

INCERTEZZA PREDITTIVA E PREVISIONE DELLA MAREA



Previsione multitemporale dell'acqua alta a Venezia

E.Todini¹, S. Morucci², M.Ferla², G.Coccia³

¹ Società Idrologica Italiana

² Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale (ISPRA)

³ Risk, Engineering+Design (RED)

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**
- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**
 - Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)
- **Risultati**

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**

- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**

- Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)

- **Risultati**

Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica

Sono ormai molti anni che la questione è dibattuta, ma non tutti hanno colto l'aspetto fondamentale del problema.

Quando si prende una decisione condizionata dalla scarsa conoscenza di ciò che realmente potrà avvenire non è corretto valutare costi e benefici in base al valore atteso di ciò che avverrà.

Ciò è dovuto al legame essenzialmente non-lineare tra costi e variabile che li condiziona, come ad esempio il livello dell'acqua alta nel caso di Venezia ed il costo di un'allerta con tutto ciò che comporta in termini economici o dell'istallazione di passerelle o, come probabilmente avverrà, l'attivazione di palancole ad innalzamento temporaneo.

È quindi fondamentale fornire a chi deve decidere la migliore Distribuzione di Probabilità Predittiva possibile con cui si possa calcolare il valore atteso dei benefici (incerti) a fronte di spese (questa volta certe) da effettuare per fronteggiare la situazione di emergenza. È anche utile sapere quanto più approssimativamente quando si verificherà l'evento onde programmare gli interventi.

Questo è essenzialmente lo scopo del lavoro qui presentato per passare dalla classica previsione deterministica ad una efficiente ed efficace previsione probabilistica.

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**

- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**

- Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)

- **Risultati**

Il livello del mare: Venezia

- La variazione del livello del mare e la sua previsione sono fondamentali per prevenire e limitare i danni da inondazione costiera
- La laguna di VENEZIA è in Italia una delle aree maggiormente esposte ai fenomeni mareali e al rischio di inondazione sia per l'innalzamento del livello del mare che per gli storm surge: l'ACQUA ALTA

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**
- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**
 - Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)
- **Risultati**

L'Acqua Alta a VENEZIA

COSA MISURIAMO e PREVEDIAMO?

Livello del mare: livello medio del mare + effetti di breve periodo
+ effetti di lungo periodo

EFFETTI DI BREVE PERIODO

- marea astronomica
- effetti meteorologici
(vento e pressione atmosferica, storm surge, tsunami)

EFFETTI DI LUNGO PERIODO

- cambiamento di volume degli oceani
(scioglimento o espansione dei ghiacciai ecc.)
- variazione della capacità di contenimento dei bacini oceanici (per sollevamento o subsidenza della costa ecc.)

Il livello del mare è caratterizzato dalla sovrapposizione di due componenti, una periodica e prevedibile (**astronomica**) e una componente “random” (**meteorologica**)

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**
- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**
 - Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)
- **Risultati**

L'Acqua Alta a VENEZIA

LE PREVISIONI

Perché?

Il fine è di fronteggiare gli effetti indesiderati associati ai fenomeni di sovralzo: allagamenti della città di Venezia, accessibilità dei porti, rischio di esondazione dovuto al rigurgito alle foci fluviali, navigazione a Venezia ecc.

Come prevedere l'Acqua Alta?

- La previsione del **contributo astronomico** è largamente studiata ed è appurata la metodologia di Doodson che utilizza il calcolo delle costanti armoniche a partire dalle misure osservate in uno specifico sito

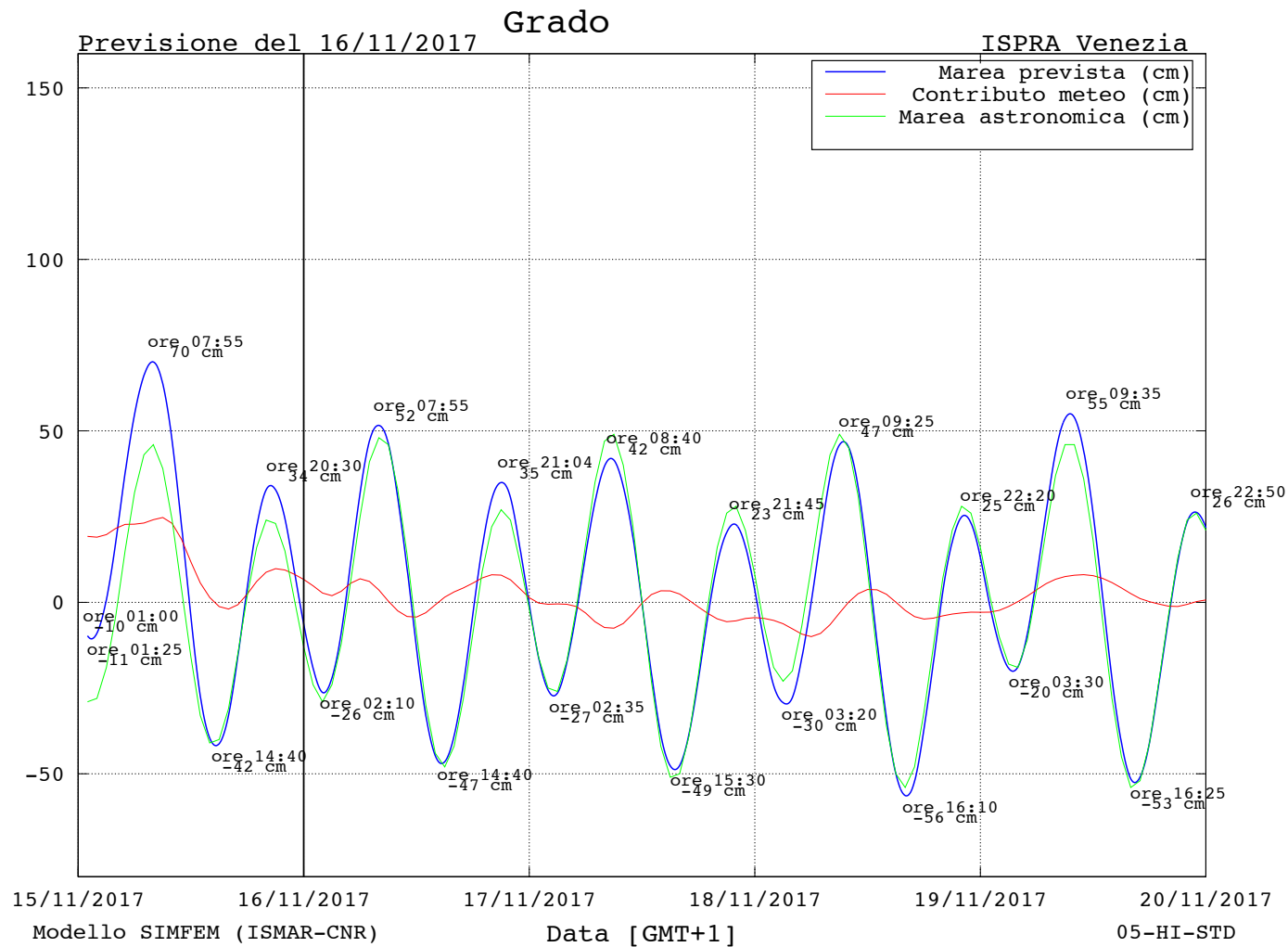
$$y(t) = A_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos 2\pi(\sigma_j t - \phi_j).$$

A_j ed f_j devono essere scelti in modo da minimizzare l'errore tra $y(t_i)$ stimato ed y_i osservato (A_j ed f_j sono le ampiezze e le frequenze costanti armoniche)

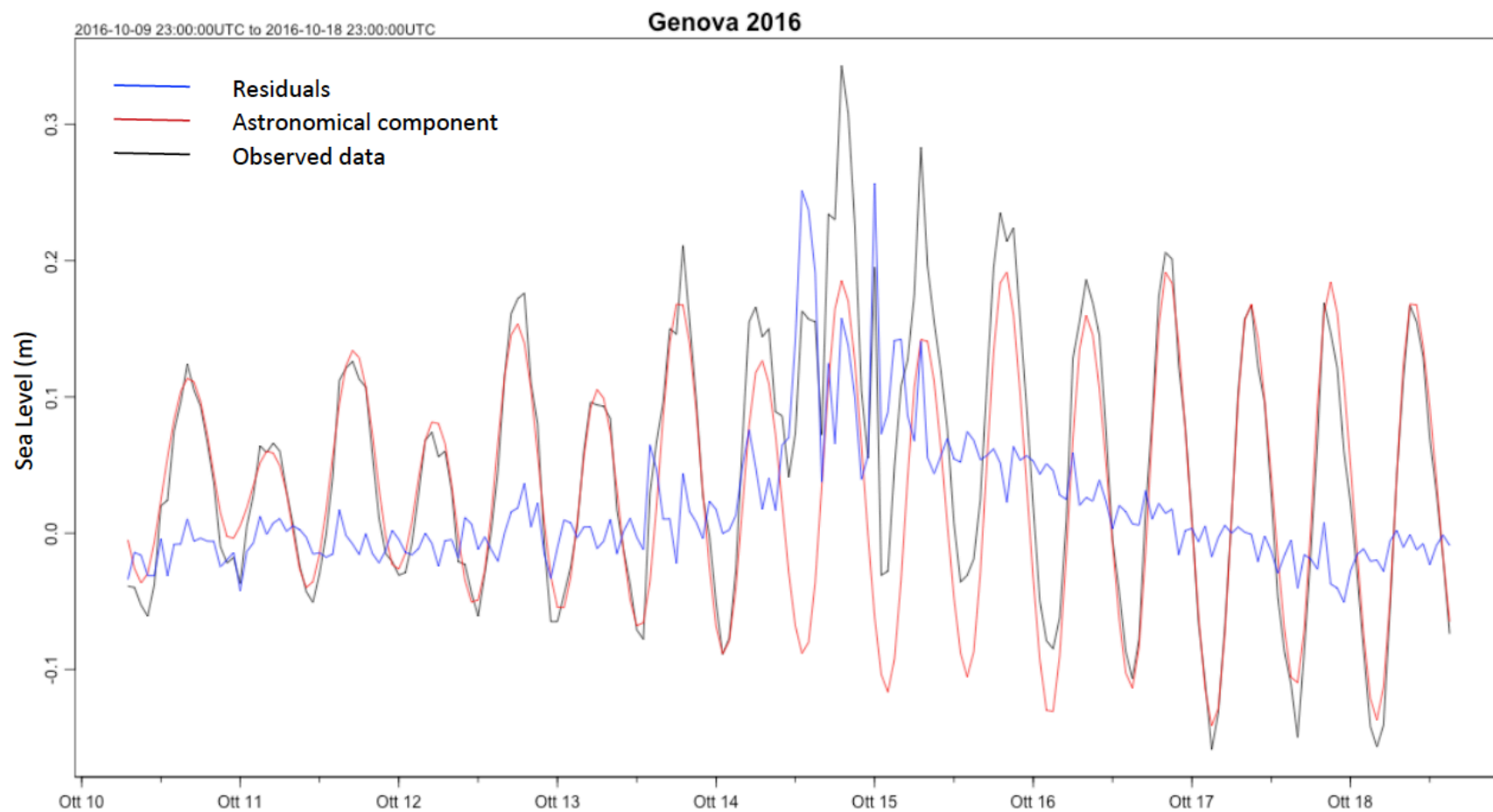
- La **componente meteo** può essere prevista impiegando varie tipologie di modelli: in questo caso, **modelli statistici e deterministici**

L'Acqua Alta a VENEZIA

Componente astronomica e meteorologica



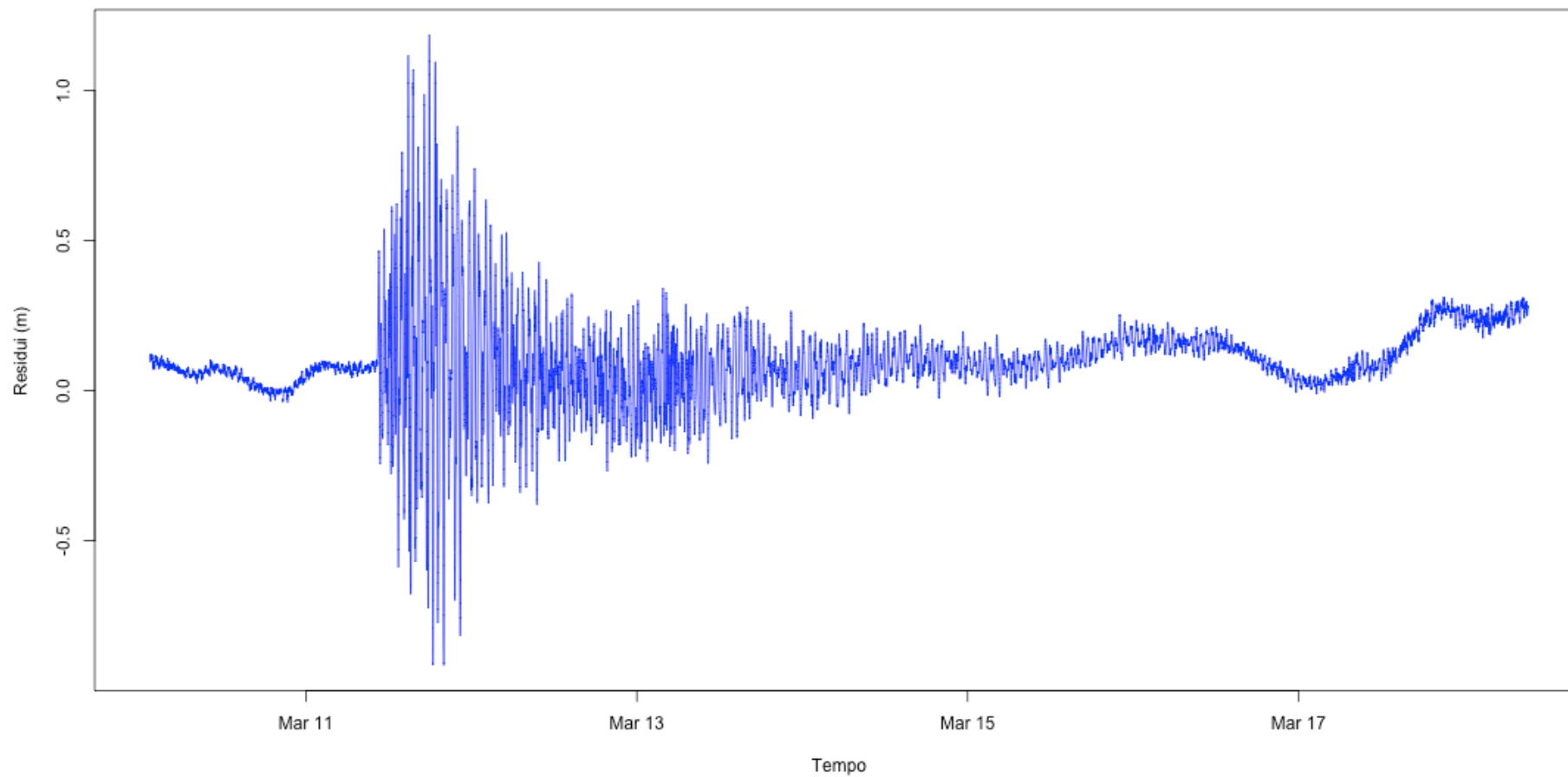
L'Acqua Alta a VENEZIA



L'Acqua Alta a VENEZIA

Adak - Residui 2011

Tsunami Oceano Pacifico 2011




L'Acqua Alta a VENEZIA


LE PREVISIONI

Modello Statistico - **ISPRA_STAT2008**

Modello Deterministico - **SHYFEM**
 modello idrodinamico bidimensionale agli
 elementi finiti

INPUT

 **pressione** misurata
 (RMN) e
 prevista (ECMWF)


 **vento** misurato presso
 Piattaforma CNR e
 previsto (ECMWF)

sovrizzo osservato
 nelle 24 ore
 precedenti nelle
 stazioni della Laguna



pressione prevista da
 BOLAM – ISPRA (area
 limitata) e da ECMWF
 (globale)


vento previsto da
 BOLAM – ISPRA (area
 limitata) e da ECMWF
 (globale)

 **sovrizzo** osservato
 (RMN) ed RMLV
 nella configurazione
 con assimilazione

L'Acqua Alta a VENEZIA LE PREVISIONI

Modello Statistico - **ISPRA_STAT2008**



Sovralzo

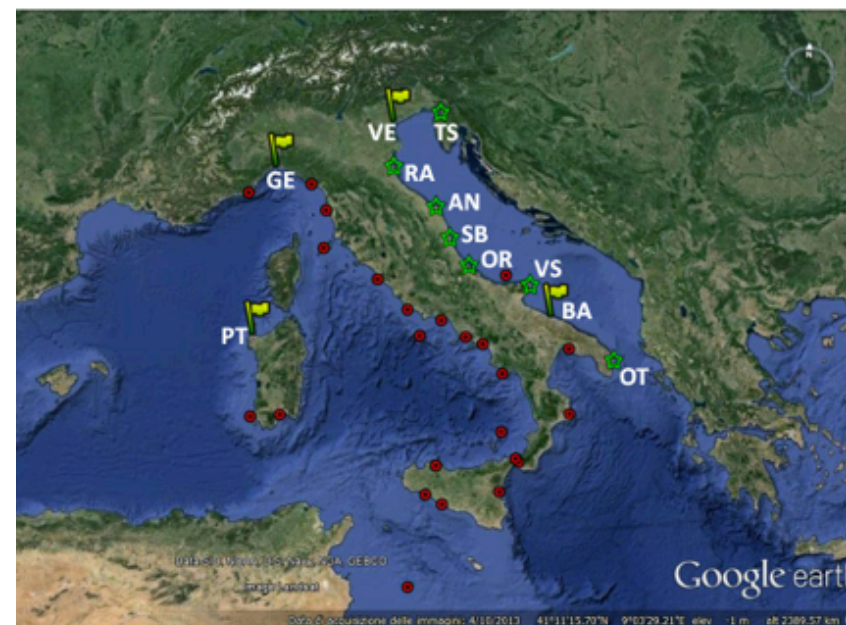
Previsione a 48 ore con
risoluzione oraria 



Modello Deterministico - **SHYFEM** modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti

Sovralzo

  Previsione a 96 ore con
risoluzione oraria



RISULTATI

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**
- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**

- Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)

- **Risultati**

La Distribuzione di Probabilità Predittiva

tristemente nota come

Incertezza Predittiva

L'Incertezza Predittiva può essere definita come **la probabilità** che si verifichi un **certo evento ad un certo istante futuro** calcolata condizionatamente alle informazioni disponibili dai modelli previsionali (nel presente)

- **Non** è dunque una stima della capacità di un modello di realizzare una previsione
 - **Non** è una stima dell'errore dei modelli nel prevedere gli eventi futuri, ma una stima della probabilità che si verifichi un certo evento e in quale istante
-

Cosa si intende con INCERTEZZA PREDITTIVA?

L'INCERTEZZA PREDITTIVA È QUANTIFICATA IN TERMINI DELLA DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ

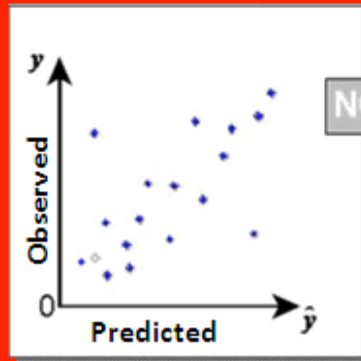
- Se le informazioni disponibili sono quelle di un solo modello, l'Incertezza Predittiva può essere così descritta

$$f(y_t | (\hat{y}_t | x_{t_0}, \theta)) = f(y | \hat{y})$$

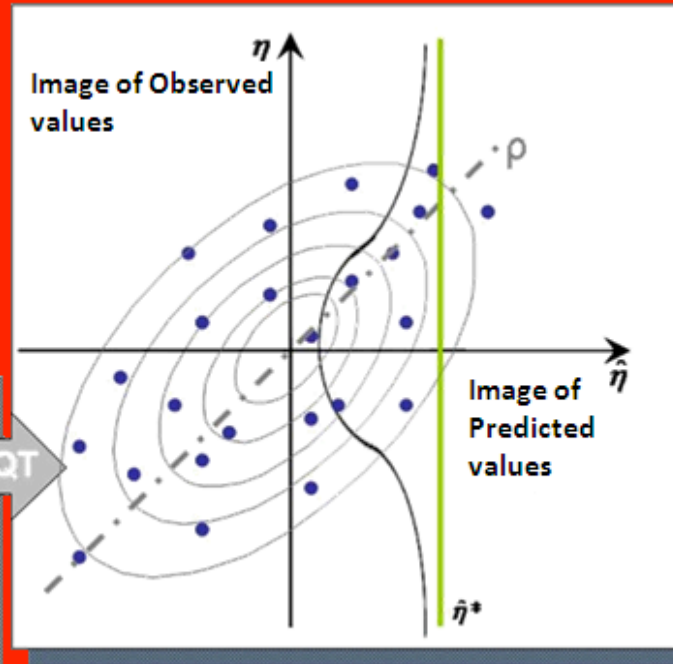
- La stima di questa distribuzione di probabilità predittiva si ottiene a partire dalla stima della distribuzione congiunta “predittando-predittore” nello spazio Gaussiano
- Nel caso di Venezia è stato utilizzato il modello nella sua configurazione Multi-modello e Multi-temporale

1) Conversione dallo Spazio Reale allo spazio Normale usando la trasformazione NQT

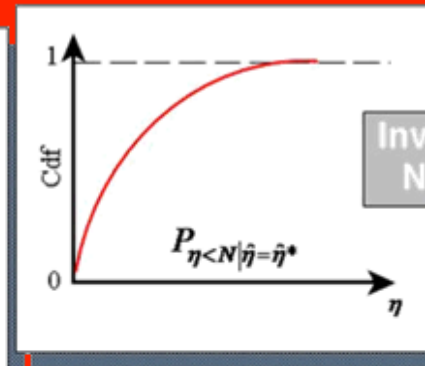
Historical data



Joint Pdf



Conditioned Cdf



$$f(y | \hat{y} = \hat{y}^*)$$

3) L'Incertezza Predittiva si ottiene attraverso il Teorema di Bayes e la sua media e la sua varianza sono:

$$\mu_{\eta|\hat{\eta}} = \rho_{\eta\hat{\eta}} \hat{\eta}^*$$

$$\sigma_{\eta|\hat{\eta}}^2 = 1 - \rho_{\eta\hat{\eta}}^2$$

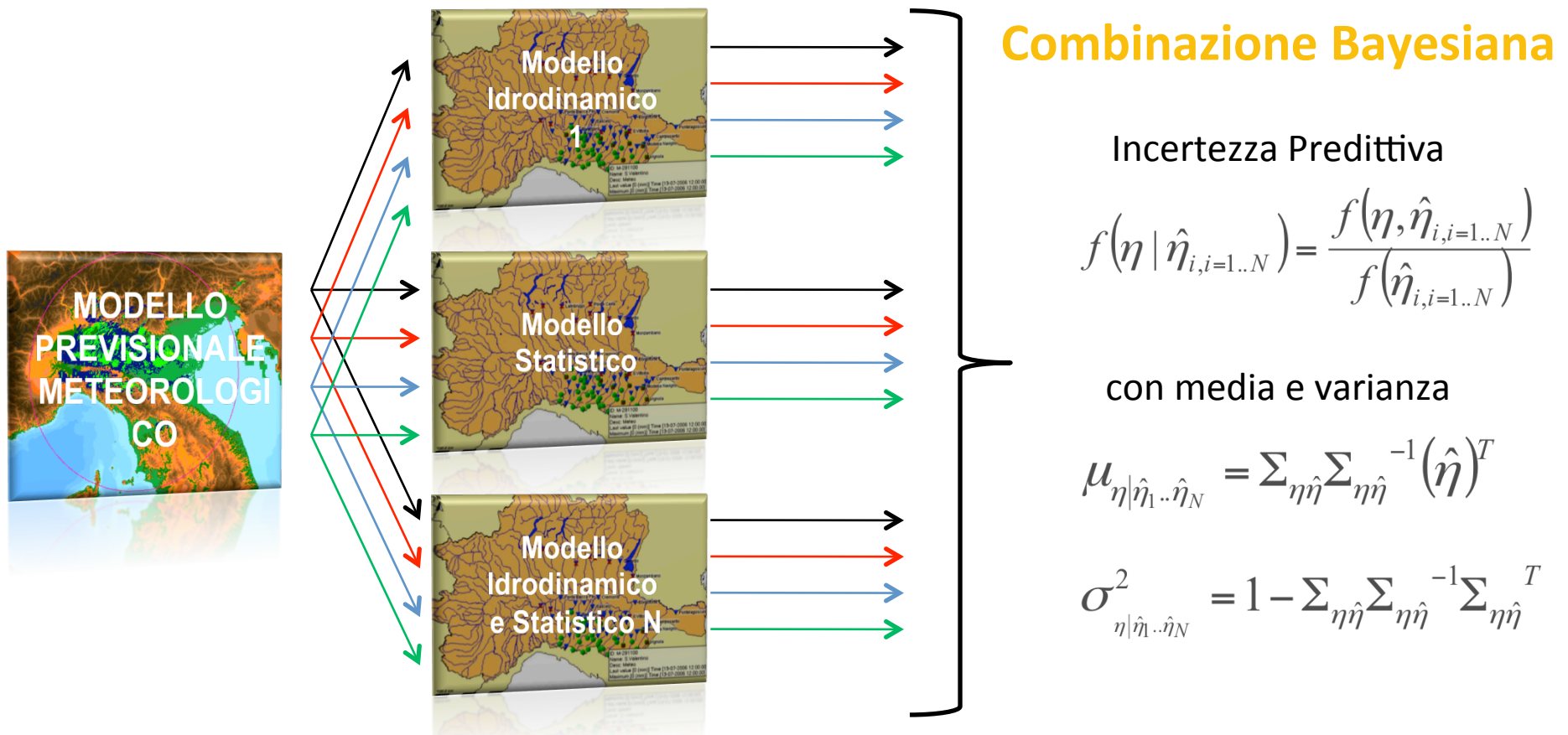
4) L'Incertezza Predittiva si calcola campionando la Densità di Probabilità nello Spazio Normale e poi riconvertendo nello Spazio Reale i quantili ottenuti usando la trasformazione NQT inversa:

$$E\{y | \hat{y} = \hat{y}^*\} = E\{NQT^{-1}[f(\eta|\hat{\eta} = \hat{\eta}^*)]\}$$

2) La distribuzione congiunta si assume essere una Distribuzione Normale Bivariata

APPROCCIO MULTI-MODEL

Qualora siano disponibili (es. Venezia) più modelli previsionali (N), si possono combinare le informazioni provenienti da questi, generalizzando la procedura al caso N dimensionale ed ottenendo una Distribuzione Normale N+1 variata



APPROCCIO MULTI-TEMPORAL

- La procedura può essere generalizzata considerando le previsioni disponibili **su tutto l'orizzonte temporale**, ottenendo una distribuzione che consenta di prevedere anche l'istante in cui ci aspetta che avvenga il superamento della soglia
- Rispetto all'approccio Multi-Model, la dimensione di tutte le distribuzioni considerate nella formulazione Bayesiana, va moltiplicata per il numero di passi temporali

(N+1) · T - VARIATE

T - VARIATE

$$f\left(\eta_{j(j=1..T)} \mid \hat{\eta}_{ij(i=1..N, j=1..T)}\right) = \frac{f\left(\eta_{j(j=1..T)}, \hat{\eta}_{ij(i=1..N, j=1..T)}\right)}{f\left(\hat{\eta}_{ij(i=1..N, j=1..T)}\right)}$$

N · T - VARIATE

N = NUMERO DI MODELLI

T = NUMERO DI PASSI TEMPORALI

Introduzione

- **Alcune considerazioni sulla necessità di una previsione probabilistica**
- **Il livello del mare: prevederlo e perché**

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

- **Il Modello della Distribuzione di Probabilità Predittiva**
 - Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)

● **Risultati**

Introduzione

● Il livello del mare: prevederlo e perché

L' ACQUA ALTA A VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

Previsioni:

- I modelli

● Il Modello di Incertezza Predittiva

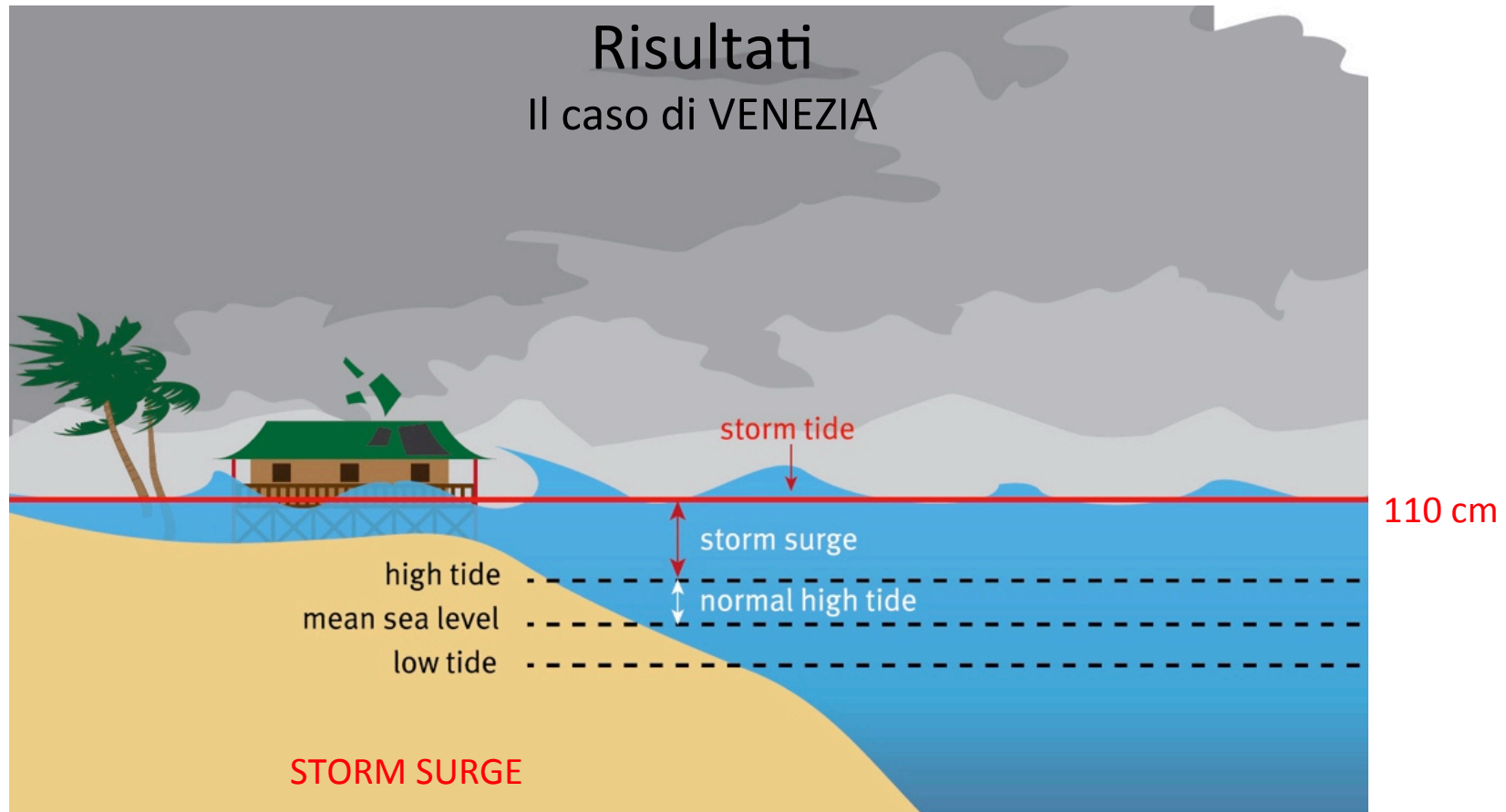
- Il modello Model Conditional Processor (MCP/MT)

● Risultati

APPROCCIO MULTI-MODEL e MULTI-TEMPORAL

L'approccio Multi-Modello, Multi-Temporale consente di rispondere a tutte queste domande

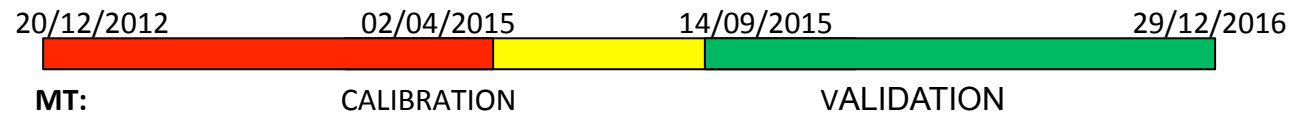
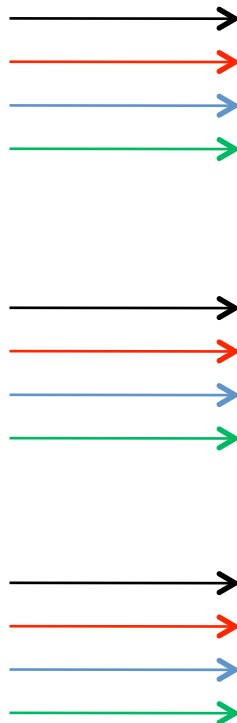
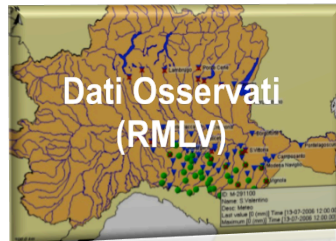
- ▶ *Quale è la probabilità che il livello del mare superi una certa soglia alla 24 ora?*
- ▶ *Quale è la probabilità che una certa soglia venga superata nelle prossime 24 ore?*
- ▶ *Quale è la probabilità che il superamento avvenga ad un certo istante?*



- Risposte fondamentali per decidere se e come intervenire tempestivamente
- Pericolo storm surge (vento, pressione, onde) e di inondazione costiera
- Soglie di attenzione scelte nel caso di Venezia
 - 80 cm
 - 90 cm
 - 100cm

Risultati

Il caso di VENEZIA



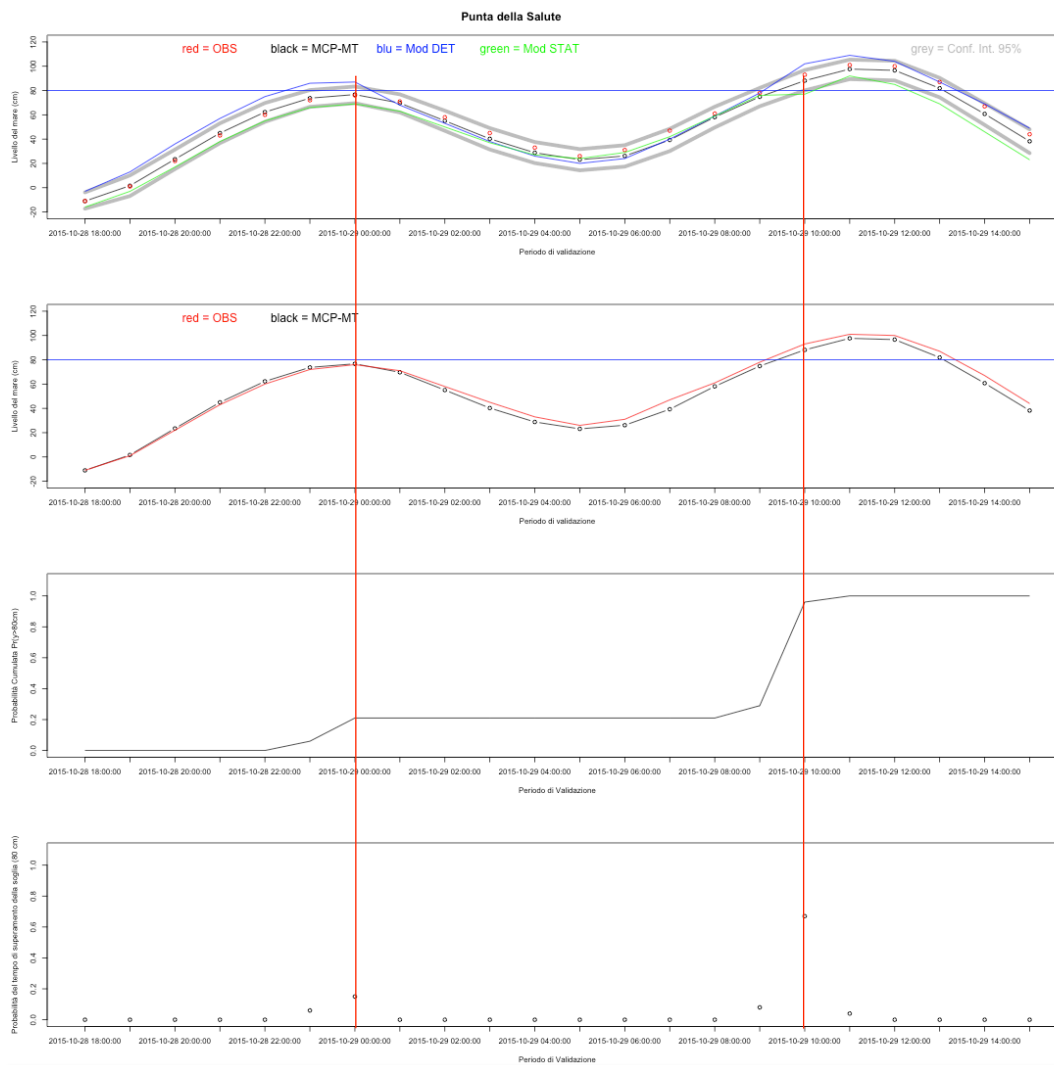
- STAZIONE di PUNTA DELLA SALUTE
- Previsioni orarie
- Dati osservati orari



Tempo di previsione 24 ore

Risultati

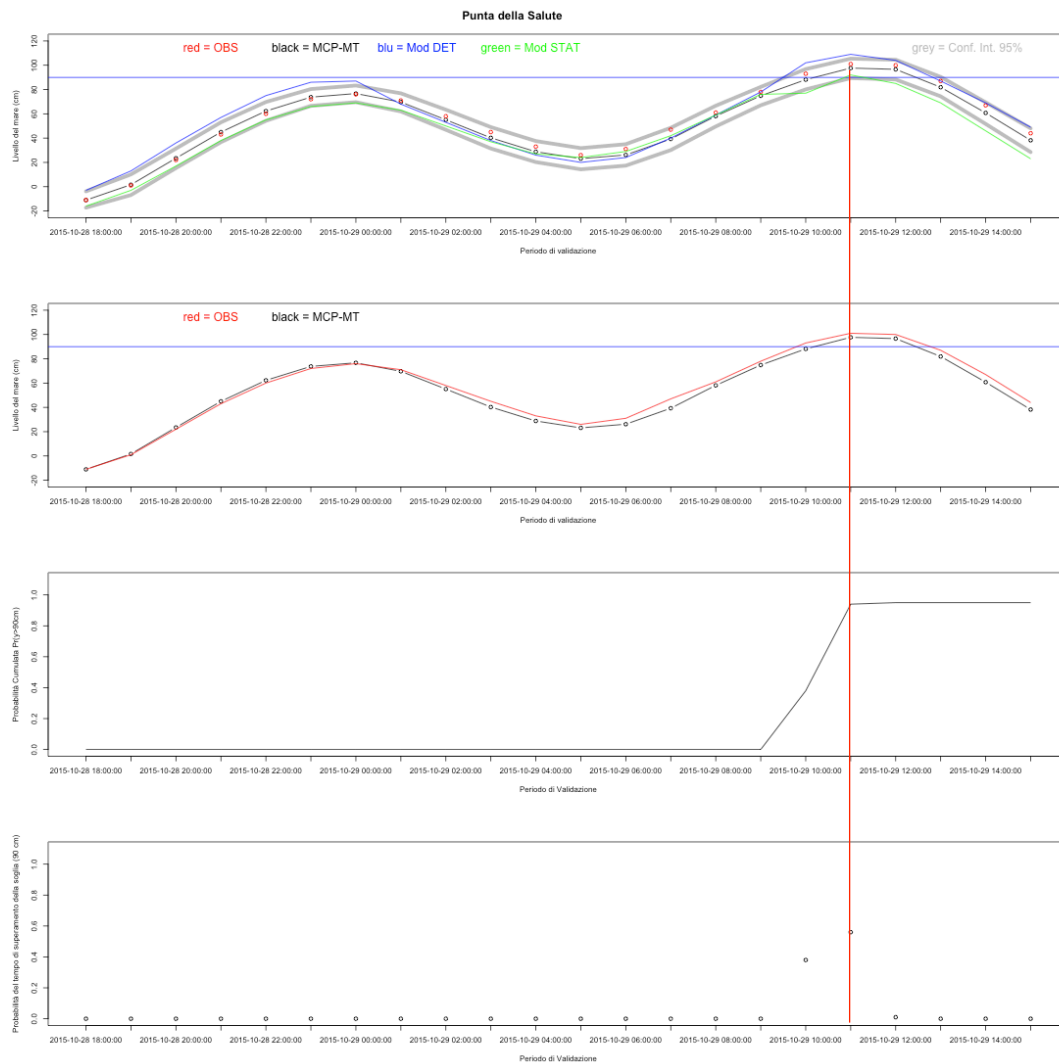
Il caso di VENEZIA



- Evento del 28-29 Ottobre 2015
- Soglia 80 cm
- Previsione a 24 ore

Risultati

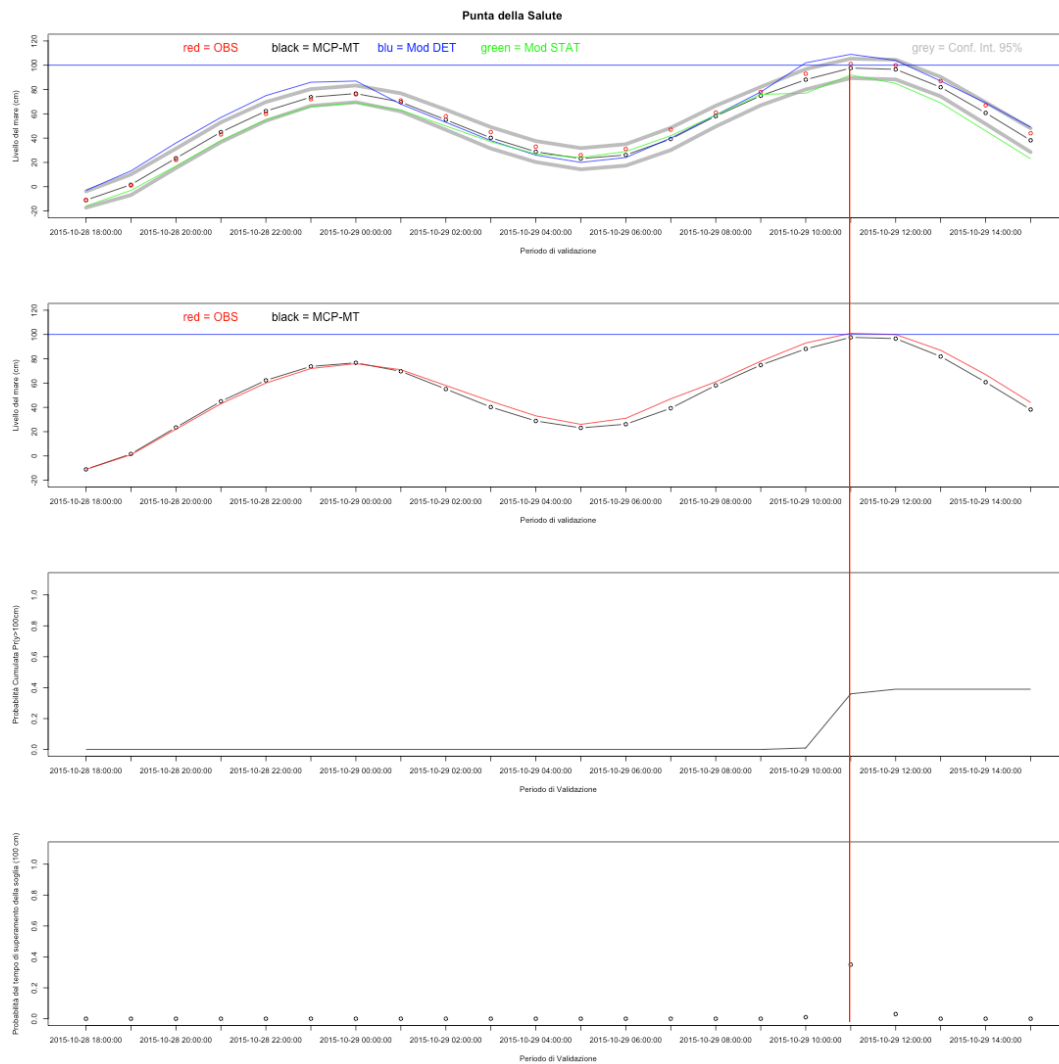
Il caso di VENEZIA



- Evento del 28-29 Ottobre 2015
- Soglia 90 cm
- Previsione a 24 ore

Risultati

Il caso di VENEZIA

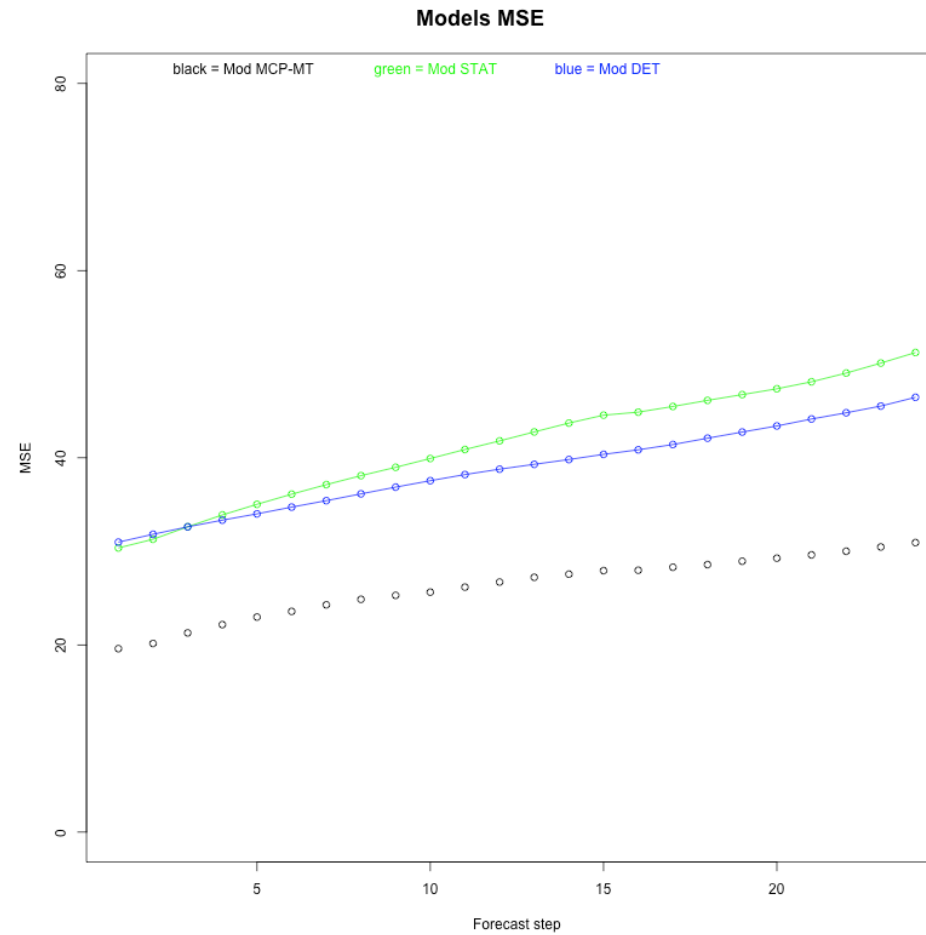


- Evento del 28-29 Ottobre 2015
- Soglia 100 cm
- Previsione a 24 ore

Risultati

- Errore Quadratico Medio al variare dello step di previsione

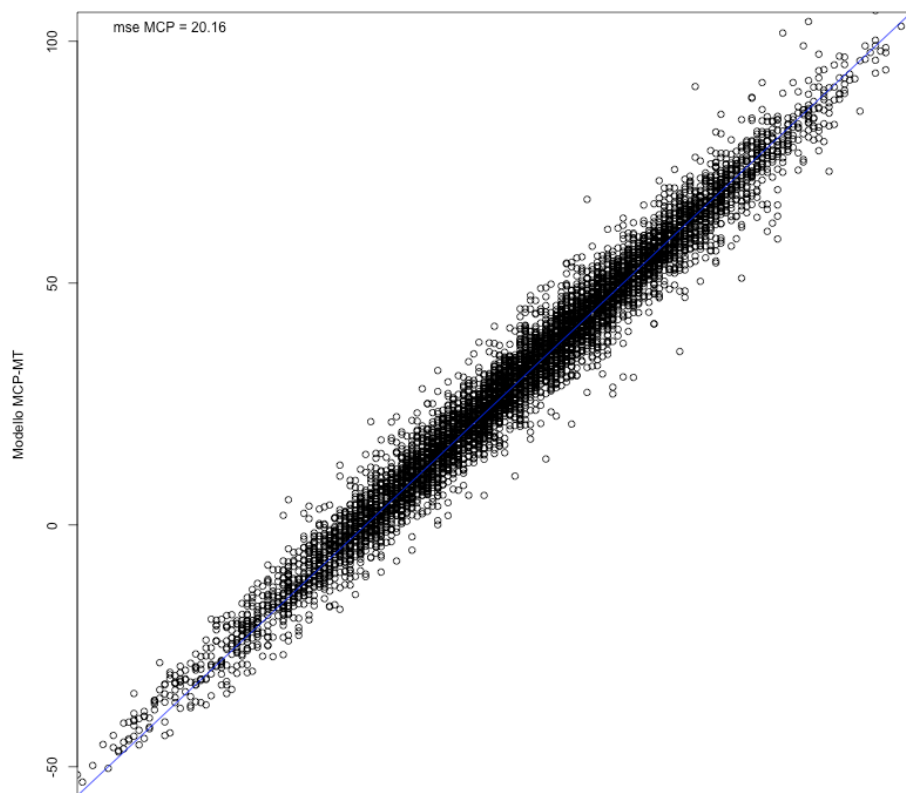
Il caso di VENEZIA



Risultati

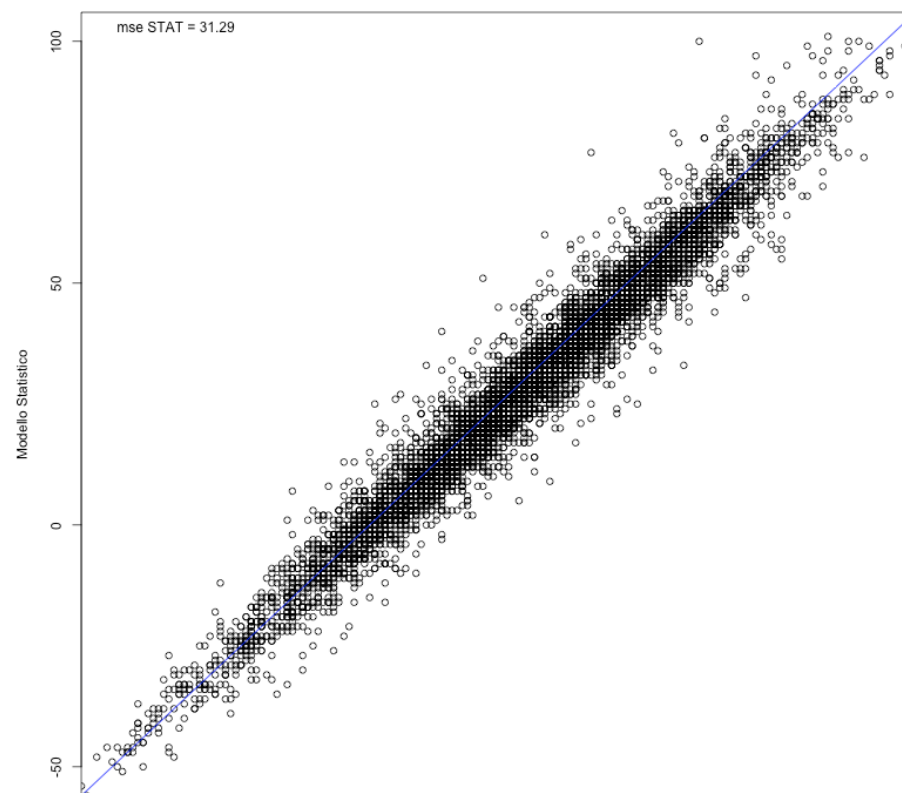
- Stima della bontà della previsione
dopo 1 h **Il caso di VENEZIA**

MCP-MT vs Osservazioni



Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Modello Statistico vs Osservazioni - PUNTA DELLA SALUTE



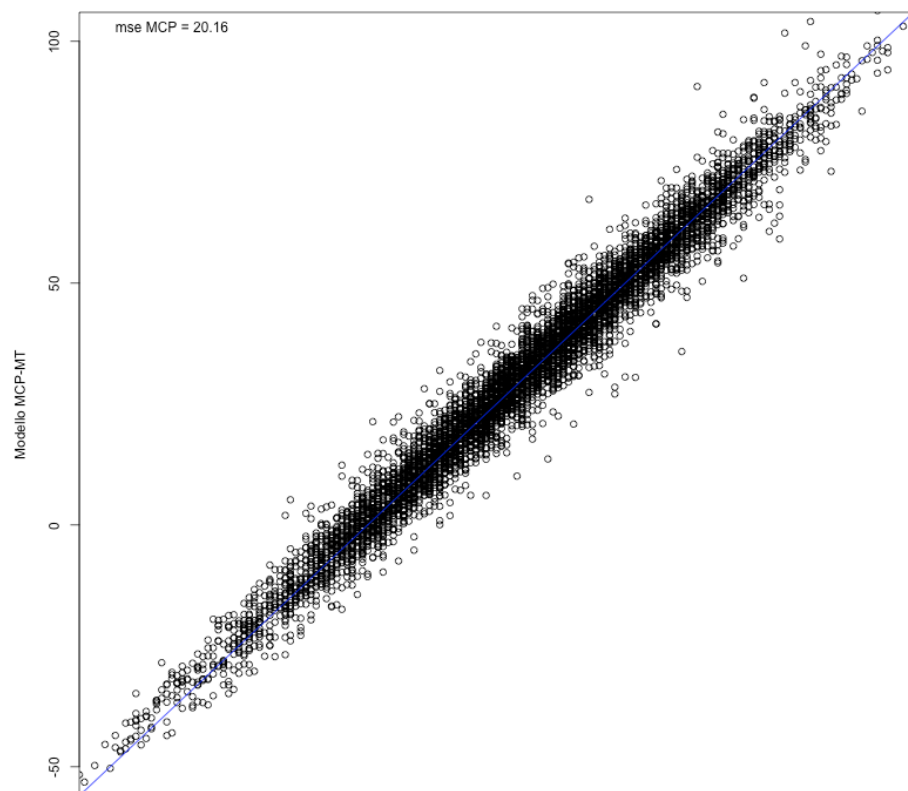
Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Risultati

Il caso di VENEZIA

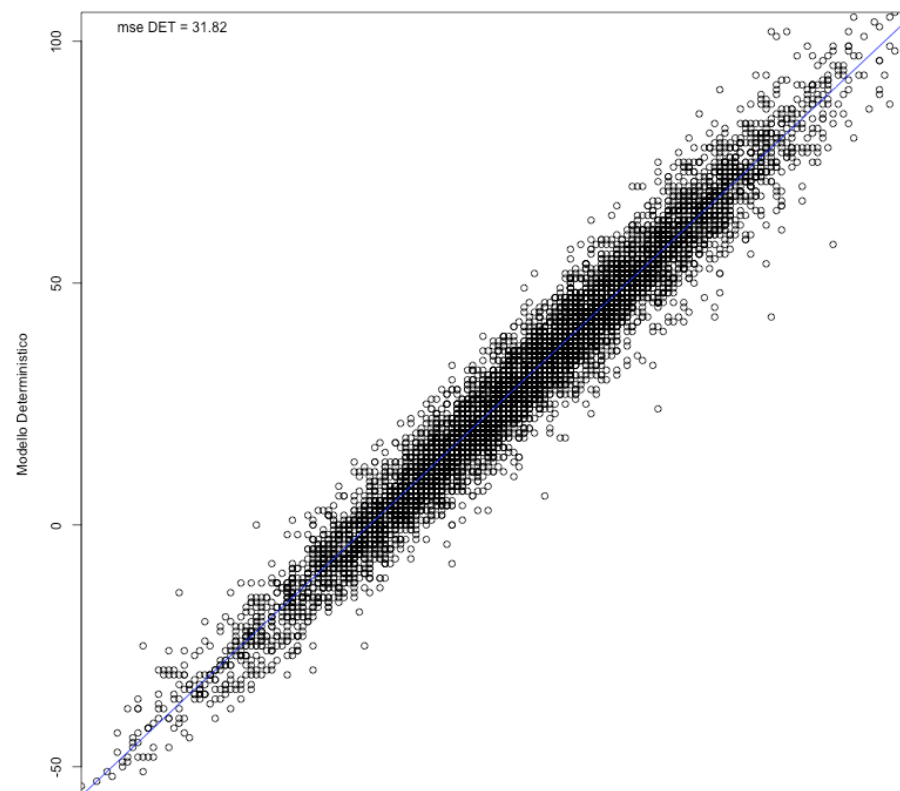
- Stima della bontà della previsione dopo 1 h

MCP-MT vs Osservazioni



Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Modello Deterministico vs Osservazioni - PUNTA DELLA SALUTE



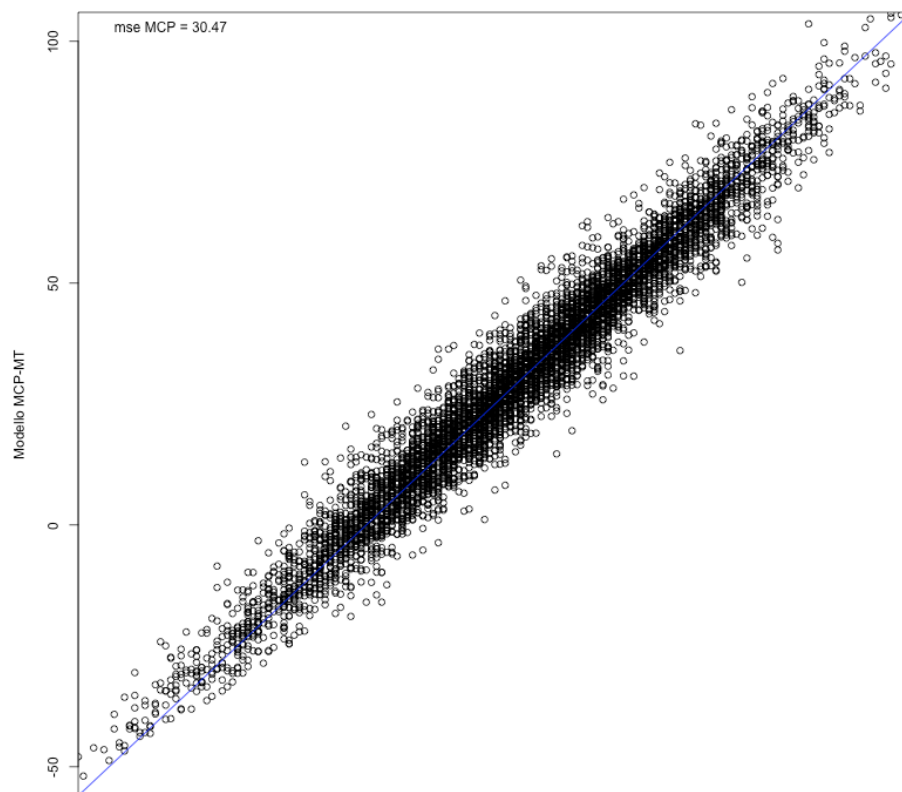
Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Risultati

Il caso di VENEZIA

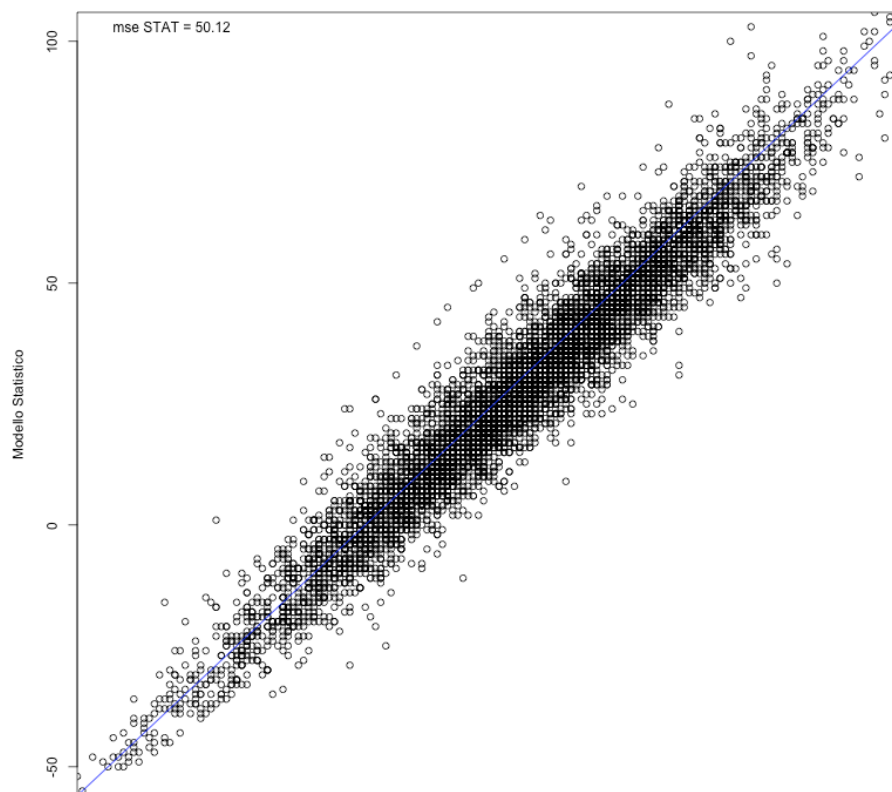
- Stima della bontà della previsione dopo 22 h

MCP-MT vs Osservazioni



Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Modello Statistico vs Osservazioni - PUNTA DELLA SALUTE



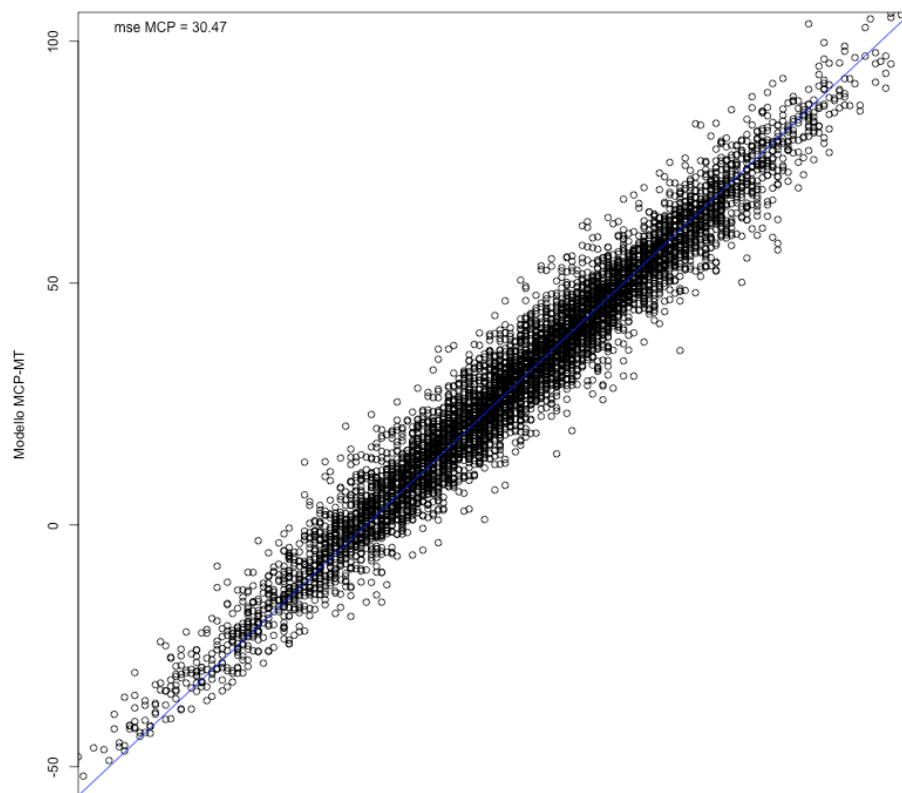
Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Risultati

Il caso di VENEZIA

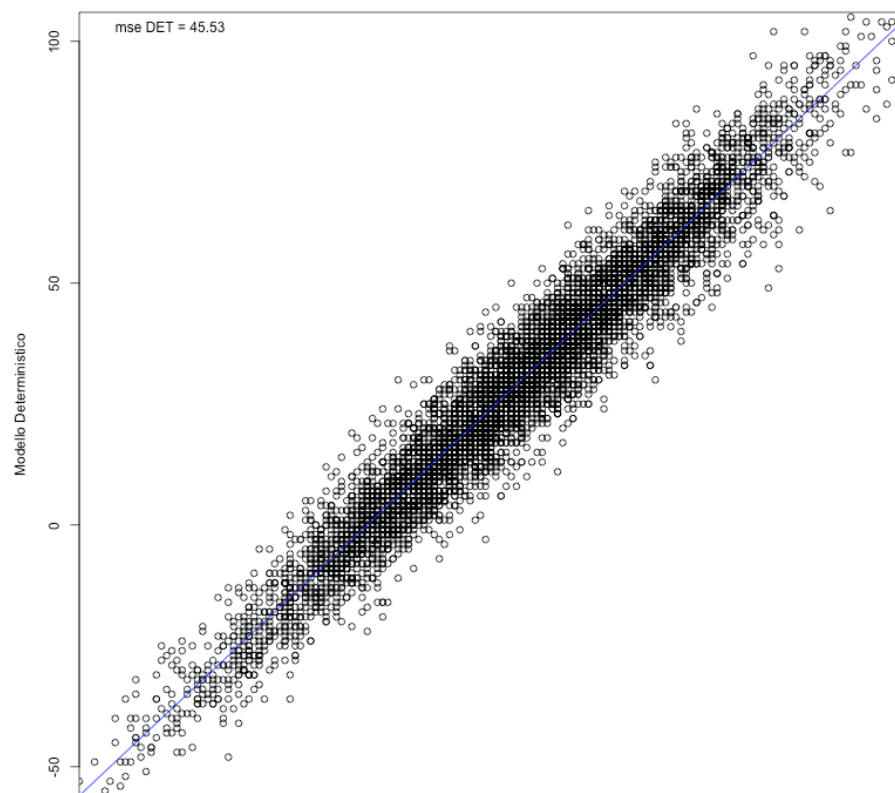
- Stima della bontà della previsione dopo 22 h

MCP-MT vs Osservazioni



Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Modello Deterministico vs Osservazioni - PUNTA DELLA SALUTE



Osservazioni 2015-09-14 - 2016-12-29

Risultati

Il caso di VENEZIA

- Tavole di contingenza e coefficienti di valutazione della bontà del modello MT

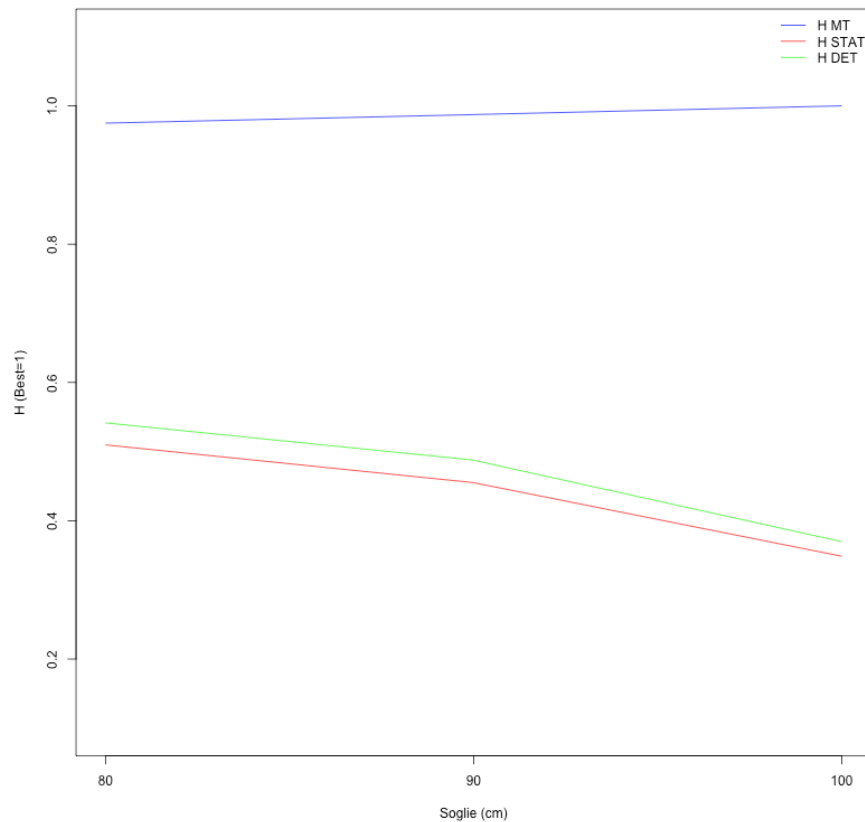
Time 1-23 h Soglia 80/90/100 cm Valori medi		Osservati		
		SI	NO	
Previsti	SI	a	b	a+b
	NO	c	d	c+d
		a+c	b+d	n=a+b+c+d

Risultati

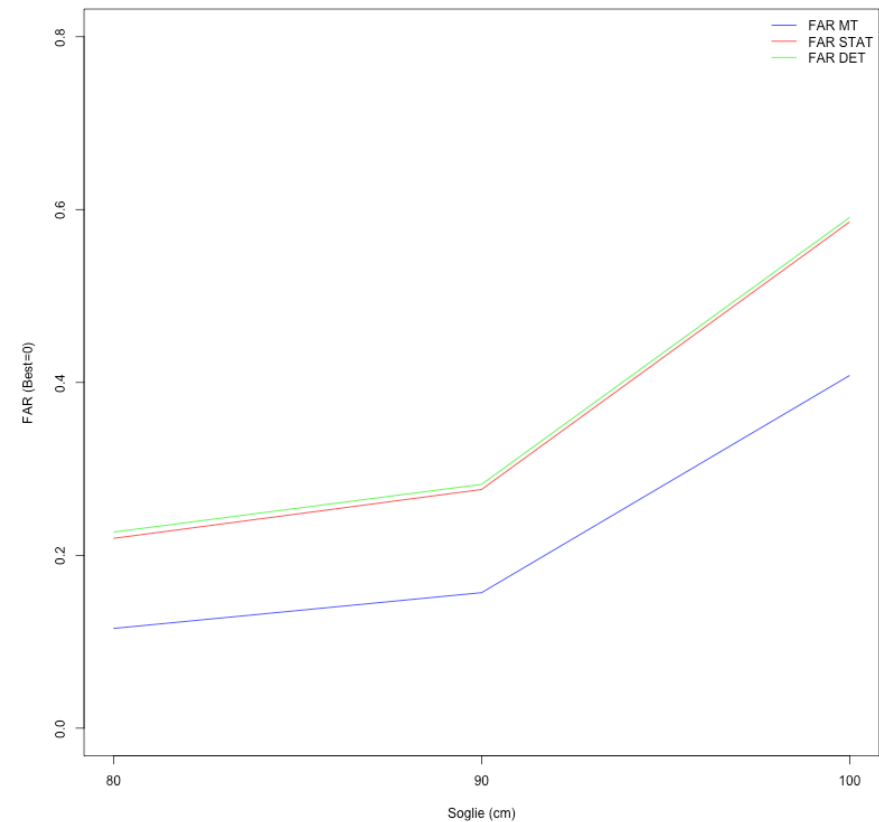
Il caso di VENEZIA

- Confronto tra modelli
- Hit Rate (H) o $POD = a/(a+c)$
- False Alarm Ratio (FAR) = $b/(a+b)$

CONFRONTO TRA MODELLI Hit Rate (H)



CONFRONTO TRA MODELLI False Alarm Ratio (FAR)



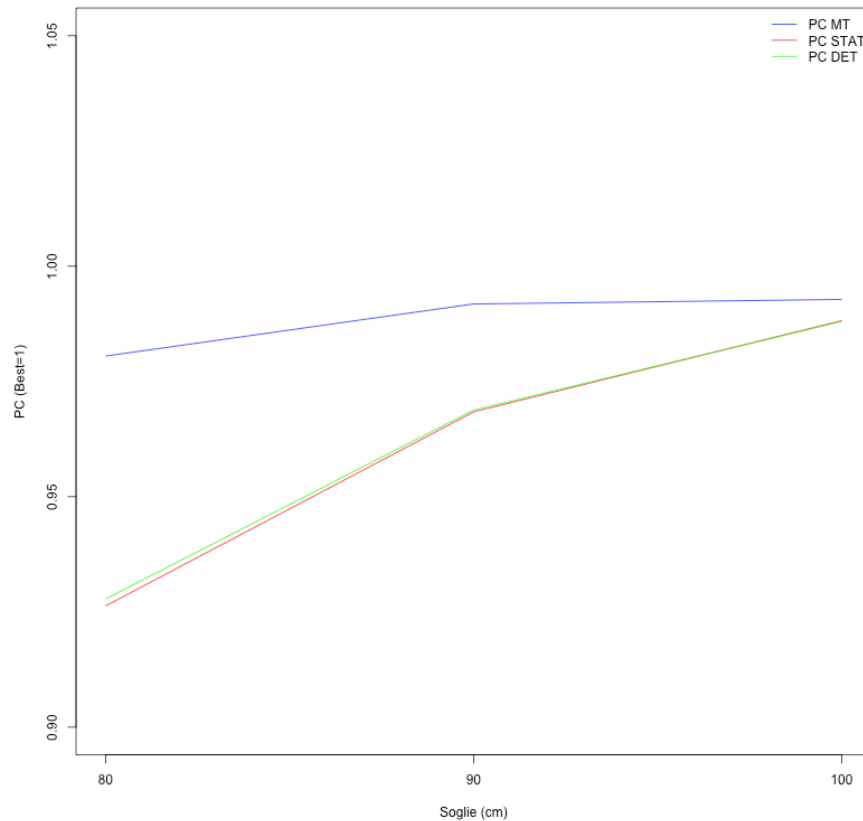
Risultati

Il caso di VENEZIA

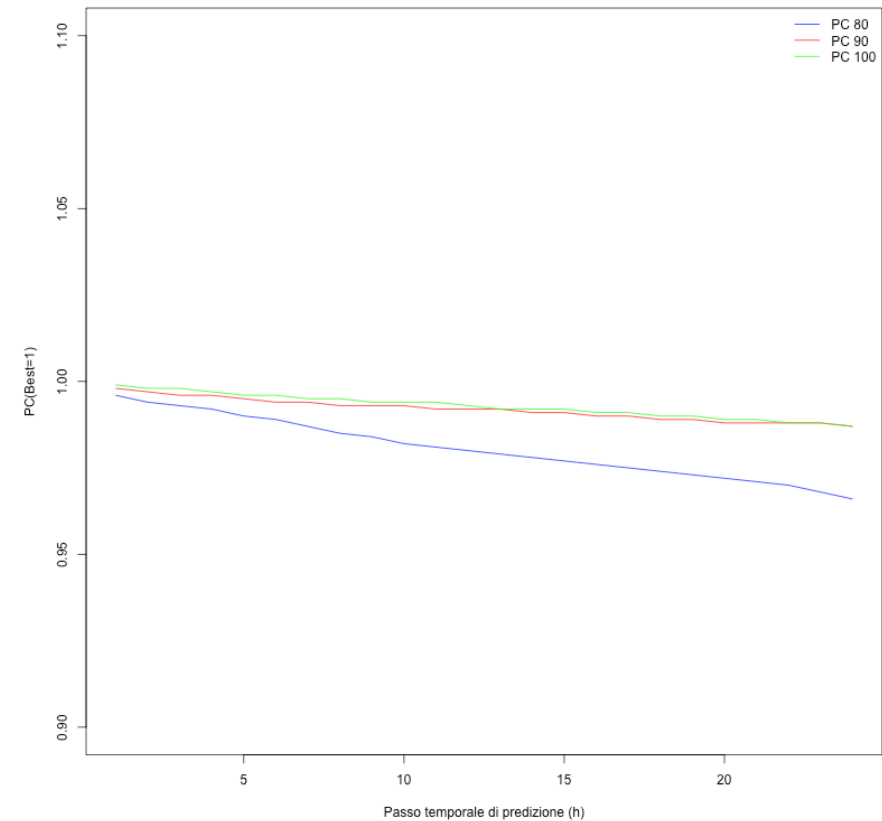
- Confronto tra modelli
- Percent Correct= $(a+d)/(a+b+c+d)$

- Modello MT
- Percent Correct= $(a+d)/(a+b+c+d)$

CONFRONTO TRA MODELLI Percent Correct (PC)



Percent Correct (PC)



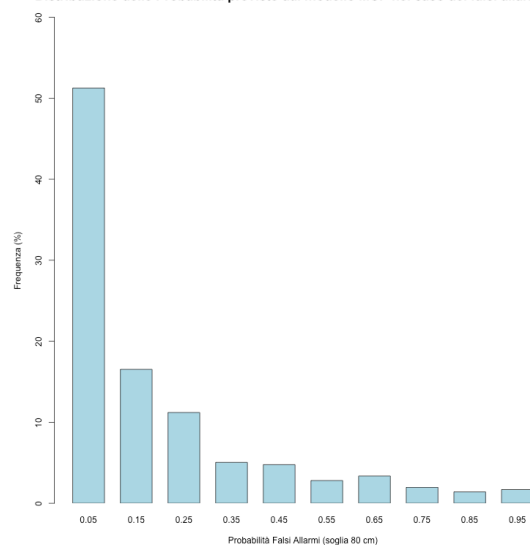
Risultati

Il caso di VENEZIA

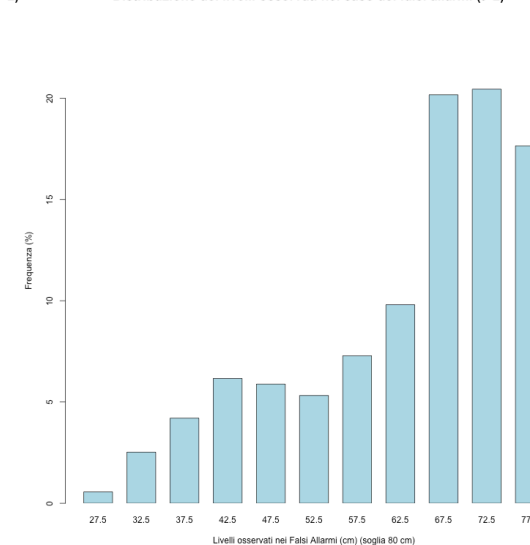
2015 10 29 02 00	45.000	37.000	38.000	41.112	32.904	49.230	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 03 00	33.000	27.000	26.000	29.336	21.562	37.373	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 04 00	26.000	24.000	20.000	24.247	16.321	32.031	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 05 00	31.000	29.000	24.000	27.711	19.960	35.643	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 06 00	47.000	42.000	40.000	41.375	33.157	49.476	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 07 00	61.000	59.000	59.000	59.491	51.888	66.915	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 08 00	78.000	76.000	78.000	74.657	66.779	82.108	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12	0,00	0,00
2015 10 29 09 00	93.000	77.000	102.000	89.221	80.945	97.791	1	1	0	0	0	0	0	0	0,97	0,46	0,02
2015 10 29 10 00	101.000	96.000	99.000	97.662	89.472	105.390	1	1	1	1	0	1	1	0	1,00	0,94	0,36
2015 10 29 11 00	100.000	93.000	93.000	97.974	89.954	105.692	1	1	1	1	0	1	1	0	1,00	0,97	0,47
2015 10 29 12 00	87.000	77.000	77.000	82.054	75.000	80.994	1	1	1	1	1	1	1	0	1,00	0,90	0,10
2015 10 29 13 00	67.000	55.000	58.000	61.318	53.649	60.600	1	0	0	0	0	0	0	0	0,40	0,00	0,00
2015 10 29 14 00	44.000	31.000	38.000	37.608	29.521	45.711	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 15 00	22.000	8.000	19.000	16.590	8.388	24.478	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2015 10 29 16 00	5.000	-9.000	4.000	-0,939	-8,926	7,203	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00

1. Il modello deterministico presenta un maggior numero di **falsi allarmi**
2. Il modello statistico presenta invece un maggior numero di **mancati allarmi**
3. Il modello MCP non presenta mai mancati allarmi ma solamente falsi allarmi; questo dipende dal fatto che se l'intervallo di confidenza supera la soglia, comunque il modello registrerà una probabilità diversa da 0 (tipicamente molto piccola)

Distribuzione delle Probabilità previste dal modello MCP nel caso dei falsi allarmi (t=2)



Distribuzione dei livelli osservati nel caso dei falsi allarmi (t=2)



Se ne deduce che il modello MCP, nel caso dei falsi allarmi, prevede spesso eventi con probabilità bassissime di accadimento (che già con una soglia di probabilità del 25% riusciamo a filtrare) e corrispondenti nella maggior parte dei casi a valori osservati molto prossimi alle soglie.

Previsione multitemporale dell'acqua alta a Venezia

E.Todini¹, S. Morucci², M.Ferla², G.Coccia³

¹ Società Idrologica Italiana, ezio.todini@gmail.com

² Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale (ISPRA),
sara.morucci@isprambiente.it, maurizio.ferla@isprambiente.it

³ Risk, Engineering+Design (RED), gabriele.coccia@redpavia.it

Grazie per l'attenzione