

La nuova versione del modello idrodinamico VL-FEM del Sistema Idro-Meteo-Mare (SIMM) per le previsioni dell'acqua alta nella laguna di Venezia

Luciana Giannini e Emanuela Piervitali



Ottobre 2009



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine

**La nuova versione del modello idrodinamico VL-FEM
del Sistema Idro-Meteo-Mare (SIMM)
per le previsioni dell'acqua alta nella laguna di
Venezia**

Luciana Giannini e Emanuela Piervitali

Questo rapporto è stato realizzato nell'ambito dell'attività di un contratto di ricerca stipulato tra ISPRA (ex APAT) Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine e CNR-ISMAR di Venezia.

INFORMAZIONI LEGALI

L'istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo Rapporto.

La Legge 133/2008 di conversione, con modificazioni, del Decreto Legge 25 giugno 2008, n. 112, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 195 del 21 agosto 2008, ha istituito l'ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. L'ISPRA svolge le funzioni che erano proprie dell'Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (ex APAT), dell'Istituto Nazionale per la Fauna Selvatica (ex INFS) e dell'Istituto Centrale per la Ricerca scientifica e tecnologica Applicata al Mare (ex ICRAM). La presente pubblicazione fa riferimento ad attività svolte in un periodo antecedente l'accorpamento delle tre Istituzioni e quindi riporta ancora, al suo interno, richiami e denominazioni relativi ai tre Enti soppressi.

ISPRA – Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48
00144 Roma
www.isprambiente.it

© ISPRA 2009

ISBN: 978-88-448-0411-4

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Foto di copertina: <http://www.corriere.it/gallerie/20021022.shtml>
Piazza San Marco, Venezia (mattina del 22/10/2002)

Ottobre 2009

Indice

1. Introduzione	5
2. Breve descrizione del fenomeno dell'acqua alta a Venezia	5
3. Il modello idrodinamico VL-FEM nell'ambito del Sistema Idro-Meteo-Mare (SIMM).....	8
4. La nuova versione del modello idrodinamico VL-FEM.....	11
5. Calibrazione e test di affidabilità delle previsioni	14
5.1 Test di funzionamento del nuovo codice e confronto con la vecchia versione del modello	14
5.2 Test di sensibilità ai dati in input	16
6. Post processing sui dati di input: il filtro di Kalman	18
6.1 Cenni sulla teoria generale	18
6.2 Applicazione come post-processing	19
6.3 Analisi dei risultati	20
7. Descrizione dell'ambiente operativo di test	25
8. Conclusioni	26
Riferimenti bibliografici	27

1. Introduzione

L'importanza di prevedere il "fenomeno dell'acqua alta" a Venezia è da sempre risultata indiscutibilmente prioritaria ai fini della salvaguardia ambientale, sociale ed economica della Laguna. Difficoltoso, invece, è lo sviluppo dei metodi utilizzati per rendere tali previsioni più attendibili possibile. In tal senso, lo sforzo maggiore è proprio quello di creare dei modelli che forniscano una previsione affidabile, sia dal punto di vista della qualità del risultato, sia per quanto concerne la possibilità di rientrare nella tempistica per l'intervento di riduzione dei rischi ambientali e sociali.

Il Sistema Idro-Meteo-Mare (SIMM), è stato sviluppato alla fine degli anni '90 presso l'allora Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali (DSTN), in collaborazione con l'ENEA, per la previsione numerica dei fenomeni idrologici, meteorologici e marini che interessano il territorio nazionale e, in particolare, per le previsioni dell'acqua alta nella Laguna di Venezia (Accadia et al., 2003; Speranza et al. 2004). Il sistema è costituito da quattro modelli in cascata: il BOLAM (BOlogna Limited Area Model) per le previsioni meteorologiche (Nicastro, Valentinotti, 1998; Buzzi et al., 1994), il WAM (WAve Model) per la previsione delle condizioni del mare Mediterraneo (The WAMDI group, 1998), il POM (Princeton Ocean Model) per l'elevazione dell'Adriatico (Blumberg, Mellor, 1987) e il VL-FEM (Venice Lagoon - Finite Element Model) che fornisce informazioni sull'evoluzione dei fenomeni mareali sulla laguna di Venezia con particolare riferimento agli eventi di acqua alta (Umgiesser et al., 1988).

Alcuni studi precedenti avevano riguardato la valutazione dell'affidabilità del SIMM ai fini delle previsioni dell'acqua alta a Venezia (Giannini et al., 2006; Piervitali e Giannini, 2007). In quel contesto, si erano effettuati dei test di affidabilità delle previsioni ottenute dal modello VL-FEM sulla laguna, mediante il confronto con i dati osservati. Inoltre, si era eseguito un analogo confronto tra i dati forniti dal POM e i livelli osservati, poiché il POM fornisce le *boundary conditions* al VL-FEM. I risultati ottenuti mostravano una sottostima dei livelli di marea previsti dai modelli mareografici e uno sfasamento rispetto alle osservazioni.

Sulla base di tali risultati, si è pensato, da un lato, di acquisire una versione più aggiornata del modello VL-FEM e, dall'altro di studiare la possibilità di produrre degli algoritmi correttivi ai valori dei livelli in *input* (livelli di marea previsti dal POM) al modello stesso per migliorare l'affidabilità del sistema per le previsioni dell'acqua alta a Venezia.

Il risultato del lavoro svolto è frutto di una collaborazione avviata nel giugno del 2008 e conclusasi dopo 12 mesi, con il gruppo di ricerca del Dott. G. Umgiesser dell'istituto CNR-ISMAR di Venezia. L'attività di ricerca è stata articolata in una serie di obiettivi che hanno prodotto come risultato finale l'aggiornamento del codice del VL-FEM, della batimetria, della griglia computazionale, della procedura di restart e del calcolo della marea astronomica. Inoltre, l'innovazione più importante è stata l'introduzione, nel modulo di pre-processing del VL-FEM, di un algoritmo correttivo di tipo semi-empirico.

2. Breve descrizione del fenomeno dell'acqua alta a Venezia

Le lagune sono unità morfologiche costiere che hanno origine nelle coste basse in aree deltaiche per l'interazione tra gli apporti solidi dei fiumi e la distribuzione dei materiali svolta dalle correnti e dalle maree. Si tratta di un'area salmastra nella quale sono presenti terre soggette a periodica sommersione per effetto della marea e specchi d'acqua poco

profondi, solcati da canali naturali o artificiali, punteggiati da isole sulle quali è consolidato l'insediamento umano.

La laguna di Venezia si estende dalla foce del fiume Piave a Nord-Est a quella del Brenta a Sud-Ovest, con una lunghezza di circa 50 Km ed una larghezza media di 11 km.

La superficie della laguna è di circa 550 km², di cui l'8% sono occupati da terra (Venezia stessa e le molte isole minori). Circa l'11% è permanentemente composto d'acqua, o canali dragati, mentre circa l'80% sono piane fangose, paludi d'acqua salata o artificiali casse di colmata.

La laguna di Venezia ha mediamente una profondità di circa 1 m ed è collegata al Mar Adriatico da tre bocche di porto. Nell'ordine (v. fig.1), da nord: Lido, Malamocco, Chioggia. Questi tre canali sono rispettivamente larghi 900 m, 450 m e 400 m ed hanno una profondità media di 12 m, 18 m e 8 m. Nella figura viene riportato anche il sito di Punta della Salute, che si trova nel centro storico di Venezia.

Essendo situata all'estremità di un mare chiuso, la laguna di Venezia è soggetta a grandi escursioni del livello delle acque, le più vistose delle quali (soprattutto nei periodi autunnali e primaverili) provocano fenomeni come l'acqua alta, che allaga periodicamente le isole più basse, o l'acqua bassa, che rende talvolta impraticabili i canali meno profondi.



Fig.1 – Mappa rappresentativa della laguna di Venezia. Sono riportate le tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia) e il sito di Punta della Salute

La propagazione dell'onda di marea nella laguna è principalmente dovuta alla presenza dei canali maggiori che poi si estendono nelle zone di basso fondale.

Il regime di correnti ed i livelli marini della laguna sono influenzati da due diverse forzanti: la forzante mareale di tipo astronomico e la forzante meteorologica costituita dai venti e dalla pressione atmosferica.

La marea astronomica è un fenomeno legato all'interazione gravitazionale che esiste nei sistemi Terra-Sole e Terra-Luna. A Venezia, la marea astronomica descrive una curva di tipo prevalentemente semidiurno, con due massimi e due minimi nelle 24 ore.

Durante le fasi di luna nuova e di luna piena gli effetti del Sole e della Luna si sommano, determinando le massime oscillazioni di marea (sizigie). Nei periodi di primo e ultimo quarto, invece, la marea è meno ampia e meno regolare (quadratura) e possono esservi giorni con un solo minimo e un solo massimo.

Secondo il metodo dell'analisi armonica, la marea astronomica in un determinato luogo può essere calcolata come sovrapposizione di oscillazioni sinusoidali, ciascuna caratterizzata da una propria ampiezza e fase.

A Venezia sono sufficienti otto componenti armoniche per descrivere la marea astronomica con precisione dell'ordine di 1 cm.

Nell'Adriatico l'onda di marea si propaga come un raggio rotante in senso antiorario, attorno ad un punto fisso definito come *punto anfidromico* situato a circa metà della congiungente Ancona-Zara. La rotazione anfidromica è l'effetto risultante dalla composizione dell'oscillazione longitudinale, dovuta alla marea, con l'oscillazione trasversale che si sviluppa in mare a causa della rotazione terrestre. In siti diametralmente opposti, rispetto al punto anfidromico, la marea ha fasi opposte. Il punto anfidromico è il punto in cui la marea ha ampiezza minima (nulla), mentre allontanandosi radialmente da tale punto l'ampiezza della marea aumenta. (Polli, 1961)

All'interno della laguna la circolazione segue, comunque, una traiettoria complicata soprattutto per la presenza di molte isole e aree semi-sommerse.

Il regime dei venti in laguna è sostanzialmente costituito dal vento di Bora e di Scirocco.

La Bora è un vento catabatico ed è il vento di maggiore intensità che caratterizza questa area ed ha una direzione di provenienza da Nord-Est verso Sud-Ovest. In tal modo, la Bora induce all'interno della laguna un gradiente di livello marino diretto parallelamente lungo l'asse longitudinale della laguna da Nord verso Sud. Di conseguenza, si creano differenze di livello tra l'estremo Nord e l'estremo Sud della laguna anche di decine di centimetri (Ferla et al., 1996).

Lo Scirocco è un vento proveniente dai quadranti meridionali ed è associato ad un'area di bassa pressione a ridosso del Nord-Ovest italiano. In una situazione di concomitanza di Scirocco e alta marea astronomica si può innescare una forte elevazione del livello marino (la cosiddetta acqua alta) con effetti disastrosi sulla laguna ed, in particolare, sulla città di Venezia (Berelli et al., 2006).

Occorre non tralasciare di menzionare, tra le diverse cause meteoriche agenti sul livello marino, la più importante per gli effetti che può produrre, quella che provoca le sesse. Il fenomeno si genera a seguito di condizioni meteorologiche che provocano un rapido e temporaneo dislivello in una zona del mare. Il ritorno allo stato di equilibrio avviene tramite delle oscillazioni che gradualmente si smorzano. Queste oscillazioni sono appunto le sesse. Nell'Adriatico le oscillazioni principali avvengono longitudinalmente, cioè il mare oscilla attorno ad una o più linee nodali, trasversali all'asse del bacino.

Le sesse interagiscono con la marea agendo sia sulla fase sia, soprattutto, sulla sua ampiezza, dando origine al fenomeno dell'acqua alta (Canestrelli et al., 2001).

3. Il modello idrodinamico VL-FEM nell'ambito del Sistema Idro-Meteo-Mare (SIMM)

Il SIMM, gestito dal Dipartimento per la Tutela delle Acque Interne e Marine dell'ISPRA (ex APAT), dal 2000 produce 48 ore di previsioni meteorologiche e marine con risoluzione di circa 10 km su tutto il bacino del Mediterraneo oltre alla previsione dell'elevazione del bacino Ionio-Adriatico, con una risoluzione crescente, arrivando sino circa a 5 Km alle bocche di porto della laguna di Venezia e con un dettaglio ancora maggiore al suo interno al fine, proprio, di prevedere l'acqua alta a Venezia.

In Figura 2 è schematizzata l'architettura del SIMM in configurazione di servizio ed il flusso principale dei dati. Il modulo principale del sistema è costituito da una catena di modelli interagenti tra loro che attengono ai differenti aspetti della problematica studiata.

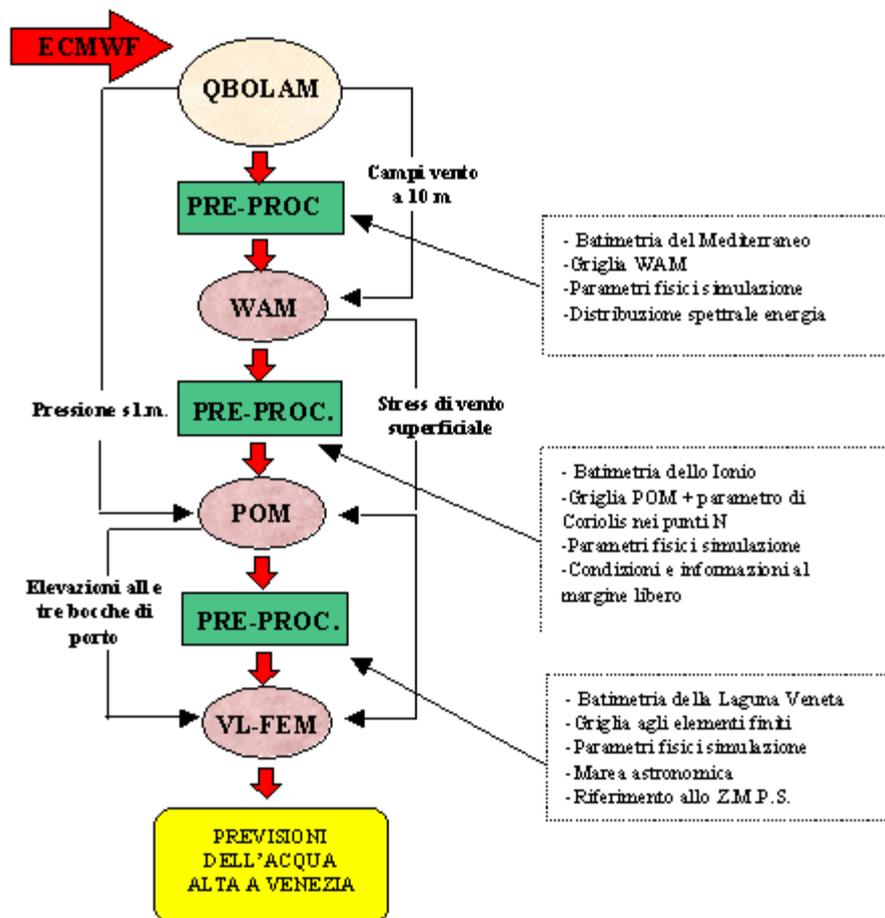


Fig.2 – Architettura del SIMM in configurazione di servizio e flusso principale dei dati

Da una parte il SIMM è finalizzato alla previsione delle condizioni meteorologiche al suolo con particolare attenzione alle precipitazioni ed al vento (QBOLAM), dall'altra alle condizioni del mare su tutto il Mediterraneo (WAM), per il Mare Adriatico (POM) ed infine all'evoluzione dei fenomeni mareali all'interno della Laguna di Venezia, con particolare riferimento al fenomeno dell'acqua alta (VL-FEM).

Il VL-FEM è, quindi, l'ultimo modello della catena e richiede in input, ad ogni time step, lo stress di vento sulla superficie libera della laguna e l'altezza dell'acqua alle bocche di porto, dati ottenuti come output dei moduli di post-processing ai modelli WAM e POM rispettivamente (fig.2). Per ottenere una buona previsione del VL-FEM è particolarmente importante la corretta determinazione dei livelli di marea in input. A tal fine il modello POM viene integrato su un grigliato con una risoluzione spaziale variabile che si infittisce avvicinandosi alla laguna di Venezia, fino ad arrivare ad una risoluzione di 5 Km in prossimità delle bocche della laguna (fig.3).

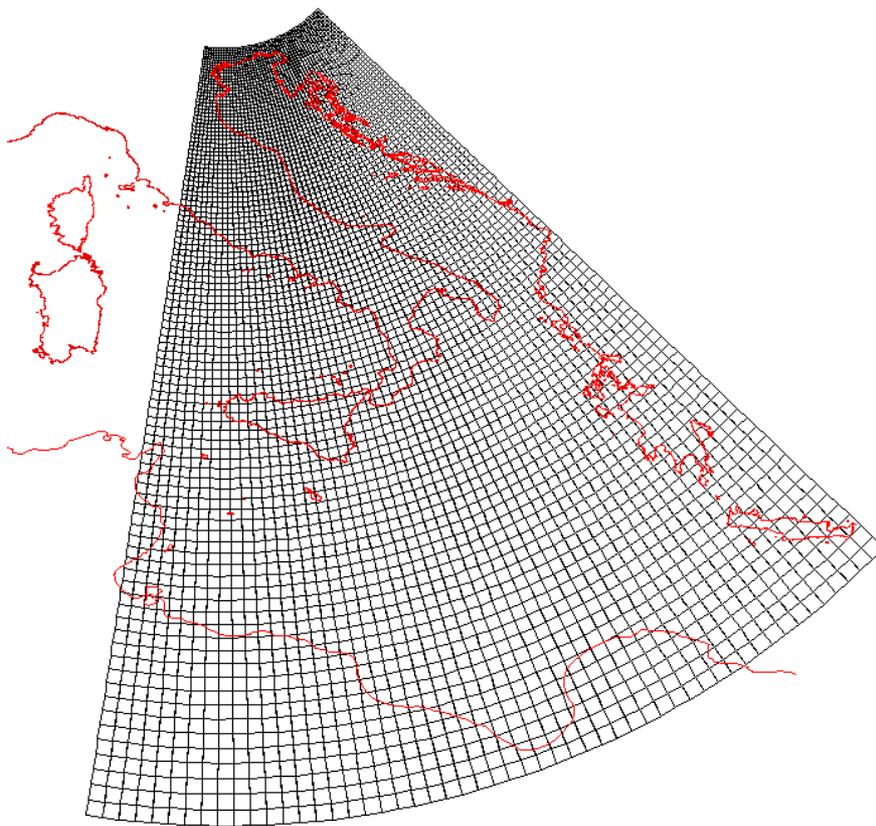


Fig. 3 – Griglia del modello POM del SIMM

In output il modello VL-FEM fornisce il livello e la velocità dell'acqua all'interno della laguna, con una risoluzione temporale di 30 minuti.

Dal punto di vista numerico il VL-FEM risolve le equazioni di conservazione della massa e del momento orizzontale (approssimazione shallow-water):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - fV + gH \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta + \frac{p}{\rho_w g} \right) - A_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{xb} - \tau_{xw}) &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + fU + gH \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta + \frac{p}{\rho_w g} \right) - A_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{yb} - \tau_{yw}) &= 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz$$

$$V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

dove:

ζ = livello dell'acqua

U, V = velocità integrate verticalmente o trasporto barotropico

t = tempo

g = accelerazione di gravità

p = pressione atmosferica al livello medio del mare

ρ_w = densità dell'acqua

$H = h + \zeta$ = profondità totale dell'acqua

h = profondità dell'acqua in assenza di perturbazione

f = parametro di Coriolis

τ_w = stress del vento

τ_b = stress sul fondo

A_H = coefficiente di diffusione orizzontale

Il modello usa un algoritmo semi-implicito per l'integrazione temporale e il metodo degli elementi finiti per l'integrazione spaziale. I termini trattati in maniera implicita o semi-implicita sono il gradiente di livello dell'acqua, il termine di Coriolis e lo stress sul fondo nelle equazioni del momento e la divergenza nell'equazione di continuità (Bajo et al., 2007).

Dal punto di vista spaziale il vantaggio di usare un modello agli elementi finiti è la possibilità di variare la dimensione e la forma degli elementi in maniera tale da poter meglio adattarsi alla complessa morfologia costiera della laguna di Venezia. Per un approfondimento del modello numerico si rimanda alla bibliografia specifica (Umgiesser et al., 1998; Umgiesser et al., 2004).

4. La nuova versione del modello idrodinamico VL-FEM

In primo luogo è stata acquisita una versione più recente (ver. 5.0) del modello idrodinamico, ad elementi finiti VL-FEM. Le peculiarità migliorative di tale versione rispetto alla precedente sono le seguenti:

- Nuova griglia computazionale della laguna di Venezia
- Nuova batimetria della laguna di Venezia
- Nuova procedura di restart
- Aggiornamento della marea astronomica

Nuova griglia computazionale della laguna di Venezia

Il modello idrodinamico VL-FEM è basato sul metodo di discretizzazione spaziale agli elementi finiti. Tale metodo permette di rappresentare il dominio di calcolo con una griglia computazionale formata da elementi triangolari, il cui vantaggio è quello di riuscire a seguire la geometria articolata che caratterizza la Laguna di Venezia.

La versione precedente della griglia della laguna (*venlag62*) risale agli anni '70 ed era costituita da 4359 nodi e 7892 elementi (fig.4a). La nuova versione della griglia di calcolo (*venlag00*) presenta una risoluzione spaziale superiore essendo formata da 6334 nodi e 11210 elementi (fig.4b).

Dal confronto tra le figure 4a e 4b si osserva come la risoluzione di alcune zone e, soprattutto dei canali in prossimità delle tre bocche di porto, sia stata aumentata in modo da avere una rappresentazione più corretta della dinamica del sistema laguna.

Nuova batimetria della laguna di Venezia

La previsione dei livelli è strettamente legata alla morfologia del fondale che, nel caso di ambienti di transizione come le lagune, è soggetta a variazioni significative su scala annuale. Disponendo, pertanto, di una batimetria aggiornata della laguna è stato possibile eliminare gli errori sulla previsione dei livelli dovuti alle variazioni batimetriche. Infatti, la batimetria, risalente agli anni '70, è stata aggiornata con quella del 2000 ed è stata interpolata sulla nuova griglia. Le fig. 5a e 5b mostrano le due batimetrie e come in alcune zone il fondale si sia appiattito ed alcuni canali secondari siano scomparsi.

Nuova procedura di restart

Il calcolo delle grandezze dinamiche di un sistema fisico da parte di un modello risulta tanto più preciso quanto più si conosce lo stato iniziale. Di conseguenza, se l'istante iniziale non è noto, occorre inizializzare il modello con dei valori nulli e far passare alcuni giorni di simulazione affinché il sistema raggiunga l'equilibrio. Il tempo necessario al raggiungimento dell'equilibrio del sistema è il cosiddetto tempo di *spin-up*.

Nella precedente versione del VL-FEM il tempo di *spin-up* era di circa 48 ore. Nella nuova versione è stata implementata una procedura cosiddetta di *restart*. Tale procedura consente di salvare lo stato fisico del sistema in un determinato istante e di utilizzarlo successivamente come stato iniziale in una seconda simulazione (Bajo et al., 2007). Nel caso specifico il file di restart viene salvato ad ogni run (giornaliero) di simulazione e utilizzato come stato iniziale per la simulazione del giorno successivo. In questo modo si riducono i tempi di calcolo dovuti al raggiungimento dello stato di equilibrio da parte del bacino lagunare.

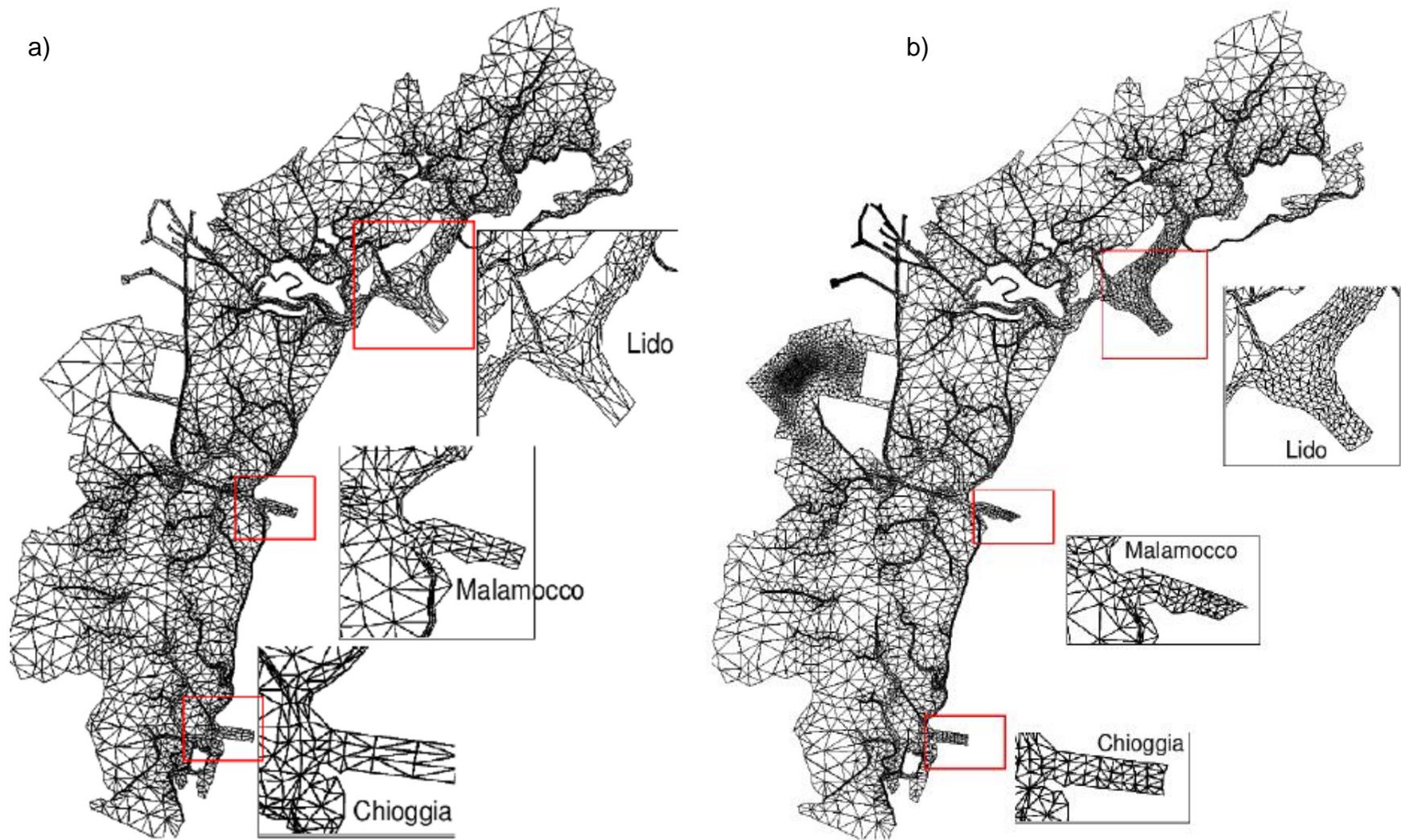


Fig. 4 – Griglia venlag62 (a) con batimetria del 1970 (4359 nodi e 7842 elementi) e griglia venlag00 (b) con batimetria del 2000 (6334 nodi e 11210 elementi)

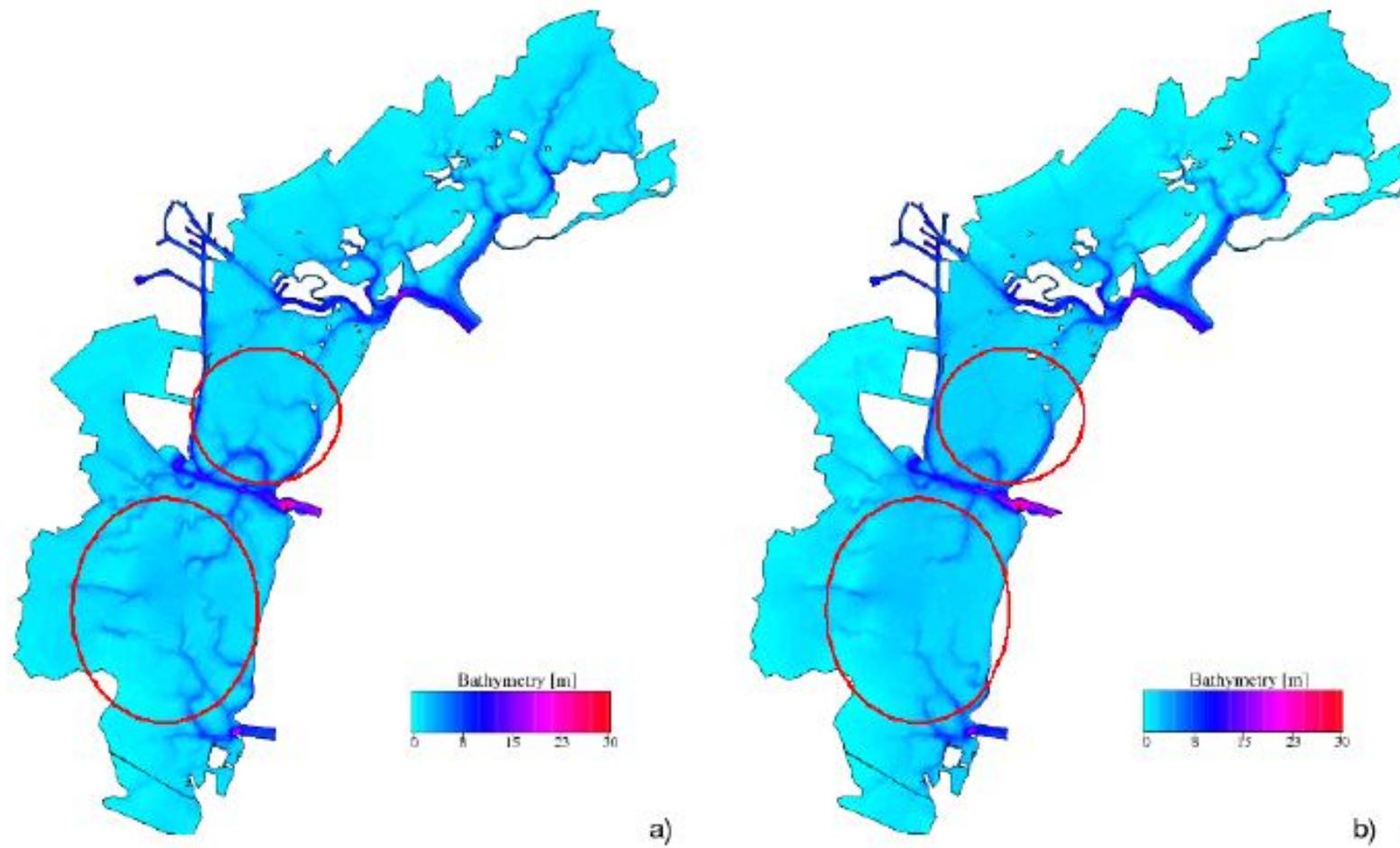


Fig. 5 – Batimetria anni '70 (a) e nuova batimetria del 2000 (b)

Aggiornamento della marea astronomica

I livelli mareali, dati in input al VL-FEM, sono costituiti da due componenti quella meteorologica e quella astronomica. La prima è causata, come già detto, dal vento e dalle differenze di pressione che si creano durante il transito delle perturbazioni atmosferiche e viene comunemente denominata anche come *sovrizzo*.

La componente astronomica, causata dalle forze gravitazionali che intervengono nei sistemi terra-luna e terra-sole, può essere calcolata a partire dalla determinazione delle costanti armoniche mediante l'utilizzo di algoritmi semi-empirici.

La procedura di post-processing del modello idrodinamico POM calcola la marea astronomica a partire dai livelli previsti dal POM e dalle costanti armoniche che erano state calcolate al momento della messa in servizio del SIMM e non più aggiornate.

Di conseguenza, si è proceduto ad un aggiornamento dei valori della costanti armoniche che sono state ricalcolate sulla serie temporale che si estende dal 1999 al 2008.

5. Calibrazione e test di affidabilità delle previsioni

5.1 Test di funzionamento del nuovo codice e confronto con la vecchia versione del modello

Il test di funzionamento del nuovo codice si è effettuato sul periodo gennaio-maggio 2008. Per ogni giorno, le simulazioni con il VL-FEM si sono eseguite ogni 30 minuti, inserendo in input i livelli osservati alle bocche di porto della laguna e i dati di vento rilevati nella Piattaforma CNR in mare aperto, situata a circa 15 Km dalla linea di costa (45°18'N, 12°30'E). Si sono poi confrontate le previsioni del modello con i livelli osservati a Punta della Salute. I risultati mettono in evidenza un buon accordo fra le due serie di dati, come mostrato nella fig. 6, in cui viene riportato lo *scatter-plot* fra i valori calcolati dal VL-FEM e le osservazioni. In particolare, questo viene messo in evidenza dal valore del coefficiente angolare k della retta di regressione fra le due serie ($k = 1.01$) e da quello del coefficiente di correlazione ($R^2=0.94$). Il buon funzionamento del nuovo codice viene confermato dall'analisi della distribuzione degli scarti fra i livelli previsti e le osservazioni: la relativa statistica indica che il valore medio di tale distribuzione è prossimo allo zero (media = -0.01 cm) e che la deviazione standard ha un valore inferiore a 7.5 cm.

Inoltre, al fine di valutare l'eventuale miglioramento della previsione ottenuta rispetto a quella fornita dalla vecchia versione del modello, si sono confrontate diverse simulazioni, eseguite con entrambi i codici, per lo stesso periodo temporale. Come forzanti del modello sono stati imposti i dati di livello e di vento realmente osservati, come nel caso precedente. In fig. 7 sono riportati i risultati delle simulazioni relative al mese di gennaio 2008, insieme ai dati osservati, a Punta della Salute. Nel grafico, con *venlag62* si è indicata la simulazione eseguita con la vecchia versione del VL-FEM, mentre con *venlag00* si è indicata la simulazione eseguita con il nuovo codice. Come si può osservare dalla figura, i livelli previsti presentano un buon accordo con i dati osservati in entrambi i casi. Tuttavia, la simulazione eseguita con il nuovo codice mostra una maggiore accuratezza, soprattutto nella previsione dei minimi della curva.

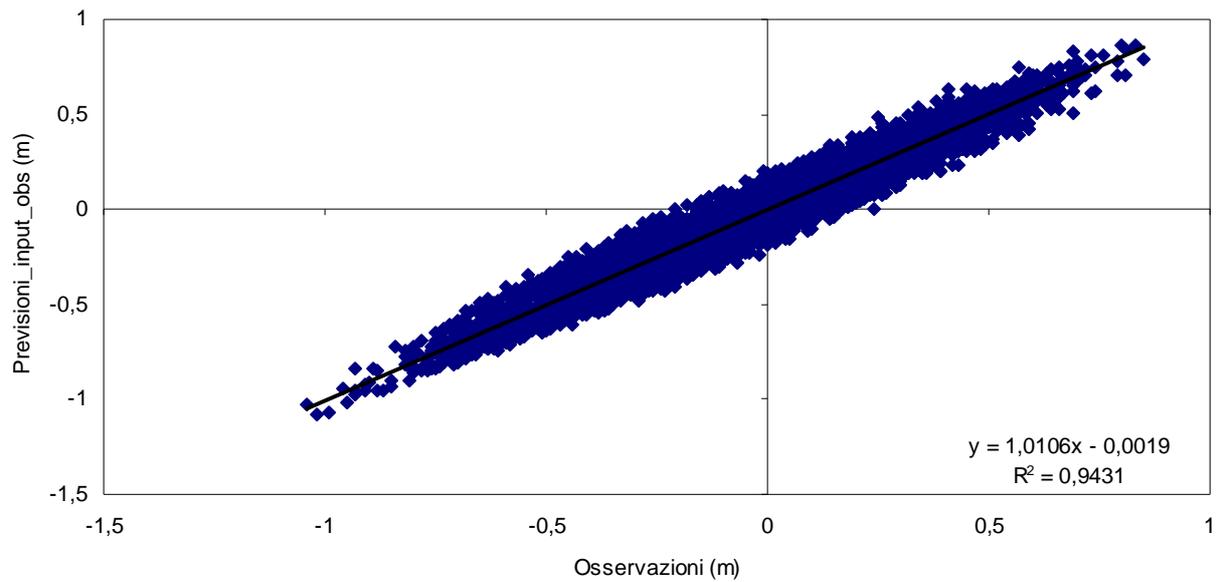


Fig.6 – Scatter-plot tra i livelli calcolati dal VL-FEM e i livelli osservati a Punta della Salute, per il periodo gennaio-maggio 2008

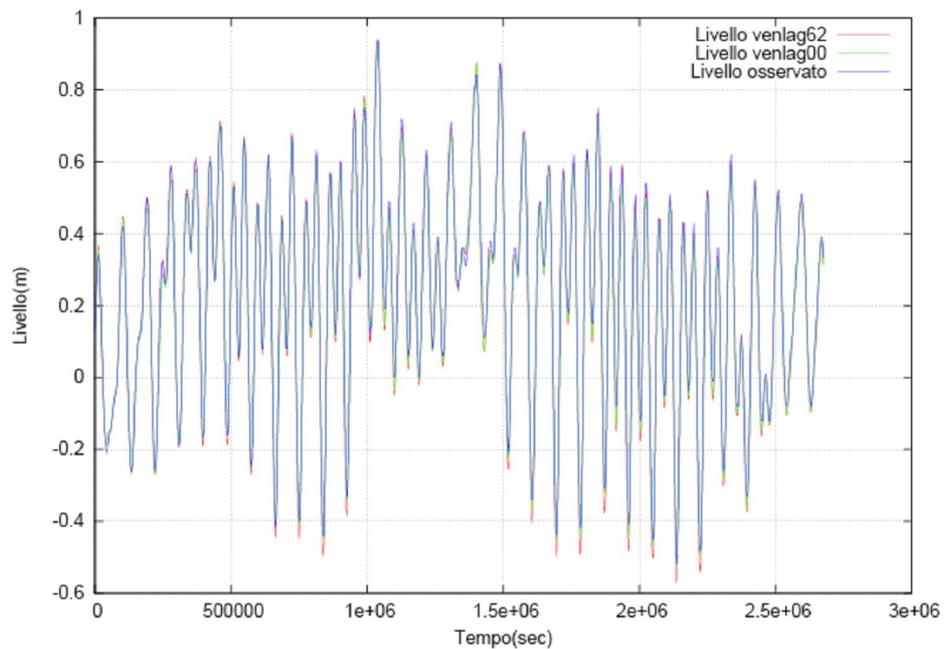


Fig.7 – Livelli previsti e livelli osservati a Punta Salute per il mese di gennaio 2008. Con *venlag62* viene indicata la simulazione eseguita con la vecchia versione del VL-FEM, con *venlag00* quella relativa al nuovo codice.

5.2 Test di sensibilità ai dati di input

Essendo l'obiettivo finale del lavoro quello di rendere operativa la nuova versione del VL-FEM all'interno del SIMM, sono state effettuate alcune elaborazioni per verificare la qualità delle previsioni rispetto alle forzanti. In particolare, si sono confrontati i risultati di due simulazioni relative allo stesso periodo di tempo, la prima effettuata imponendo come input al VL-FEM i livelli osservati alle tre bocche di porto della laguna, la seconda imponendo i valori calcolati dal POM, sempre alle tre bocche di porto, come previsto nella configurazione operativa.

In fig.8 sono riportati i livelli simulati a Punta della Salute nelle due situazioni, insieme ai valori osservati, per il periodo dal 15 al 30 ottobre 2008. Dal grafico si osserva che la curva ottenuta utilizzando come forzanti i dati osservati fornisce una previsione abbastanza accurata, con i valori massimi leggermente sovrastimati. I livelli previsti utilizzando in input i valori forniti dal POM, invece, si discostano maggiormente dai dati osservati, sia nei valori massimi, sia in quelli minimi. Le differenze più elevate si riscontrano nella parte finale della curva, che corrisponde al 28-30 ottobre, quando si sono registrati a Punta della Salute livelli di acqua alta superiori ai 90 cm.

Poiché il VL-FEM mostra una buona capacità di previsione dei livelli marini quando le forzanti sono i dati reali, come già esposto nel paragrafo precedente, si è reso necessario valutare la qualità dei dati previsti dal POM, utilizzati come forzanti.

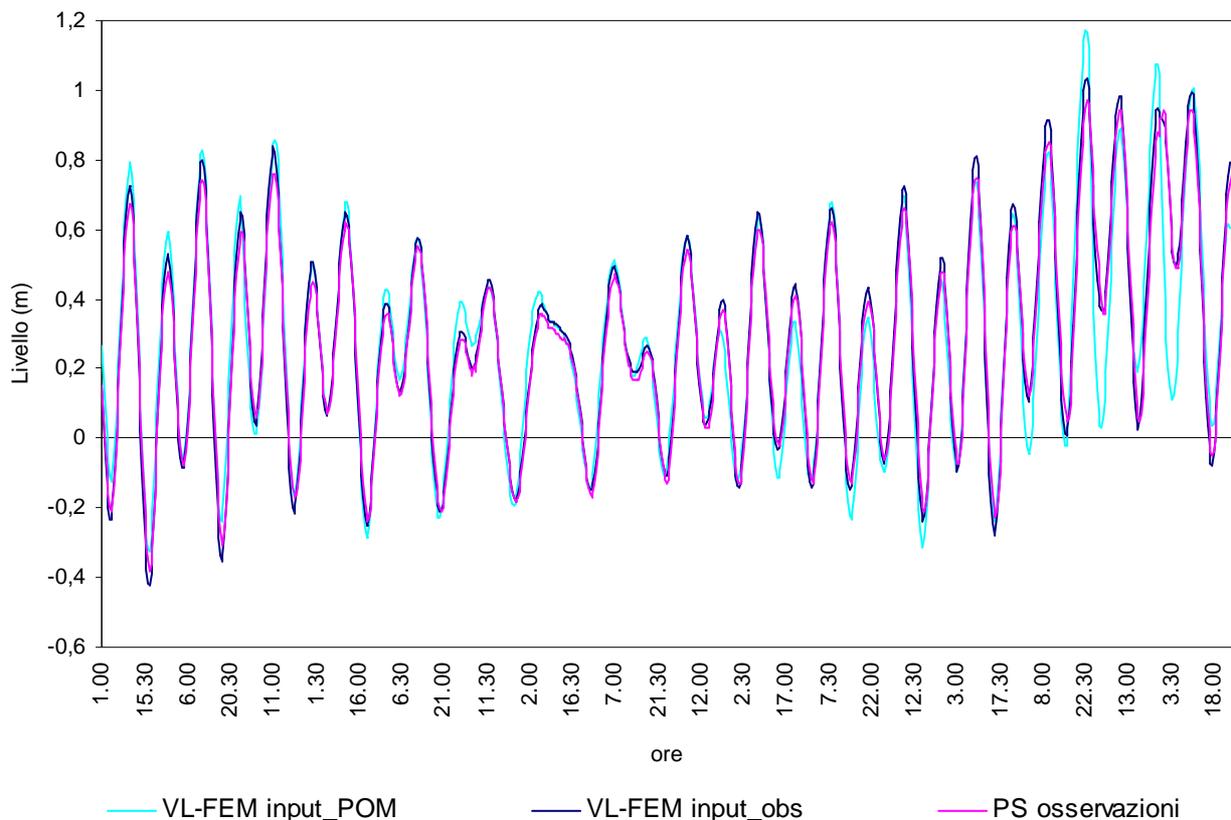


Fig.8 – Previsione del livello di marea a Punta Salute dal 15 al 30/10/2008. Come condizioni al contorno si sono utilizzati i dati previsti dal POM (VL-FEM input_POM) e i dati osservati (VL-FEM input_obs). Vengono riportate anche le osservazioni effettivamente registrate.

A questo scopo sono stati analizzati i dati previsti dal POM alle tre bocche di porto, nel periodo gennaio-maggio 2008, e sono stati confrontati con i dati osservati. I risultati confermano quanto osservato in precedenza, mostrando che le curve previste seguono l'andamento dei livelli osservati, ma presentano differenze elevate nei minimi e nei massimi. Nella fig.9 sono riportati, a titolo di esempio, i livelli di marea previsti alla bocca di Lido da due diverse simulazioni del POM in funzione dell'ora di forecast.

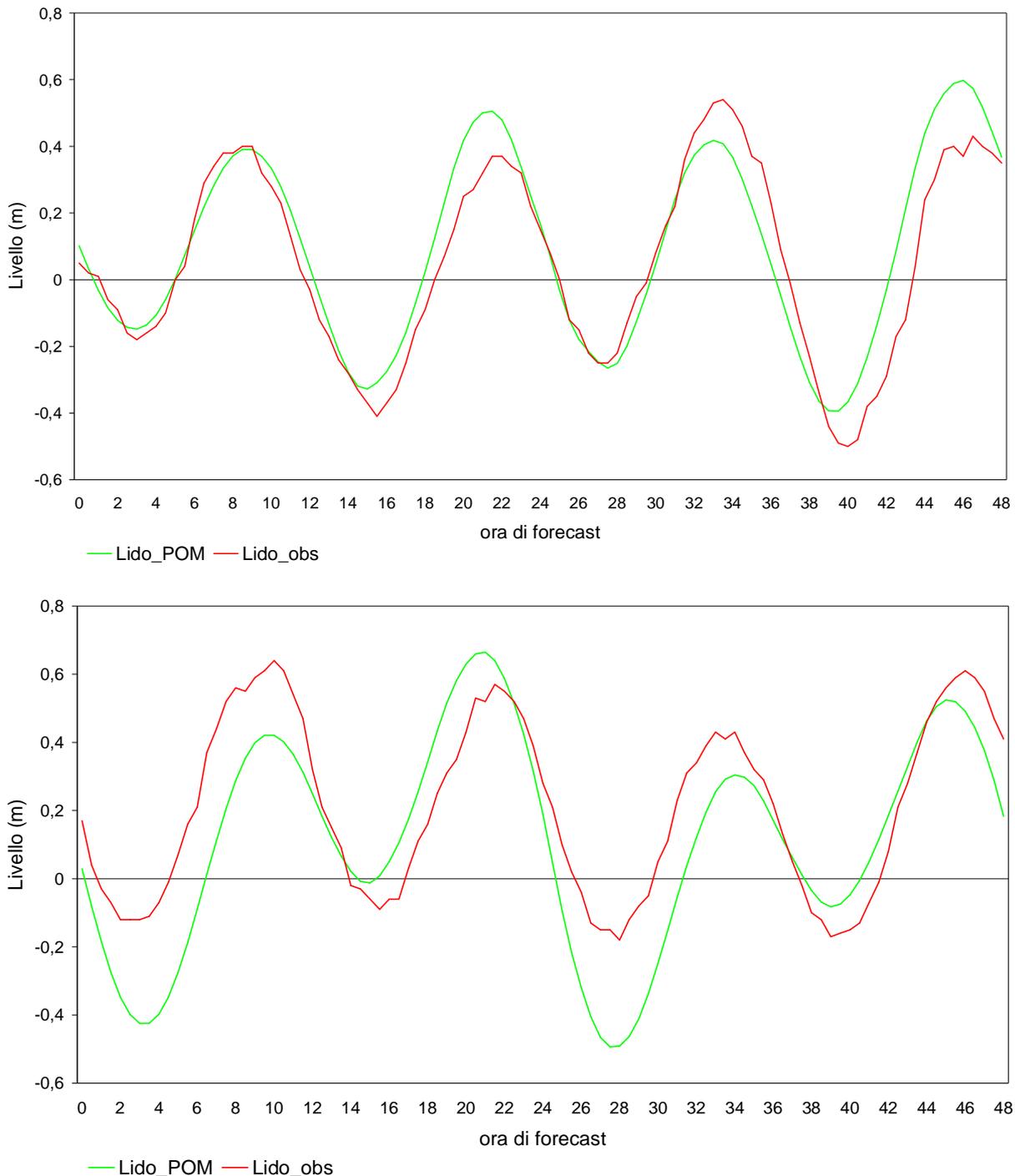


Fig.9 – Previsione POM alla bocca di Lido e confronto con le osservazioni per il 5/03/2008 (in alto) e per il 19/04/2008 (in basso)

Questa discordanza può essere spiegata considerando che il dominio del POM si estende su tutto l'Adriatico, con una griglia che aumenta gradualmente di risoluzione andando verso le latitudini superiori (fig.3), ma che non segue la linea di costa e non riesce, quindi, a risolvere correttamente i fenomeni ad essa attigui.

Sulla base di questi risultati, si è ritenuto opportuno elaborare una procedura di post processing da applicare ai dati previsti dal POM, allo scopo di migliorare la qualità degli input al VL-FEM e di migliorare, di conseguenza, le previsioni del modello VL-FEM nella configurazione operativa. L'algoritmo implementato si basa sulla teoria del filtro di Kalman, che verrà esposta nel capitolo successivo.

6. Post processing sui dati di input: il filtro di Kalman

Per migliorare la determinazione dei livelli forniti come input ai bordi aperti (*boundary conditions*) della griglia di calcolo del VL-FEM i dati POM alle tre bocche di porto vengono processati utilizzando una routine che cerca di migliorarne la qualità tramite l'utilizzo dei dati di livello osservati il giorno precedente. L'algoritmo di calcolo utilizzato per raggiungere tale miglioramento è quello relativo al filtro di Kalman unidimensionale (Kalnay, 2003).

6.1 Cenni sulla teoria generale

Il filtro di Kalman ha lo scopo di correggere uno stato di un sistema fisico, x^b , previsto da un modello dinamico, tramite l'utilizzo di dati osservati, y^o . Si definiscono *variabili di controllo*, le variabili del sistema che si vogliono correggere e rispetto al quale il modello viene considerato come un operatore. In genere vengono prese le variabili dinamiche che corrispondono ad uno stato fisico del sistema. Per esempio, nel caso di un modello idrodinamico barotropico queste possono essere rappresentate dalla velocità di corrente e dal livello in ogni nodo della griglia di calcolo.

Il modello dinamico viene quindi visto come un operatore che trasporta lo stato nel tempo: $M_0: x(t_0) \rightarrow x(t_1)$. Il Kalman filter è un sistema di assimilazione *sequenziale*.

Questo significa che il ciclo è composto da due passi: il *forecast step*, in cui da uno stato di *analisi*, ovvero uno stato corretto tramite l'assimilazione precedente, si ottiene uno stato di previsione, detto di forecast, o *first guess*; e l'*analysis step* che, una volta disponibili i dati osservati, li utilizza per correggere lo stato e creare un nuovo stato di analisi. La particolarità del Kalman filter è data dal fatto che esso consente di dare un errore al modello e di evolvere nel tempo anche la matrice di covarianza degli errori associata allo stato di forecast (a differenza dell'Optimal Interpolation). Per questi motivi è considerato il sistema più completo e meno semplificato di assimilazione dati.

Come accennato, la procedura di assimilazione si può suddividere in due parti. La prima, la *forecast step*, si riassume con le seguenti equazioni:

$$x^f(t_i) = M_{i-1}[x^a(t_{i-1})] \quad (2.a)$$

$$P_i^f = L_{i-1}P_{i-1}^aL_{i-1}^T + Q_{i-1} \quad (2.b)$$

La prima (2.a) trova lo stato di forecast, x^f al tempo t_i , che è dato dall'applicazione del modello, rappresentato dall'operatore M_{i-1} , allo stato di analisi x_a al tempo t_{i-1} . La seconda equazione (2.b) è un po' più complessa e serve a definire la matrice di covarianza degli errori dello stato di forecast, ovvero P_f , al tempo t_i . Questa è uguale a quella di analisi al

tempo t_{i-1} , trasformata dall'applicazione dell'operatore tangente e aggiunto del modello, L_{i-1} e L_{i-1}^T e con l'aggiunta della matrice di covarianza degli errori del modello, Q_{i-1} .
Le equazioni della fase di analisi, dove rientra l'uso delle osservazioni, sono invece le seguenti:

$$x^a(t_i) = x^f(t_i) + K_i d_i \quad (3.a)$$

$$P^a_i = (I - K_i H_i) P^f_i \quad (3.b)$$

La prima definisce lo stato di analisi come lo stato di forecast più un contributo dato dal vettore *innovazione*, d_i , pesato dal guadagno, K_i .

Il vettore *innovazione* dipende dalla differenza tra i dati osservati, y^o_i , e quelli del modello, $x^f(t_i)$. Tale differenza viene calcolata nello spazio degli stati delle osservazioni (solitamente più piccolo di quello degli stati del modello). Per fare ciò viene applicato l'operatore *osservazione*, H allo stato del modello. Il vettore *innovazione* è quindi definito dalla seguente:

$$d_i = y^o_i - H[x^f(t_i)] \quad (4)$$

Il guadagno K_i è una matrice che pesa il contributo del vettore *innovazione* per ogni componente del vettore di stato del modello. Esso è definito dalla seguente:

$$K_i = P^f_i H_i^T [R_i + H_i P^f_i H_i^T]^{-1} \quad (5)$$

Dove l'unica variabile non ancora introdotta è la matrice di covarianza degli errori delle osservazioni, R_i .

La seconda equazione della fase di analisi (eq. 3.b) aggiorna la matrice di covarianza degli errori dello stato di analisi, P_a .

6.2 Applicazione come post-processing

Il Kalman filter è stato utilizzato per eseguire la correzione di una serie temporale. In questo caso la formulazione matematica si semplifica notevolmente. Qui di seguito si espone la trattazione per la correzione di un'ora di previsione.

Il modello VL FEM prevede una serie temporale di due giorni, con un dato ogni mezz'ora. Per questo motivo un sistema identico a quello descritto qui di seguito è stato impostato per ogni anticipo di previsione, per un totale di 96 forecast.

Si supponga di voler correggere il livello previsto con la prima ora di forecast, z . Per far questo viene creato un semplice modello statistico e il livello corretto è data da: $z^* = x_1 + x_2 z$ con opportuni coefficienti x_1 e x_2 da calibrare.

Un normale modello statistico calibrerebbe questi coefficienti su di un dataset abbastanza lungo, ad esempio qualche anno. Una volta calibrati i coefficienti rimarrebbero gli stessi fino ad una nuova calibrazione, la quale non dà un peso maggiore ai dati più recenti, ma pesa ogni record del dataset in modo uguale.

La logica del Kalman filter è diversa. Si parte da valori dei coefficienti iniziali plausibili e si lascia che ad ogni run il sistema li migliori sfruttando gli ultimi dati disponibili.

I coefficienti variano quindi nel tempo e sono aggiornati a ogni nuovo run del sistema di assimilazione.

Con riferimento alla notazione utilizzata nella sezione precedente, per la prima ora di forecast si devono correggere i coefficienti x_1 e x_2 . Le variabili di controllo sono quindi x_1 e

x_2 che corrispondono alle componenti del vettore di stato x^f (o x^a se di analisi, una volta corrette). Il modello vero e proprio non esiste, o meglio è dato dall'operatore unitario: $M \equiv I$. Questo semplifica notevolmente le equazioni anche per quanto riguarda gli operatori tangente e aggiunto. Le eq. 2.a e 2.b della prima fase diventano le seguenti:

$$x^f(t_i) = x^a(t_{i-1}) \quad (6.a)$$

$$P_i^f = P_{i-1}^a + Q_{i-1} \quad (6.b)$$

Essendo il vettore di stato bidimensionale, le matrici P_i^f e P_{i-1}^a hanno dimensione 2×2 . Q_{i-1} è la matrice degli errori del modello di regressione e ha dimensione 2×2 anch'essa. Il vettore innovazione diventa uno scalare dato sempre dalla eq. 4, in cui l'osservazione y_i^o è il livello osservato il giorno precedente e viene confrontato con il risultato del modello nello spazio delle osservazioni:

$$z^* = h_1 x_1 + h_2 x_2 = x_1 + x_2 z \quad (7)$$

Da quest'ultima se ne deduce che l'operatore osservazione in questo caso è dato da $H = (h^1, h^2)^T = (1, z)^T$, e varia ogni giorno.

La matrice del guadagno K_i diventa un vettore, la sua forma resta quella descritta dall'equazione 5, in cui è presente anche l'errore dell'osservazione R_i che ora è uno scalare.

Il sistema descritto è stato impostato per ogni mezz'ora di previsione. Come accennato precedentemente, sono necessari alcuni giorni affinché i coefficienti entrino a regime ed i risultati comincino ad essere affidabili. Inoltre, se i dati osservati e i risultati del modello differiscono troppo tra di loro, si possono riscontrare delle difficoltà nella minimizzazione degli errori.

I parametri per calibrare l'algoritmo sono due: l'errore delle osservazioni, R_i , e l'errore del modello di regressione, Q_i . Più grande è Q_i e più velocemente i vecchi dati perderanno di importanza e i coefficienti verranno modificati maggiormente. Ad ogni modo, anche questi parametri vanno modificati con attenzione per non rendere il sistema instabile.

Le cause di un cattivo funzionamento del filtro possono anche essere legate alla qualità dei dati forniti. Va controllata in particolare la qualità dei dati osservati forniti al sistema.

Se questi presentano degli errori troppo elevati questo si ripercuoterà sulla previsione. Inoltre, se la previsione originale del POM si discosta troppo dai dati osservati, la correzione può essere instabile a causa della differenza troppo grande tra le due curve.

6.3 Analisi dei risultati

Al fine di testare il filtro su un periodo statisticamente significativo, si è eseguita la correzione su tutti i risultati delle simulazioni POM relative a gennaio-ottobre 2008. Sono stati poi confrontati i livelli calcolati dal POM e quelli del POM post-processati con i dati osservati, per diverse simulazioni. Si osserva, in generale, un netto miglioramento introdotto dal filtro di Kalman, se si considerano le osservazioni come punto di riferimento della qualità del dato. Nella fig.10 viene riportata come esempio la previsione del POM dell'11/02/2008, per le successive 48 ore, per la stazione di Lido (Lido_POM), insieme ai dati osservati (Lido_obs) e ai livelli POM corretti con il post-processing (Lido_post). Il grafico mette in evidenza un buon accordo tra la curva corretta con il filtro di Kalman e la curva dei livelli osservati, soprattutto nelle prime 24 ore di previsione, a differenza di quanto accade considerando la curva dei livelli POM non corretti.

Su tutto il periodo considerato si sono inoltre eseguite alcune elaborazioni statistiche, dividendo la serie in due sottoinsiemi, il primo costituito dai risultati delle prime 24 ore di previsione di ogni simulazione e il secondo relativo ai risultati delle successive 24 ore. Per ogni sottoinsieme si sono considerate la distribuzione degli scarti $\Delta E_i^m = Z_i^m - Z_i^0$ tra i livelli previsti dal modello e quelli osservati, e quella degli scarti $\Delta E_i^p = Z_i^p - Z_i^0$ tra i livelli post-processati e quelli osservati, per tutte le ore del periodo considerato. È stata quindi elaborata una statistica riassuntiva per ogni distribuzione, con il calcolo della media e della relativa deviazione standard, riportata in tabella 1.

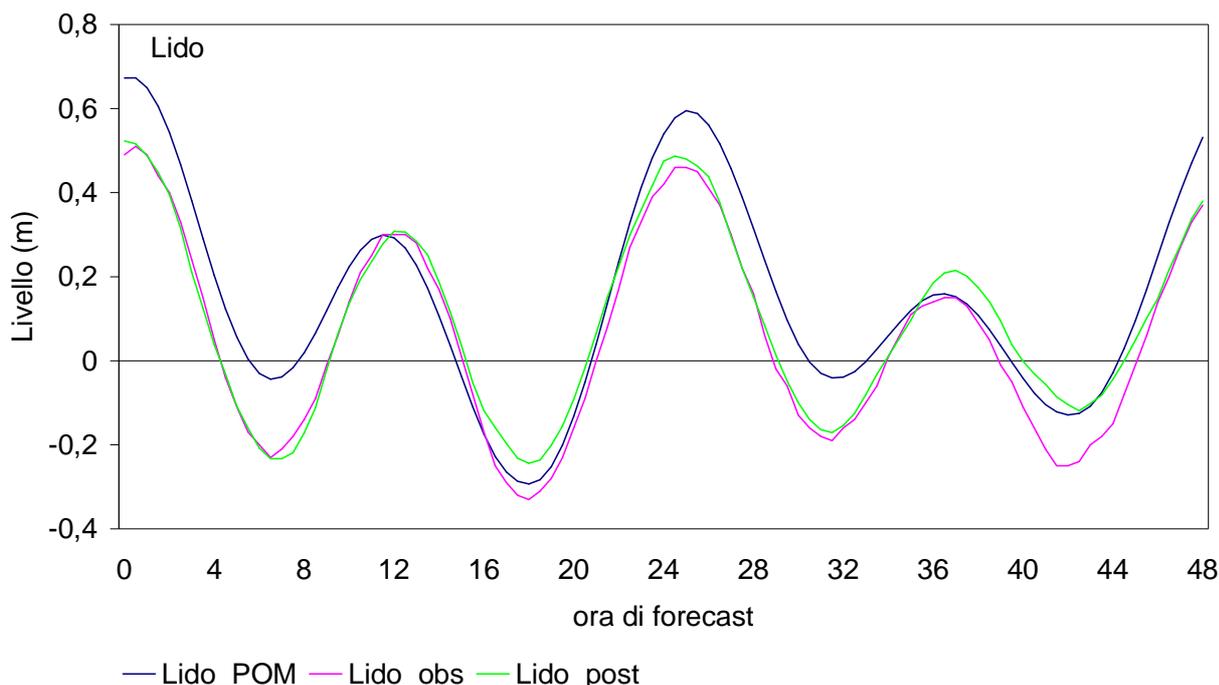


Fig.10 – Previsione di livello (m) del giorno 11/02/2008 a Lido: sono riportate le previsioni del POM, i livelli POM corretti con filtro di Kalman e le osservazioni

Scarti	Giorno di forecast	Media (m)	Dev.Standard (m)
POM	1	-0.026	0.125
POM_pp	1	-0.001	0.073
POM	2	-0.025	0.122
POM_pp	2	-0.004	0.097

Tab.1 – Confronto statistico fra i livelli previsti dal POM alla bocca di Lido e gli stessi livelli dopo l'applicazione del filtro di Kalman: media e deviazione standard degli scarti tra valori previsti e osservazioni per il primo e per il secondo giorno di previsione

Come indicato nella tabella, il filtro riesce a ridurre la deviazione standard degli scarti da 12.5 cm a 7.3 cm per il primo giorno di previsione e da 12.2 cm a 9.7 cm per il secondo giorno. Il secondo giorno di previsione risente meno della correzione introdotta dal filtro, perché è più lontano dalle osservazioni utilizzate per il post-processing, che risalgono al giorno precedente la simulazione.

Con riferimento al periodo gennaio-maggio 2008, si sono eseguite le simulazioni con il VL-FEM e sono stati analizzati i dati previsti a Punta della Salute. Il confronto tra le previsioni eseguite con i livelli POM in input e con i livelli POM post processati confermano le analisi precedenti. Dagli andamenti riportati come esempio nella figura 11, relativi al 15-16 e al 29-30 ottobre, si osserva un miglioramento delle previsioni del VL-FEM quando viene effettuato il post processing ai dati POM in input. Va evidenziato, inoltre, che quando i livelli calcolati dal POM alle bocche di porto della laguna si discostano in maniera consistente dai livelli osservati, come nel caso del 29-30 ottobre, il filtro di Kalman produce un miglioramento della previsione finale, che non riesce tuttavia a seguire in maniera soddisfacente l'andamento dei dati osservati.

Sulla serie completa, relativa a tutto il periodo considerato, si sono poi eseguite ulteriori elaborazioni per il primo giorno di previsione, nel caso in cui il run sia inizializzato con i livelli calcolati dal POM (caso a) e nel caso in cui gli input siano i valori del POM post processati con il filtro di Kalman (caso b). In entrambi i casi i dati di vento in input sono quelli osservati. Nella fig.12 sono riportati i relativi scatter-plot. Il confronto fra i due grafici mostra un sostanziale miglioramento nel caso b. Inoltre, come per le precedenti elaborazioni, sono stati calcolati gli scarti fra i valori previsti e quelli osservati, la relativa media e la deviazione standard (tabella 2). Si osserva che il filtro di Kalman determina una riduzione della deviazione standard da 16 cm a 11 cm.

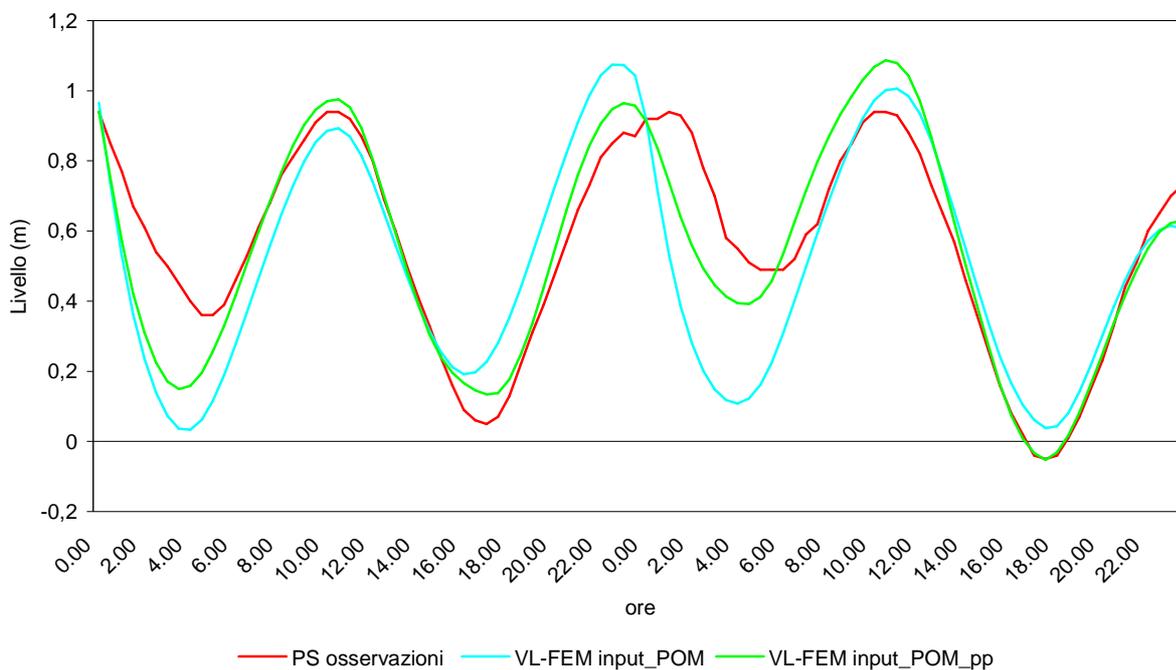
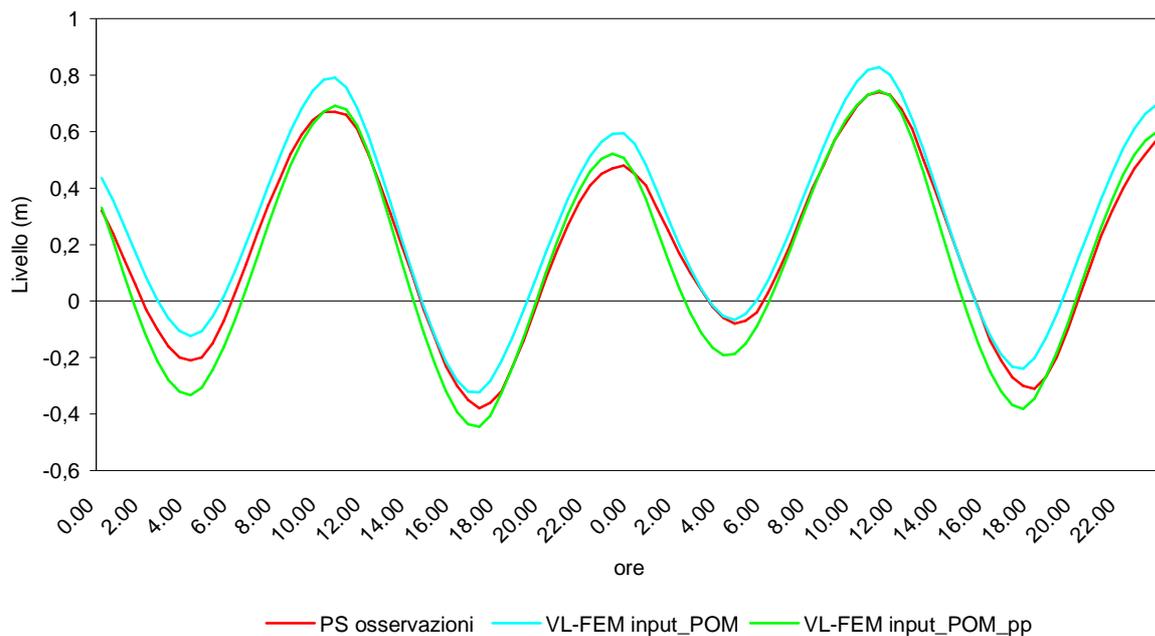
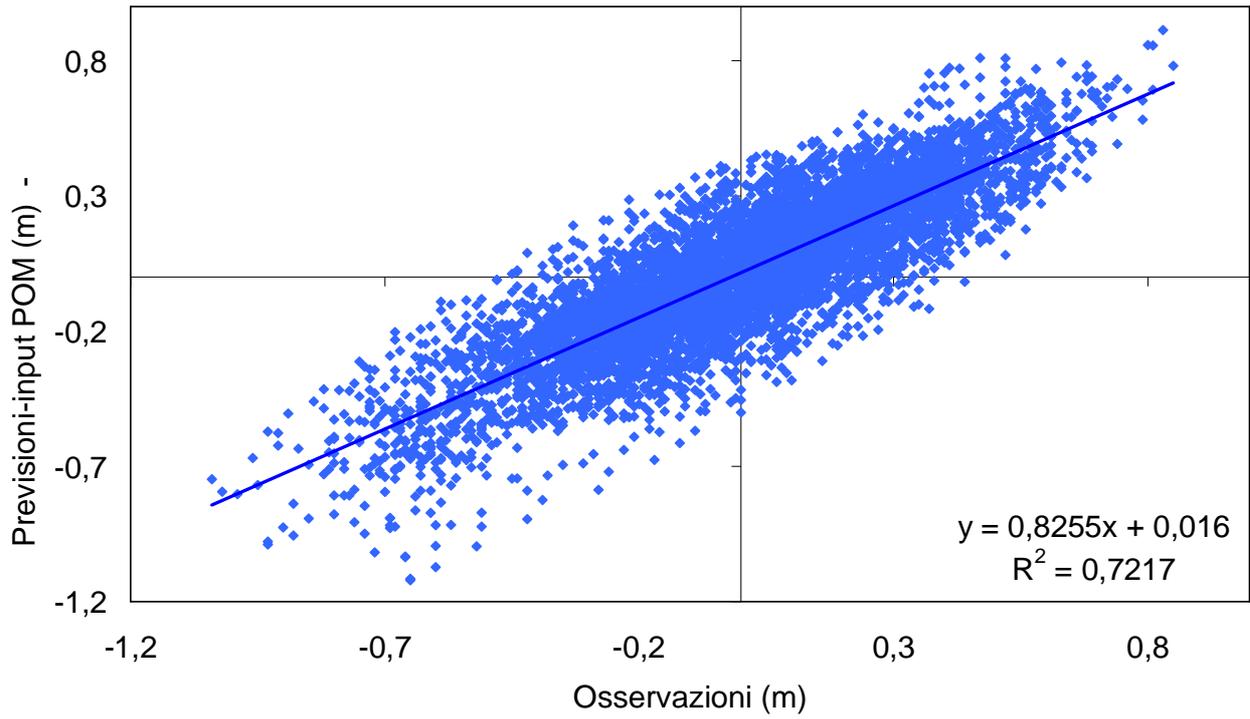


Fig.11 – Previsione di livello (m) per i giorni 15-16/10/2008 (in alto) e per i giorni 29-30/10/2009 a Punta della Salute: sono riportate le previsioni del POM, le previsioni del POM con correzione con filtro di Kalman e le osservazioni

a)



b)

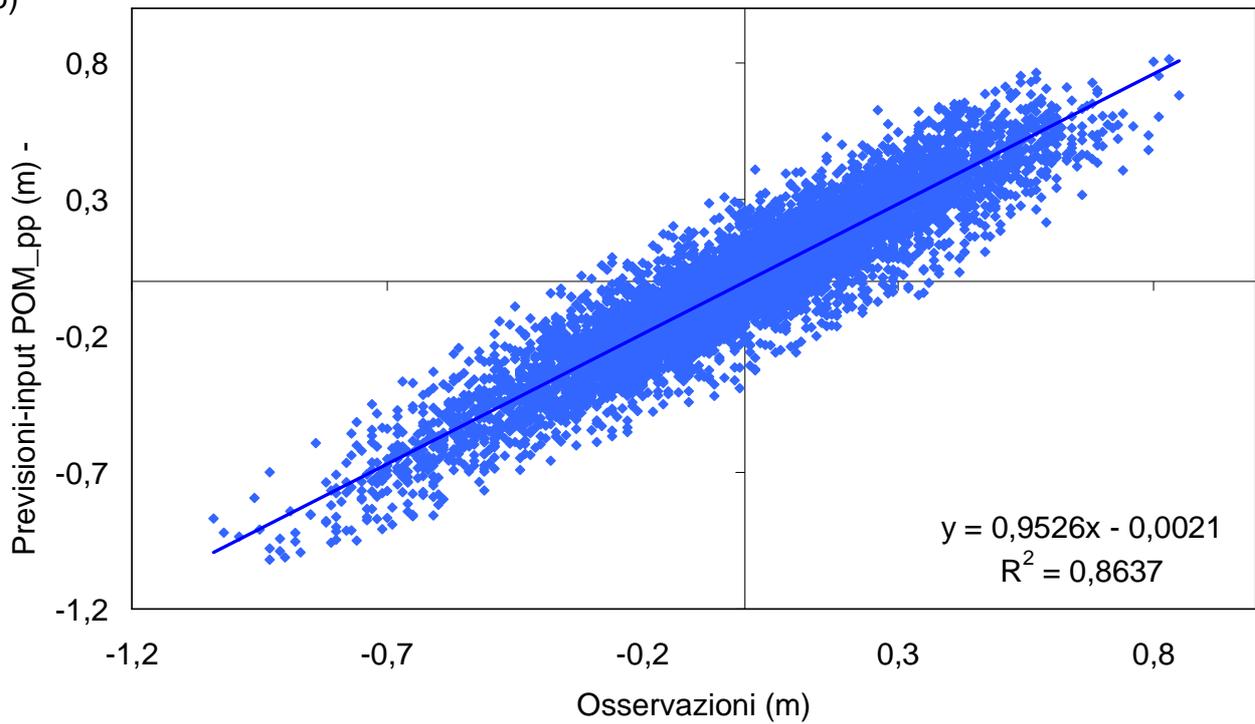


Fig.12 – Scatter plot fra le previsioni del VL-FEM e le osservazioni a Punta della Salute. Caso a) input: previsioni POM; caso b) input: previsioni POM corrette con filtro di Kalman

Scarti	Media (m)	Dev.Standard (m)
POM	0,015	0,162
POM_pp	-0,002	0,113

Tab.2 – Confronto statistico tra i livelli previsti dal VL-FEM a Punta della Salute, quando i dati di input siano i livelli POM oppure i livelli POM post-processati. Media e deviazione standard degli scarti tra valori previsti e osservazioni.

7 . Descrizione dell'ambiente operativo di test

Per poter testare le nuove implementazioni al modello VL-FEM e l'applicazione del filtro di Kalman, si è ritenuto opportuno, prima di trasferire le nuove implementazioni in configurazione di servizio, creare un ambiente di test. La piattaforma di test si è resa necessaria da un lato, per testare l'accuratezza dei nuovi algoritmi sviluppati, dall'altro, per creare una serie temporale consistente per l'analisi statistica, utile ai fini della valutazione della qualità delle previsioni.

La configurazione operativa dell'ambiente di test che è stata realizzata è mostrata schematicamente in fig.13.

Attualmente, il SIMM è operativo su una piattaforma di tipo SGI -ALTIX e fornisce delle previsioni aggiornate ogni 24 ore.

Si è sviluppata una procedura schedulata che giornalmente copia i dati previsti dal modello POM dal repository di output del SIMM al repository di input per il VL-FEM nuova versione. Analogamente, la stessa procedura copia i dati osservati del giorno precedente a quello di previsione da un server del Servizio Laguna di Venezia dell'ISPRA sul repository di input per il VL-FEM nuova versione.

Entrambi i set di dati (osservazioni e previsioni) sono utilizzati dalla procedura del filtro di Kalman e dal modello VL-FEM. Attualmente, in configurazione di test, il modello esegue una sola corsa al giorno.

Ai collaboratori del CNR-ISMAR di Venezia è garantito l'accesso sulla macchina dove è operativo il nuovo modello VL-FEM in configurazione di test. Quando il sistema sarà consolidato (ossia sarà terminata la fase di test) il nuovo algoritmo di post-processing (filtro di Kalman) e la nuova versione del modello VL-FEM verranno migrati sulla piattaforma operativa SGI.

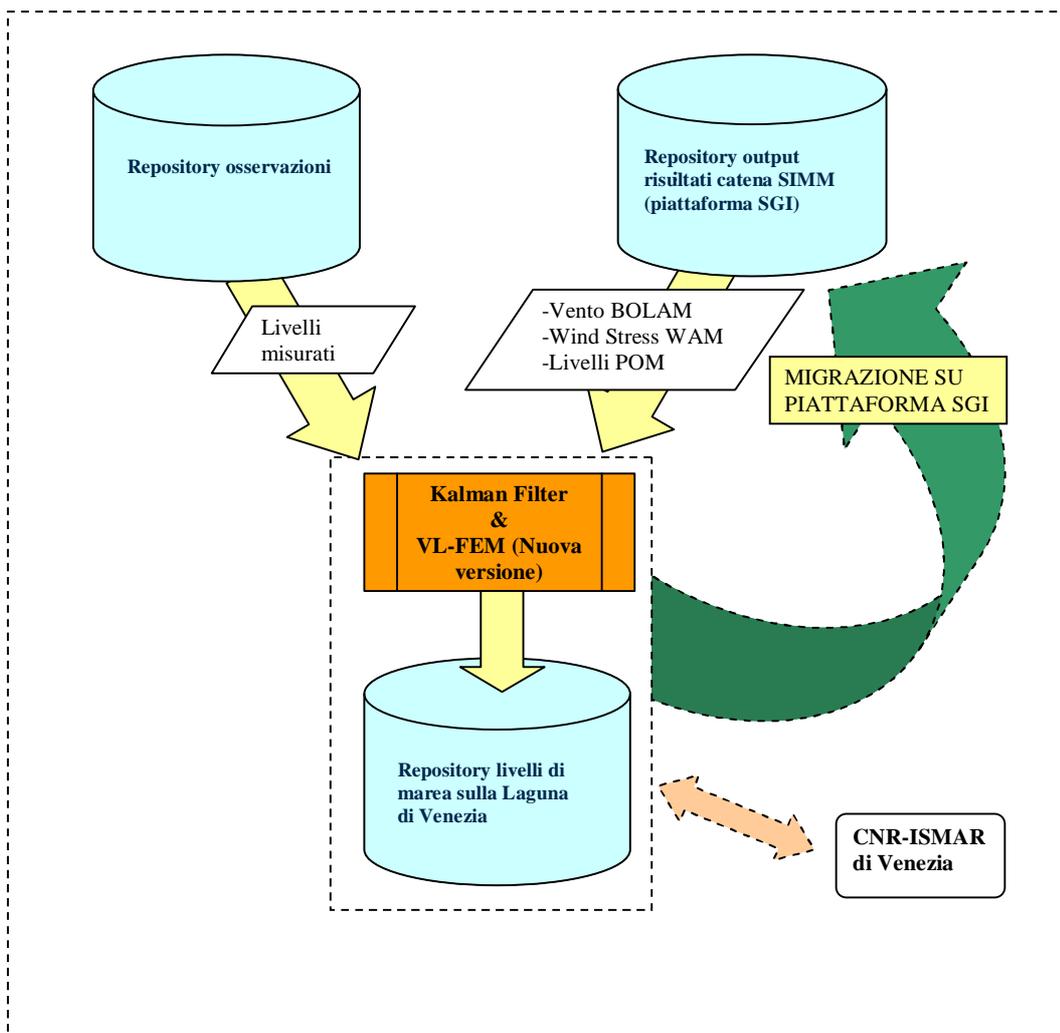


Fig.13 – Schema dell'ambiente operativo di test

8. Conclusioni

Al fine di ottenere un miglioramento della previsione del VL-FEM nella configurazione operativa (SIMM), si è acquisita una nuova versione del modello.

L'analisi dei risultati ottenuti dal confronto tra i livelli di marea forniti dalla nuova versione del modello e dalla precedente ha messo in evidenza un miglioramento delle previsioni. Inoltre, ulteriori analisi sui dati in input al VL-FEM, hanno messo in evidenza la necessità di migliorare le condizioni iniziali del modello. A tale scopo si è sviluppato un algoritmo di post-processing, basato sul filtro di Kalman, da applicare ai dati di livello previsti dal POM.

Si sono effettuate diverse elaborazioni relative al periodo gennaio-maggio 2008, che hanno mostrato un miglioramento delle previsioni dei livelli di marea all'interno della laguna di Venezia (Punta della Salute).

L'attività futura sarà principalmente orientata a testare il modello su periodi più lunghi e ad individuare ed analizzare alcuni casi studio, al fine di validare il modello e sostituire le nuove implementazioni relative al VL-FEM, nella configurazione di servizio del SIMM.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il gruppo di ricerca del Dott. Umgiesser del CNR-ISMAR di Venezia, l'Ing. M. Ferla e il Dott. M. Cordella dell'ISPRA – Servizio Laguna di Venezia, l'Istituzione Centro Previsione e Segnalazione Maree di Venezia per la fornitura dei dati misurati.

Riferimenti bibliografici

- Accadia C., Arena G., Barbano A., Bendivenga N., Casaioli M., Colagrossi A., Corsini S., Inghilesi R., Mariani S., Monacelli G., Nardone G., Rizzo A. (2003), Il Sistema Idro-Meteo-Mare e le reti di monitoraggio marino dell' APAT, *Atti della Settima Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali, Milano*, 24-26 Novembre 2003
- Bajo M., L. Zampato, G. Umgiesser, A. Cucco, P. Canestrelli (2007), A finite element operational model for storm surge prediction in Venice. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75, 236-249
- Berelli G., Leuzzi G., Purini R. (2006) Indagine sul sovrizzo differenziato indotto dalla bora nella laguna di Venezia, *XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche IDRA*.
- Buzzi A., Fantini M., Malguzzi P., Nerozzi F. (1994), Validation of limited area model in cases of Mediterranean cyclogenesis: surface fields and precipitation scores. *Meteorol. Atmos Phys.*, 53: 53-67
- Blumberg A.F., Mellor G.L. (1987), A description of a 3-dimensional coastal ocean circulation model. In "3-dimensional coastal ocean Models", *Coastal and Estuarine Science, N.S. Heaps ed.*, AGU, 4, 1-16
- Canestrelli P., Mandich, M., Pirazzoli, P.A., Tomasin, A., (2001) Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1951-2000), *Centro Previsioni e Segnalazioni Maree*.
- Ferla M., Rusconi A., Zen G. (1996) Applicazione di un modello idrodinamico per la previsione della marea a Venezia, *XXV Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche*, Torino, 16-18 settembre 1996
- Giannini L., Colagrossi A., Corsini S., Ferla M., Cordella M., Felli L. (2006), Il sistema Idro-Meteo-Mare dell'APAT per la previsione dell'acqua alta a Venezia. Metodologia di validazione e primi risultati. *Atti della X Conferenza ASITA*, Fiera di Bolzano 14-17 novembre 2006.
- Kalnay, E., (2003) Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability, first ed., Cambridge University Press, Cambridge
- Nicastro S., Valentinotti F. (1998), Parallel implementation of a meteorological model on SIMD architecture, *Lecture Notes in Computer Science, Slobodkin-Hetzberger (Eds.)*, Springer, 1401, 151-159
- Piervitali, L. Giannini. (2007), The hydro-meteo-marine system to forecast high-tide events in Venice lagoon: preliminary results, *4th European Conference on Severe Storms*, 10-14 settembre 2007, Miramare-Trieste, Italia
- Polli S. (1961), La propagazione della marea nel golfo di Venezia, *Rapporti preliminari della comm. di studio per la conservazione della laguna e della città di Venezia*, vol. 1- Ist. Veneto di scienze, lettere ed arti Venezia.
- Speranza A., Accadia C., Casaioli M., Mariani S., Monacelli G., Inghilesi R., Tartaglione N., Ruti P.M., Carillo A., Bargagli A., Pisacane G., Valentinotti F. and Lavagnini A. (2004), POSEIDON: an integrated system for analysis and forecast of hydrological, meteorological and surface marine fields in the Mediterranean area. *Il Nuovo Cimento*, 27, 330-345.
- The WAMDI group (1988), The WAM model – A third generation ocean waves prediction model. *J. Phys. Ocean.*, 18: 1776-1810
- Umgiesser, G., J. Sundermann, and E. Runca (1988), A semi-implicit finite element model for the Lagoon of Venice, *Proceedings of an International Conference on Computer Modelling in Ocean Engineering*, Venice 19-23 Sept
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., and Solidoro, C. (2004), A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems*, 51:123-145.