le onde da vento

L'**ondametro** misura un dato «grezzo» di elevazione della superficie libera del mare  $\eta_g(t)$  che è diverso dalla semplice sinusoide che si utilizza solitamente per rappresentare un'onda.



## Le onde da vento

L'**ondametro** misura un dato «grezzo» di elevazione della superficie libera del mare  $\eta_g(t)$  che è diverso dalla semplice sinusoidale che si utilizza solitamente per rappresentare un'onda. E' difficile definire il concetto di onda.

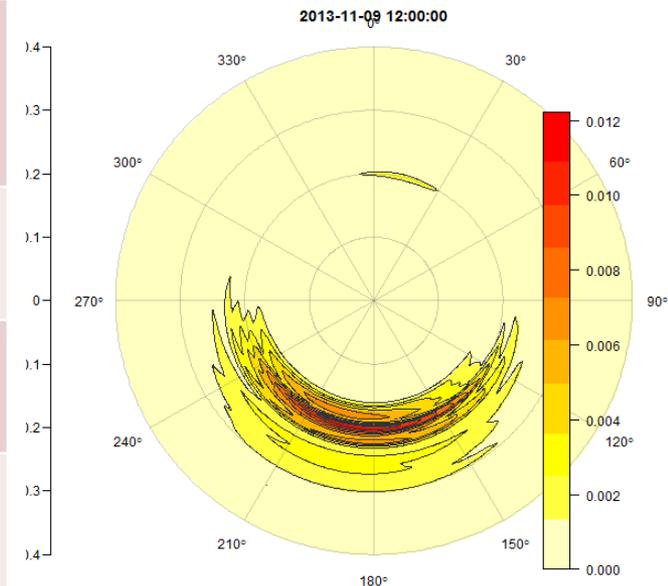


## Le onde da vento

Si considerano gli **stati di mare**, cioè dei periodi di tempo sufficientemente lunghi tali da comprendere molte onde, ma abbastanza brevi da poter essere considerato mediamente stazionari (da circa 20-30 minuti a 1 ora).

L'analisi si può effettuare in due modi: “**analisi zero-crossing**” o “**analisi spettrale**”.

	Zero-crossing	Analisi spettrale
Altezza d'onda significativa ( $H_{1/3}$ , $H_s$ )	media del terzo delle delle onde più alte	$4 * \sqrt{m_0}$
Periodo medio $T_m$	Media dei periodi delle onde	$m_0/m_1$
Periodo di picco $T_p$	Periodo delle onde più alte ( $T_s$ )	Periodo associato al picco
Direzione di propagazione	Direzione media degli spostamenti	Direzione associata al picco dello spettro



## Boe ondametriche RON - ISPRA

Le boe, ormeggiate con un ancoraggio molto flessibile su fondali abbastanza profondi, seguono la superficie libera dell'onda: l'elevazione della superficie dell'acqua  $\eta(t)$  e gli spostamenti in direzione Nord ed Est si ottengono attraverso una doppia integrazione delle **misure di accelerazione**. I parametri di interesse vengono elaborati a partire da osservazioni semiorarie

Ulteriori parametri osservati:

- temperatura acqua
- temperatura aria
- umidità aria
- pressione atmosferica
- direzione vento
- velocità vento



## Boe ondametriche RON - ISPRA



Varo della  
boa RON



# Boe ondamiche RON - ISPRA

La boa oggi

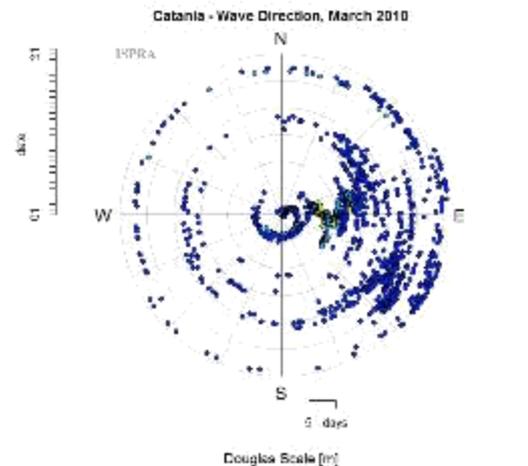
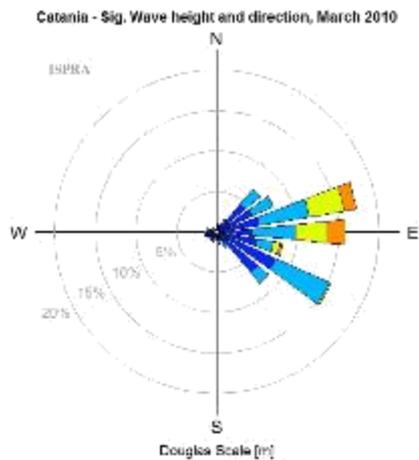
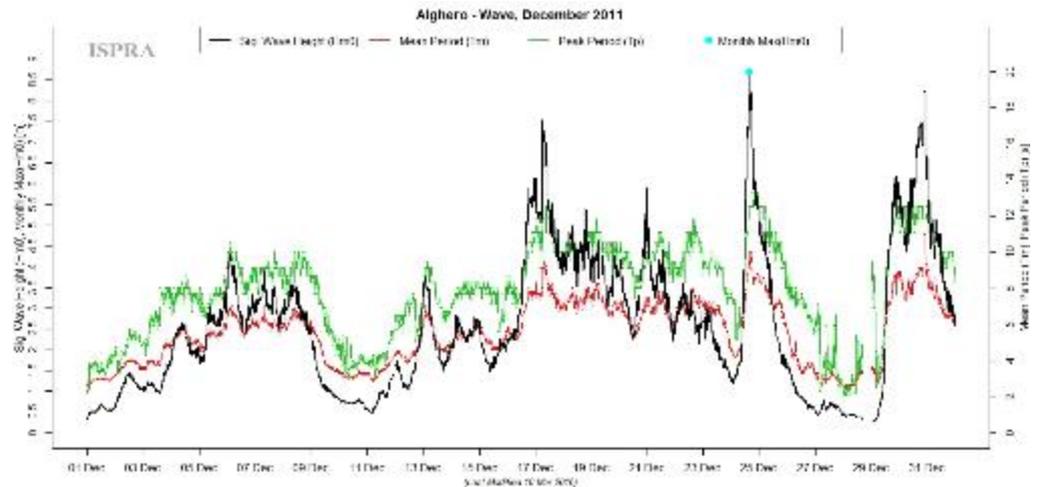
<http://www.ismar.cnr.it/eventi-e-notizie/infrastrutture/piattaforma-acqua-alta/webcam/webcam-streaming-est>

La boa in tempesta

<https://owncloud.ve.ismar.cnr.it/owncloud/index.php/s/RG1xplmoMEABnvZ>

---

# Misure in-situ: RON



0.25

0.5

1.5

2.5

5

12

0.25

0.5

1.5

2.5

5

12

---

Alcune applicazioni....

---

# Livello del mare

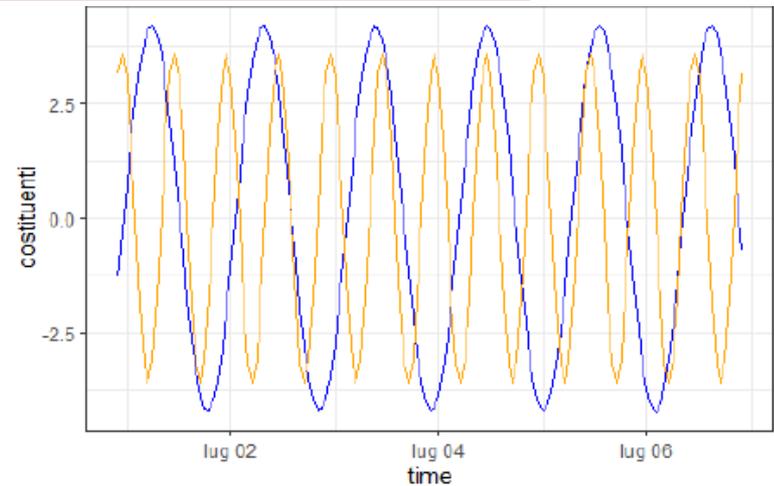
## Analisi della marea astronomica

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\sigma_n t - k_n)$$

Individuazione delle componenti astronomiche attraverso l'individuazione delle costanti armoniche (componenti principali costituenti la marea astronomica)

Utile per:

- studiare la natura, la scala temporale e l'entità delle variazioni del livello componenti il segnale misurato
- effettuare le analisi statistiche degli estremi in termini di livello assoluto o residui



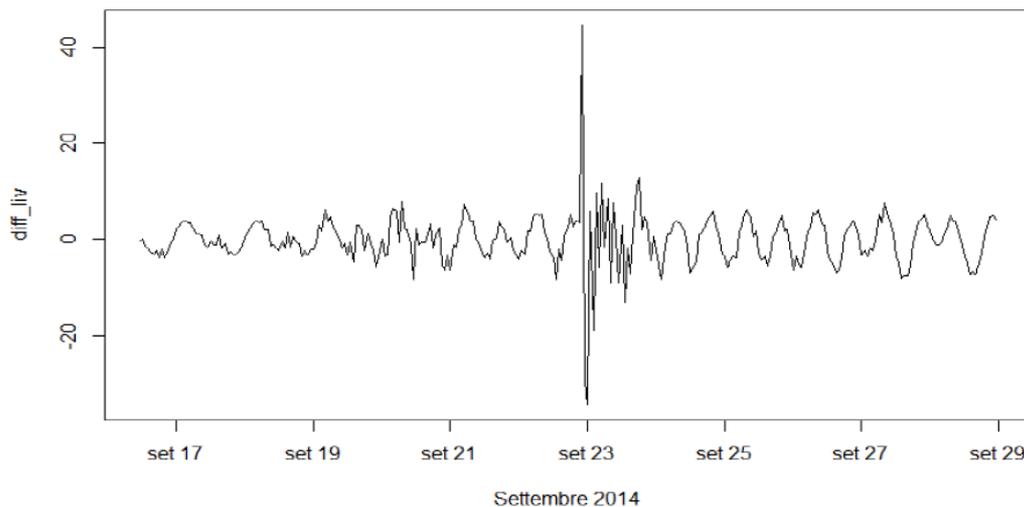
Nome	Descrizione	Frequenza	Periodo		
			hh	mm	ssss
Z0	Intercept constituent	0.000000	Inf		
O1	Principal lunar diurnal constituent	0.038731	25	49	9.63
P1	Solar diurnal constituent	0.041553	24	03	57.20
K1	Lunisolar diurnal declination constituent	0.041781	23	56	4.09
N2	Larger lunar elliptic semidiurnal constituent	0.078999	12	39	30.05
M2	Principal lunar semidiurnal constituent	0.080511	12	25	14.16
S2	Principal solar semidiurnal constituent	0.083333	11	59	60.00
K2	Lunisolar semidiurnal constituent	0.083561	11	58	2.05

# Livello del mare

Analisi della marea  
 astronomica

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\sigma_n t - k_n)$$

Residui della componente astronomica



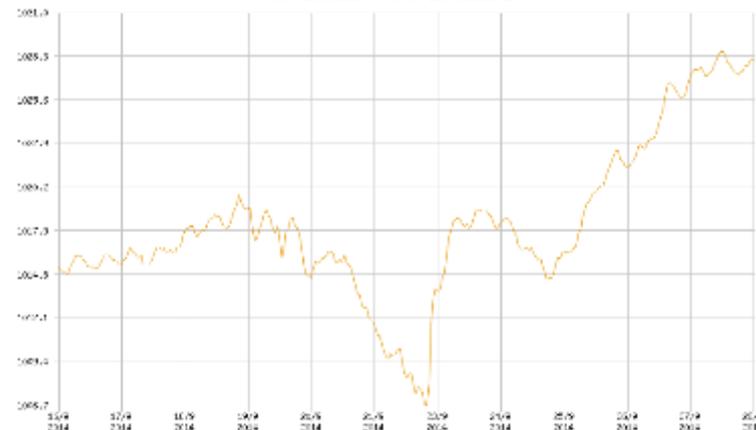
**Ancona, tornado a mezzanotte  
 centro della città al buio: è terrore  
 Superfast affonda sei pescherecci**

MARCHE  
 Martedì 23 Settembre 2014



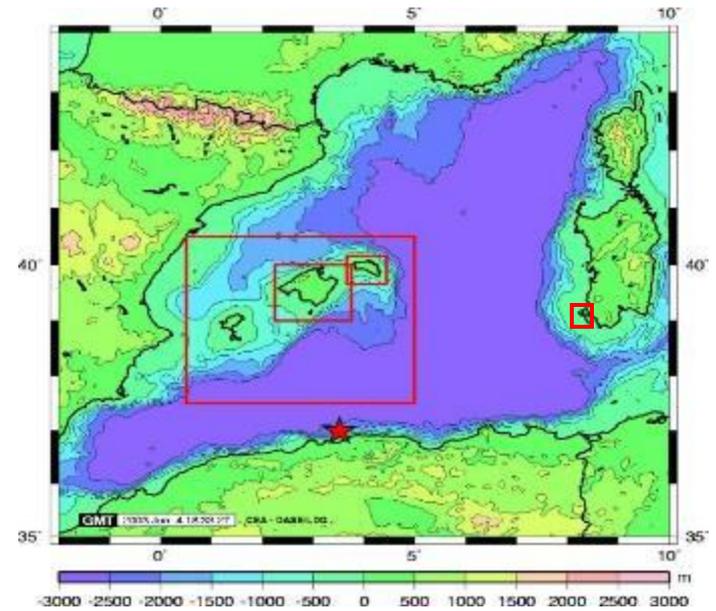
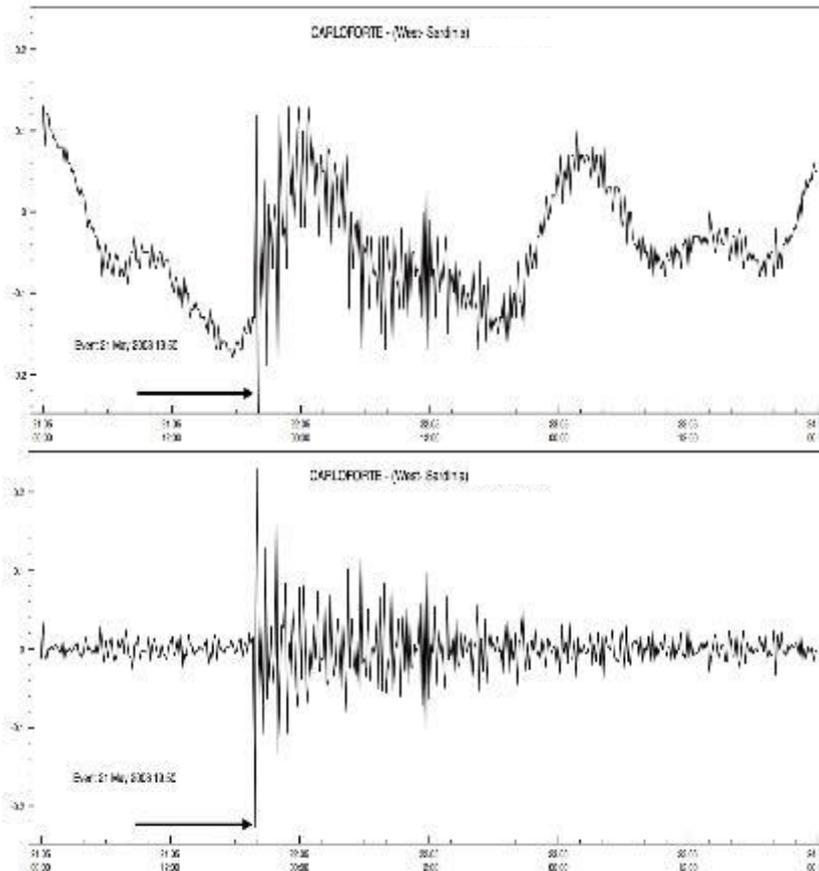
ANCONA Furiosa tromba d'aria, quasi un uragano, si è abbattuta a mezzanotte nella zona di Ancona. Venti fortissimi hanno sferzato il litorale provocando un ululato terrificante, impetuoso e improvviso, che ha allarmato l'intera popolazione. Si parla di circa 50 nodi di vento gregale da

AREA PORTUALE DI ANCONA -  
**ANCONA**  
 PRESSIONE AL MARELLI (hPa)  
 00:00 15.09.2014 - 00:00 25.09.2014 GMT



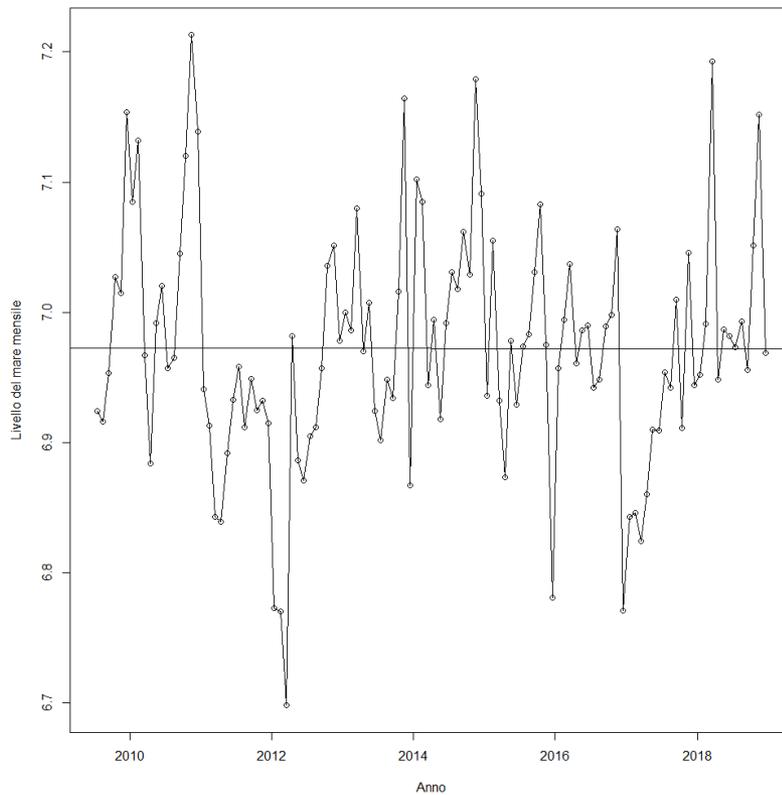
# Livello del mare

Tsunami



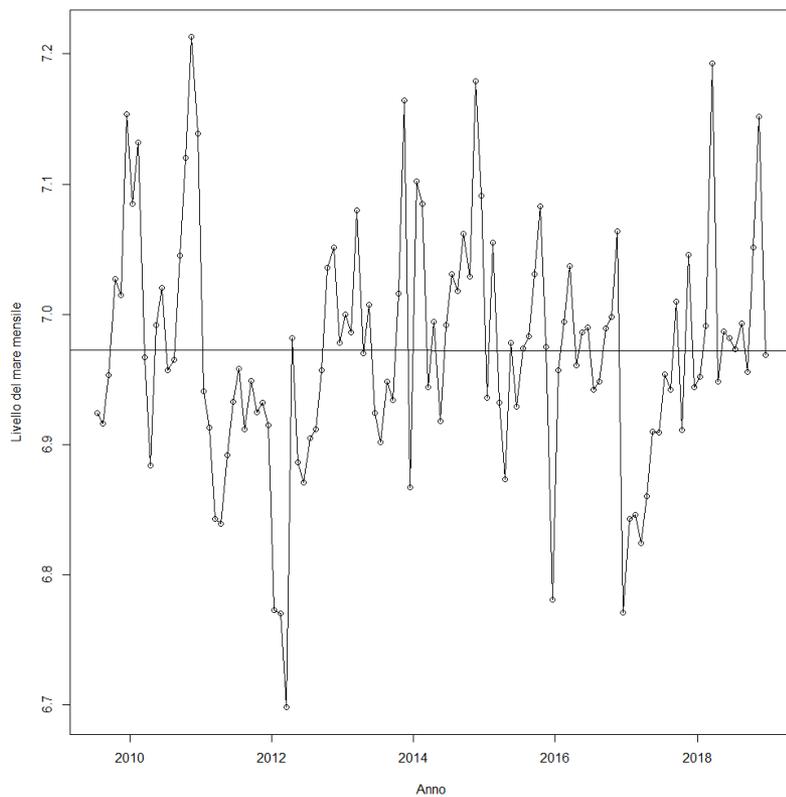
# Innalzamento del livello del mare

Media mensile del livello del  
mare a Ferrara

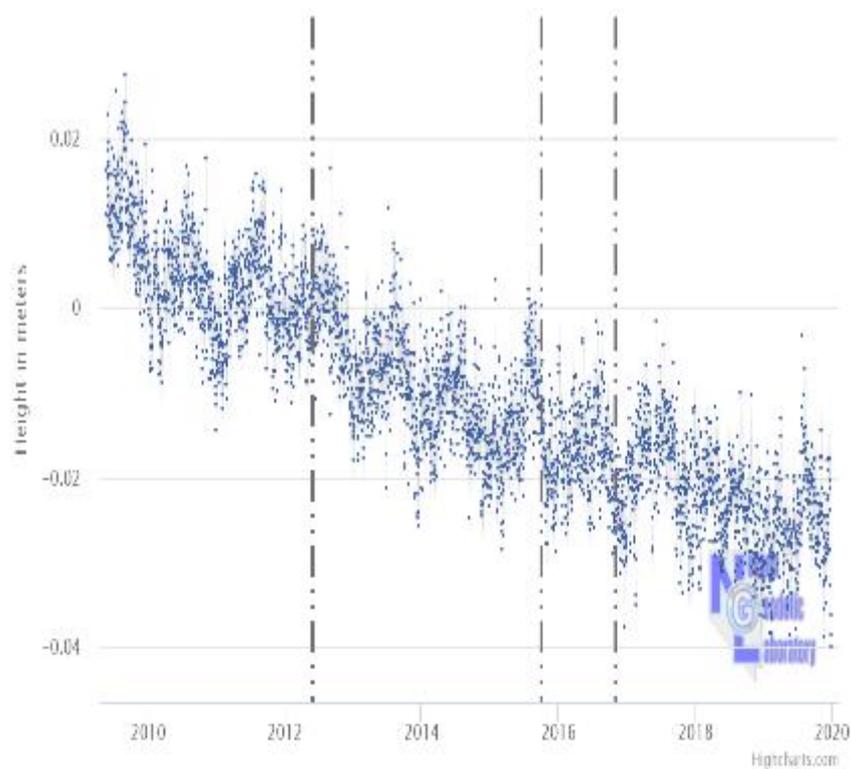


# Innalzamento del livello del mare

Media mensile del livello del mare a Ferrara



Spostamenti verticali della stazione a Ferrara (tramite GNSS)

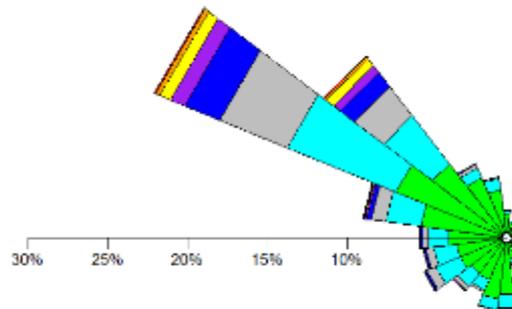


**ATTENZIONE !!!!!**

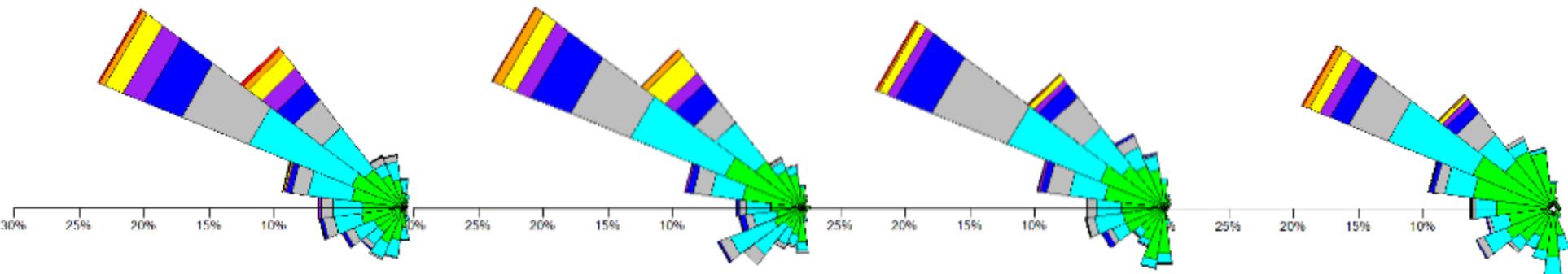
# Clima ondoso puntuale

- 0.25 - 1 m
- 1 - 2 m
- 2 - 3 m
- 3 - 4 m
- 4 - 5 m
- 5 - 6 m
- 6 - 7 m
- > 7 m

## Alghero



Usualmente rappresentato attraverso la distribuzione congiunta (in frequenza) dell'altezza d'onda significativa rispetto alla direzione di provenienza del moto ondoso.



**Inverno**

**Primavera**

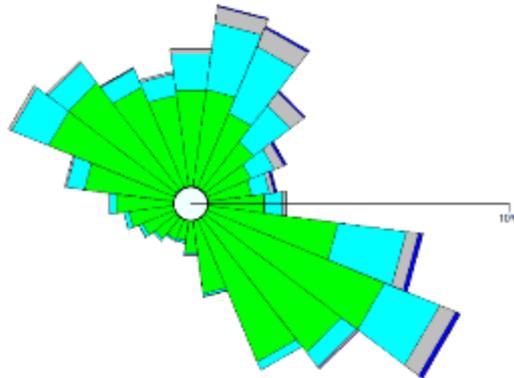
**Estate**

**Autunno**

## Clima ondoso puntuale

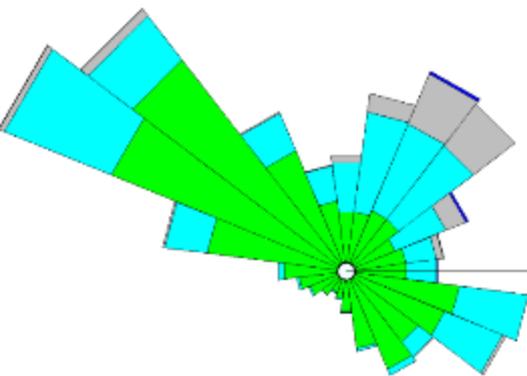


*Ancona*

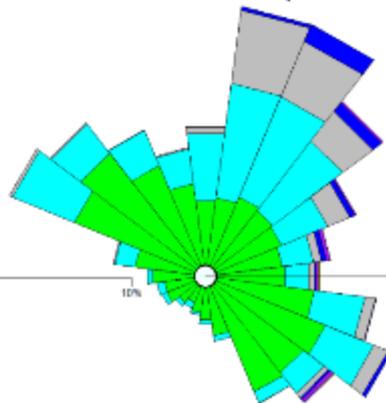


Usualmente rappresentato attraverso la distribuzione congiunta (in frequenza) dell'altezza d'onda significativa rispetto alla direzione di provenienza del moto ondoso.

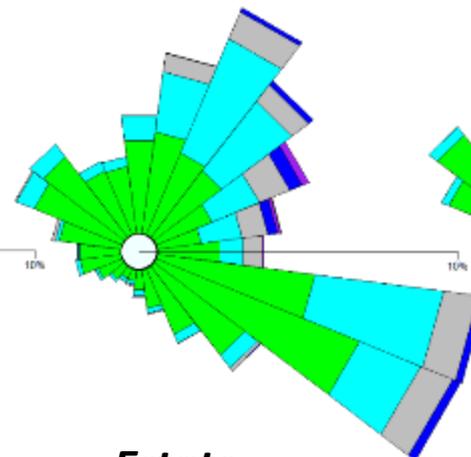
*Inverno*



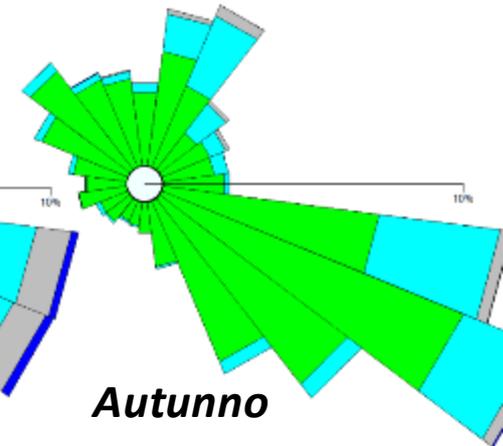
*Primavera*



*Estate*



*Autunno*



## Eventi estremi

La valutazione del rischio di accadimento di un evento di particolare intensità viene effettuata attraverso la definizione dello stato di mare, in termini di altezza d'onda significativa, associato ad un determinato periodo di ritorno

Differenti metodologie e nessuna normativa tecnica di riferimento.

- Selezione di dati omogenei (indipendenti)
- Individuazione del modello probabilistico che rappresenta i dati selezionati
- Determinazione del massimo valore di altezza d'onda atteso in un arco di tempo fissato



Cetraro

# Eventi estremi

## *Selezione dei dati omogenei – definizione dell'evento di mareggiata*

### *Peak Over Threshold*

La mareggiata è la successione di stati di mare tale che:

- La persistenza dell'altezza d'onda sopra una soglia determinata maggiore di 12 ore consecutive;
- Eventuale attenuazione dell'altezza d'onda sotto soglia per meno di 6 ore consecutive;
- Appartenenza della direzione di provenienza ad un determinato settore angolare

Per ogni mareggiata si estrae il valore di altezza massimo (picco della mareggiata)

### *Metodo dei massimi annuali*

Gli eventi estremi coincidono con i massimi annuali di altezza d'onda significativa (approccio Block Maxima)

```
select distinct ?period ?station ?maxWave ?dirWave
where {
  ?buoy a :MeasureStation;
  :measures ?waves;
  gn:nearbyFeature ?place.
  ?collection a :IndicatorCollection;
  :isIndicatorCollectionOf ?waves;
  dcterms:isPartOf ?dataset;
  :measurementPeriod ?period.
  ?indicator a :MarineIndicator;
  dcterms:isPartOf ?collection;
  dcterms:type typeind:monthlymaxhm0;
  rdf:value ?maxWave.
  ?indicator2 a :MarineIndicator;
  dcterms:isPartOf ?collection;
  dcterms:type typeind:monthlymaxdir;
  rdf:value ?dirWave.
  ?dataset dcterms:title 'Dataset RON'@it.
  ?place gn:name ?station.
}
```

ORDER BY ?station ?period

# Eventi estremi

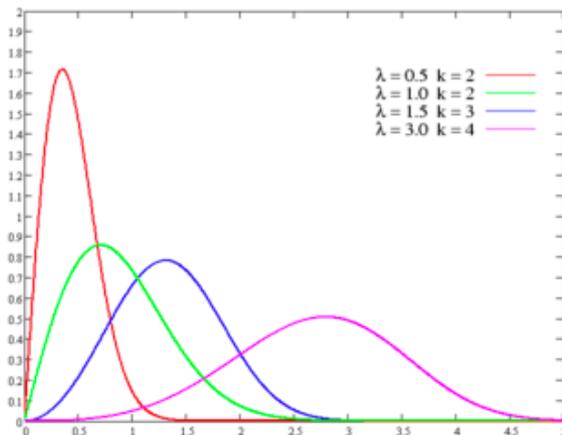
## Selezione dei dati omogenei – definizione dell'evento di mareggiata

### Peak Over Threshold

Generalized Pareto Distribution (GPD)

$$G(x; \mu; \sigma; \xi) = \begin{cases} 1 - \left(1 - \xi \frac{x - \mu}{\sigma_\mu}\right)^{1/\xi} & \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-(x - \mu)/\sigma_\mu} & \xi = 0 \end{cases}$$

### Pratica tecnica



### Metodo dei massimi annuali

Generalized Extreme Value Distribution (GEV)

$$G(x; \mu; \sigma; \xi) = \begin{cases} e^{-\left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}} & \xi \neq 0 \\ e^{-e^{-\frac{x - \mu}{\sigma}}} & \xi = 0 \end{cases}$$

Distribuzione

Campo di validità

Probabilità cumulata

**I Tipo**  
(Gumbel)

$$\begin{aligned} -x < H < x \\ -x < B < x \\ 0 < A < x \end{aligned}$$

$$F(H_i \leq H) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{H - B}{A}\right)\right\}$$

**II Tipo**  
(Fretchet)

$$\begin{aligned} 0 < H < x \\ 0 < k < x \\ 0 < A < x \end{aligned}$$

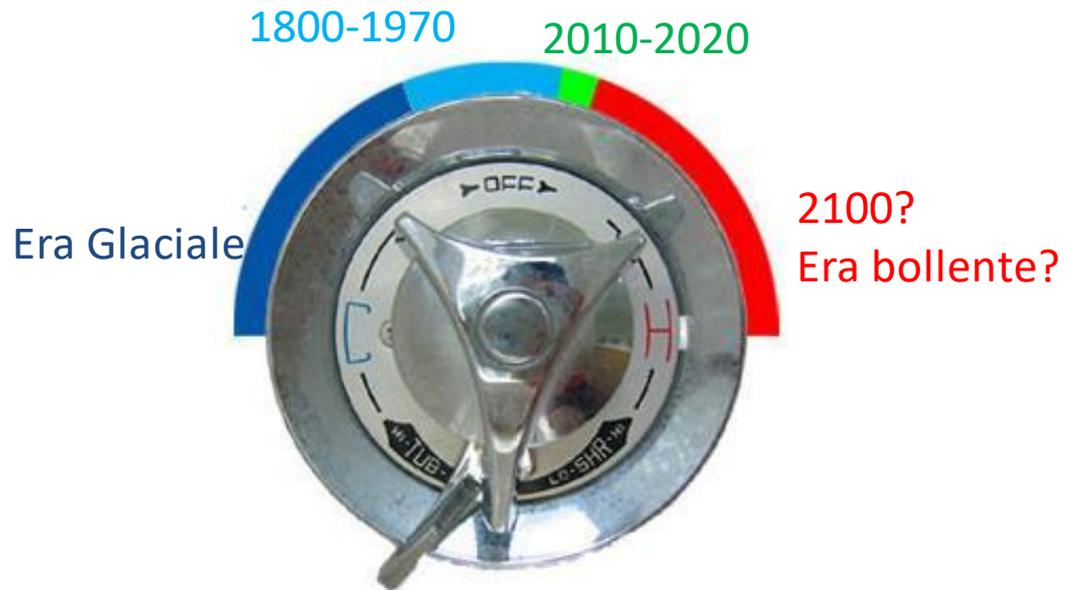
$$F(H_i \leq H) = \exp\left\{-\left(\frac{H}{A}\right)^{-k}\right\}$$

**III Tipo**  
(Weibull)

$$\begin{aligned} B < H < x \\ 0 < k < x \\ 0 < A < x \end{aligned}$$

$$F(H_i \leq H) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{H - B}{A}\right)^k\right\}$$

# Temperatura Superficiale del mare

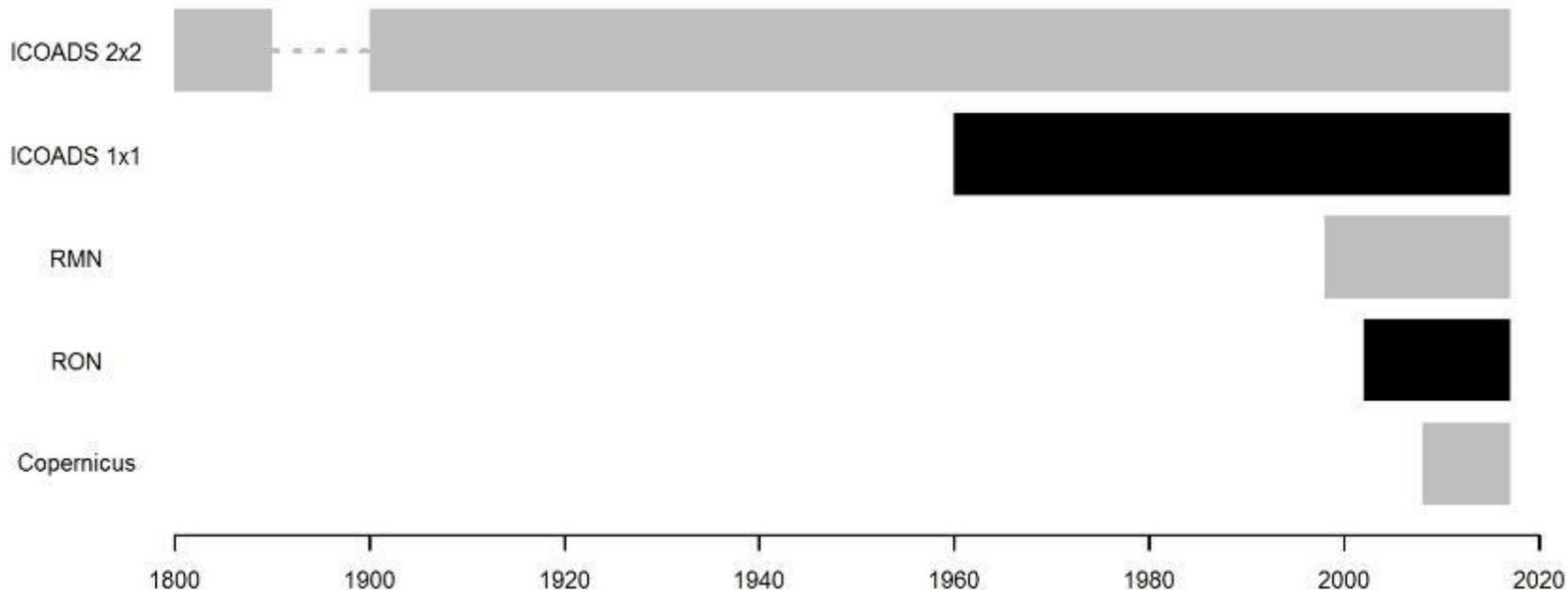




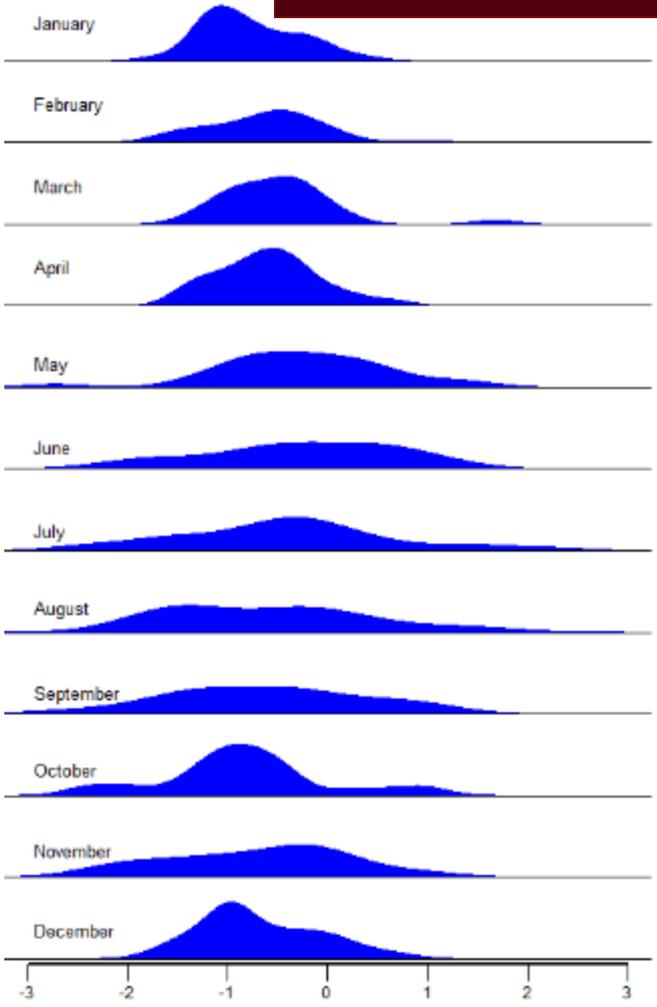
# Temperatura Superficiale del mare

Nei mari italiani

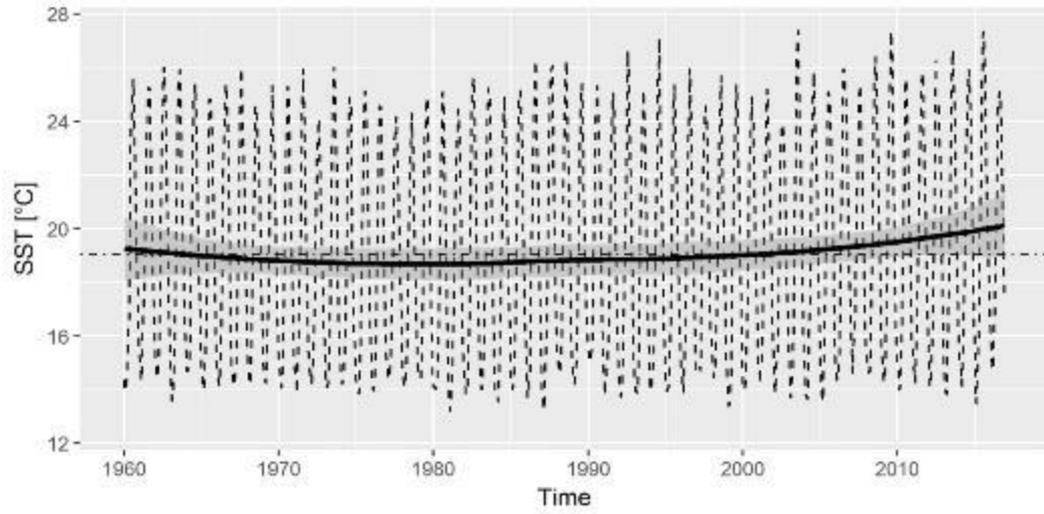
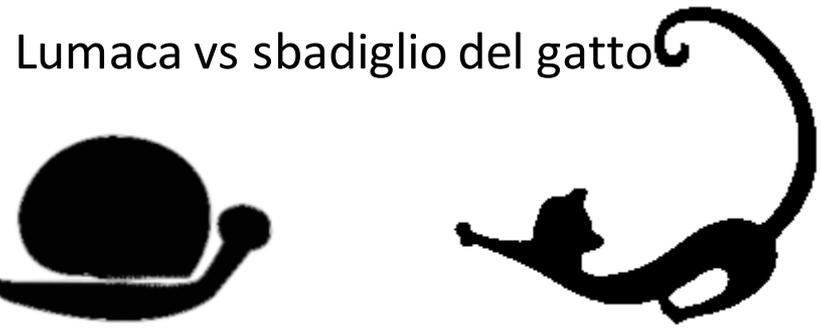
- International Comprehensive Ocean–Atmosphere Data Set (ICOADS) – valori mensili
- Reti di monitoraggio ISPRA (RON; RMN) – valori orari
- Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) – valori giornalieri



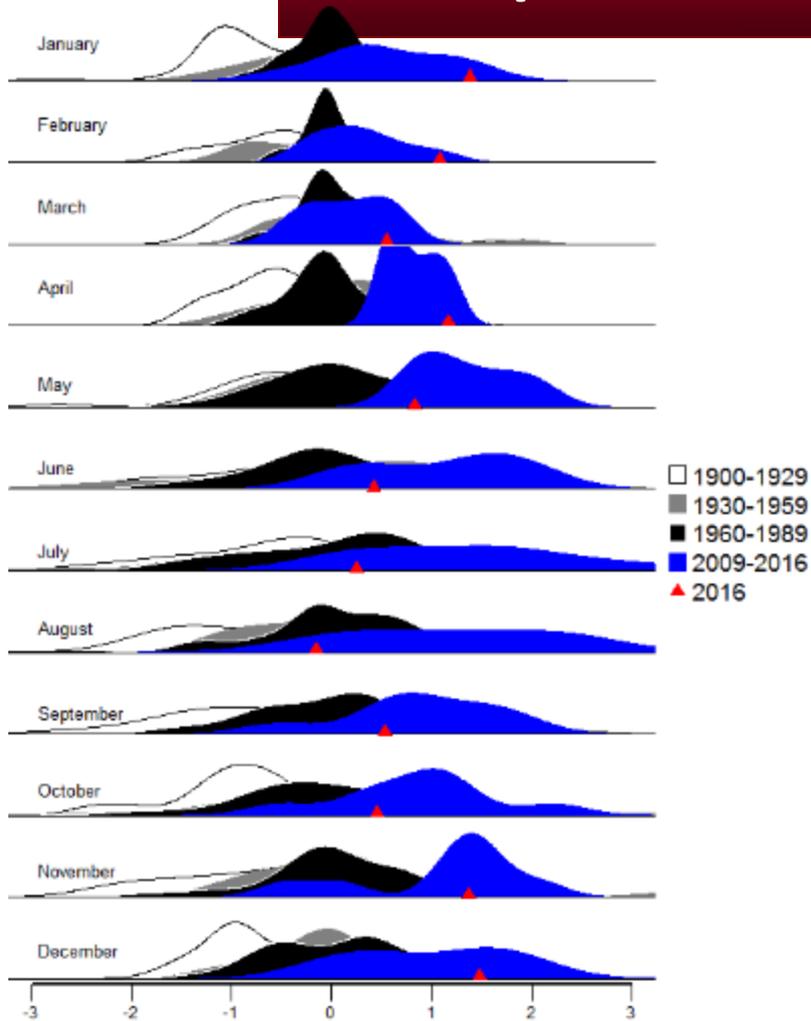
# Temperatura Superficiale del mare



1900-1929  
 1900-1929



# Temperatura Superficiale del mare



Lumaca vs sbadiglio del gatto

