

Analisi della circolazione idrica nella Sacca di Goro mediante modello matematico

Armando Brath¹, Marco Gonella², Paolo Polo² e Massimo Tondello²

¹DISTART Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Viale Risorgimento, 2 – 40136 Bologna

²MED INGEGNERIA S.r.l., Riviera Ruzzante, 49 - 35123 Padova

Riassunto

L'analisi modellistica della circolazione idrica nella Sacca di Goro ha avuto l'obiettivo primario di verificare il funzionamento dell'intervento per il miglioramento della circolazione e del ricambio idrico attraverso la movimentazione naturale delle acque, progettato dalla Provincia di Ferrara nel 1998 e realizzato nel 1999. La costruzione del modello di simulazione è stata basata su un rilievo batimetrico di dettaglio eseguito nella primavera del 1999. I dati per la messa a punto e la calibrazione del modello sono stati desunti da misure effettuate dalla Regione Emilia Romagna nell'autunno 1998 e nel corso di due campagne di rilievi mareografici e correntometrici fatti realizzare appositamente nell'ambito dello studio nei mesi di Aprile e Maggio 1999.

Il modello di simulazione è stato costruito con il codice di calcolo MIKE 21, con un approccio bidimensionale. I limiti di rappresentatività dello strumento di analisi sono stati esaminati e trattati sia sotto il profilo teorico che sotto l'aspetto più diretto dell'applicazione specifica. Utilizzando i dati a disposizione, il modello è stato tarato e verificato in rapporto a diverse condizioni idrodinamiche al contorno. È stata inoltre effettuata un'analisi di sensitività sui parametri idrodinamici che ha definito i limiti ed i range di rappresentatività delle soluzioni.

I risultati del modello confermano sostanzialmente la funzionalità dell'intervento, fornendo una rappresentazione dinamica degli effetti della sua realizzazione in rapporto a condizioni di funzionamento anche diverse da quelle ipotizzate nel progetto.

Pur nella limitazione dovuta all'approccio idrodinamico bidimensionale e alla rappresentatività effettiva delle condizioni di taratura e verifica (che sono affidabili solo per la zona Est della Sacca direttamente interessata dall'intervento) il modello fornisce un'utile base conoscitiva sull'idrodinamica complessiva della Sacca che potrà essere utilizzata per lo sviluppo di una modellistica tridimensionale dell'idrodinamica e dei fenomeni di trasporto-dispersione e qualità dell'acqua.

Caratteri generali della circolazione idrica nella Sacca di Goro e descrizione dell'intervento esaminato

La Sacca di Goro è un ambiente di transizione da acque interne (dolci) ad acque esterne (marine) in continua evoluzione morfologica. I principali aspetti fenomenologici di interesse per l'analisi della circolazione idrica possono così essere sinteticamente schematizzati e descritti.

L'evoluzione naturale della chiusura a mare della Sacca tende al progressivo prolungamento dello scanno che provoca, nel tempo, una crescente riduzione dello scambio idrico tra acque interne ed acque esterne. Tale condizione evolutiva comporta, oltre che minor ricambio delle acque, anche una minore circolazione idrodinamica delle correnti di marea all'interno della Sacca, con la conseguente riduzione della capacità di rimescolamento idrodinamico e quindi della capacità di trasporto delle

sostanza disciolte o sospese nelle acque per convezione e dispersione. La scarsa mobilità delle acque dà vita, nei periodi caldi, al proliferare della popolazione algale, comportando i noti fenomeni negativi sull'ambiente idrico della Sacca, da cui consegue una forte riduzione della produzione di mitili, che rappresenta la fonte economica primaria della zona.

Per contrastare gli effetti dell'evoluzione morfodinamica in corso sono già stati tentati diversi interventi, finalizzati al miglioramento dello scambio idrico tra ambiente interno ed esterno. Gli interventi attuati sono costituiti essenzialmente nell'escavo di canali lagunari in grado di convogliare con maggior dinamismo le acque di mare all'interno della Sacca e, dove necessario, hanno comportato il taglio o la sistemazione dello scanno.

Tra gli interventi operati in passato si ricordano i seguenti:

- la costruzione dell'idrovora a sei luci posizionata sullo scanno (Figura 1), originariamente collegata ad una rete interna di canali mareali in parte realizzata, ma mai entrata in funzione;
- il successivo taglio abusivo dello scanno che, alterandone l'equilibrio morfologico, ha prodotto l'allargamento smisurato della discontinuità fino alla formazione di una bocca lagunare secondaria di larghezza paragonabile a quella della bocca principale;
- il taglio controllato dello scanno effettuato durante l'estate del 1998 presso la foce del Po di Goro ("Taglio Anconon", Figura 2), che ha portato giovamento alla qualità delle acque più interne nella zona Est della Sacca e che, richiuso in autunno, è stato predisposto per essere ancora attivato in occasione di eventuali emergenze future;
- la realizzazione di un'ampia zona di fitodepurazione, controllata da una serie di paratoie di regolazione che permettono l'ingresso in Sacca, nella zona di minore circolazione, delle acque del Po di Goro, una volta abbattuto il carico di azoto e fosforo.

La difficoltà basilare nella gestione delle acque interne della Sacca consiste nella ricerca della giusta misura di interscambio idrico da realizzare tra laguna e mare affinché il ricambio non sia così limitato da compromettere la qualità delle acque interne, ma non sia d'altra parte tanto consistente da turbare quel giusto equilibrio tra temperatura, salinità e stratificazione delle acque interne che determina le condizioni di alta producibilità di pescato che vanno conservate e, ove possibile, migliorate. L'intervento progettato dalla Provincia di Ferrara (Lamberti, 1998) persegue un ragionevole obiettivo di miglioramento della circolazione nella zona di Gorino a mezzo della realizzazione di un canale mareale che collega la bocca secondaria dello scanno alla zona più interna della Sacca ed è poi connesso alla foce del Po di Goro a mezzo di una struttura munita di paratoie a ventola ad apertura automatica, per differenza di livello, che permettono solo il deflusso unidirezionale dall'interno all'esterno della laguna.

L'intervento, per maggior chiarezza di esposizione, è schematizzato nelle seguenti figure 1, 2, 3 che riportano, a scale diverse, una rappresentazione della Sacca di Goro desunta dalla planimetria di base del Consorzio tra Provincia di Ferrara e Comune di Goro per la gestione della Sacca.

Il funzionamento del sistema di ricircolo così costituito è basato sul ritardo di marea che si verifica tra la zona di sbocco (la foce del Po di Goro) ed il punto più interno della Sacca. Come noto, infatti, l'onda di marea percorre l'alto Adriatico in senso antiorario, e si presenta lungo lo scanno con un certo ritardo da Est verso Ovest, come evidenziato dalle linee cotidali pubblicate sui bollettini di marea.

La foce del Po di Goro è quindi il primo punto del sistema ad essere investito dall'onda di marea crescente. L'onda prosegue quindi il suo corso lungo lo scanno e penetra all'interno della Sacca prima attraverso la bocca secondaria e poi attraverso quella principale. Entrata dalla bocca secondaria l'onda di marea si sviluppa all'interno della Sacca per raggiungere infine il punto più interno, che è quello prossimo alla foce del Po di Goro. L'onda di marea raggiunge tale punto con un certo ritardo rispetto alla condizione esterna e quindi nei pressi della foce del Po di Goro si determina un sensibile dislivello tra interno ed esterno della Sacca (Figura 3).

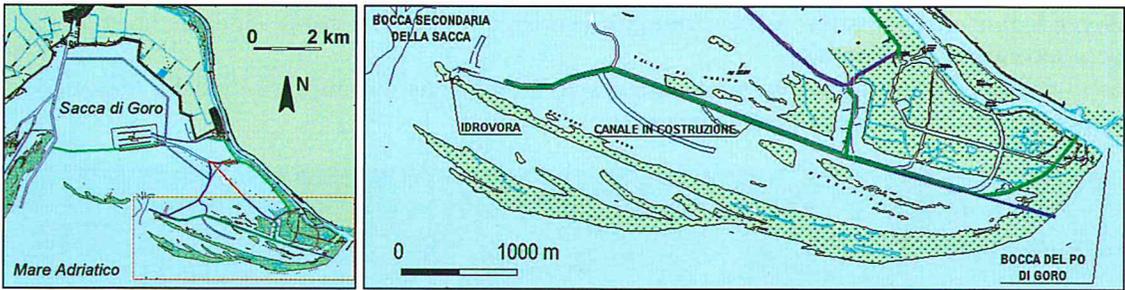


Figura 1 - Planimetria complessiva della Sacca di Goro (a sinistra) e planimetria della zona di intervento con indicazione del tracciato del canale in costruzione.

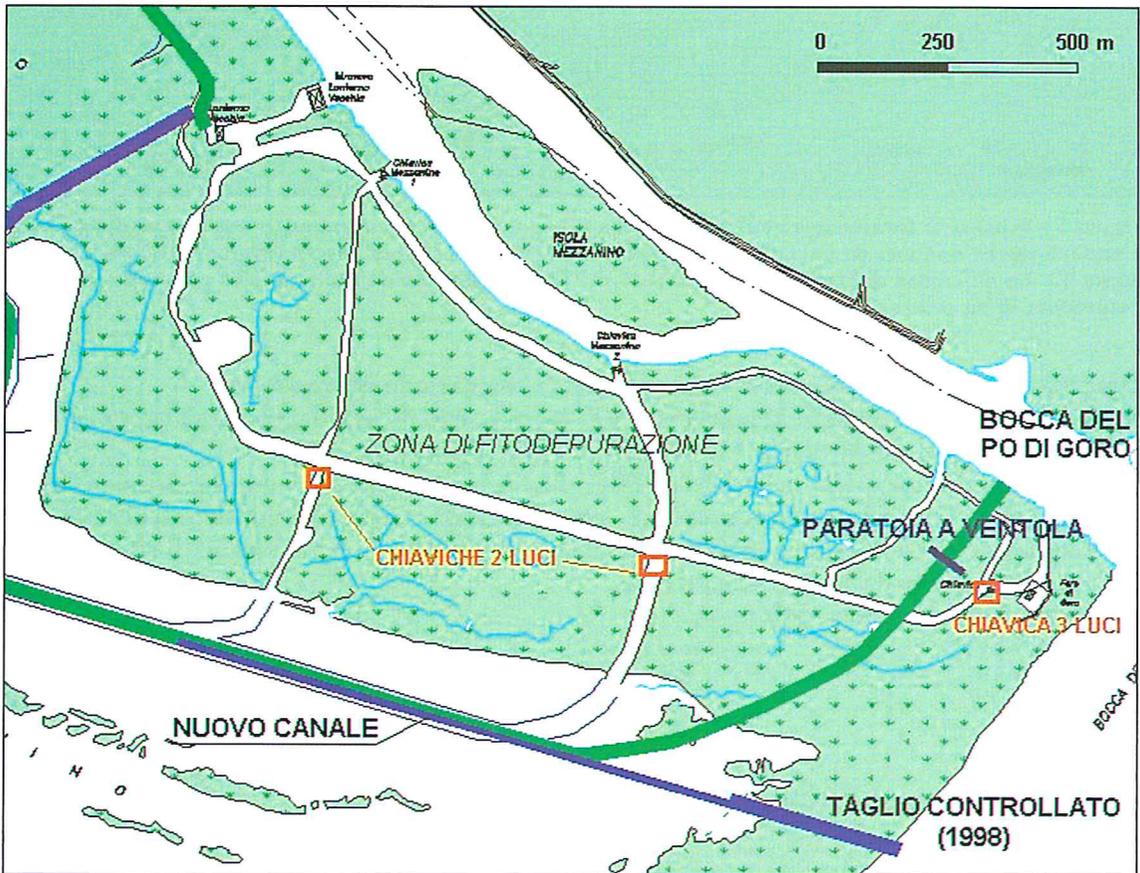


Figura 2 - Particolare della zona di sbocco del nuovo canale. Si noti l'esistente rete idraulica della zona di fitodepurazione, con canali e chiaviche di collegamento tra il Po di Goro e l'interno della Sacca. Si noti anche l'ubicazione del taglio controllato (Anconon) realizzato nell'estate 1998 e successivamente richiuso.

L'esistenza di un apprezzabile ritardo tra la marea esterna e quella interna in tale zona è peraltro confermato dalle osservazioni mareografiche disponibili.

Ad opera di tale dislivello dovrà avvenire l'apertura della paratoia a ventola che determinerà l'uscita del flusso di marea verso l'esterno, fino a quando l'onda di marea esterna non risulterà di nuovo crescente cosicché il livello esterno prevarrà sull'interno e la paratoia a ventola si richiuderà.

Il sistema funzionerà quindi in modo pulsante durante il ciclo di marea scaricando verso mare le acque interne. Per migliorare la circolazione della parte più interna della Sacca e convogliare le acque

favorendone il deflusso attraverso la paratoia a ventola è realizzato il canale lagunare che collega la bocca secondaria alla struttura.

Scopo dell'analisi modellistica qui presentata è stata la verificata dinamica, su modello numerico di simulazione, del funzionamento dell'intervento.

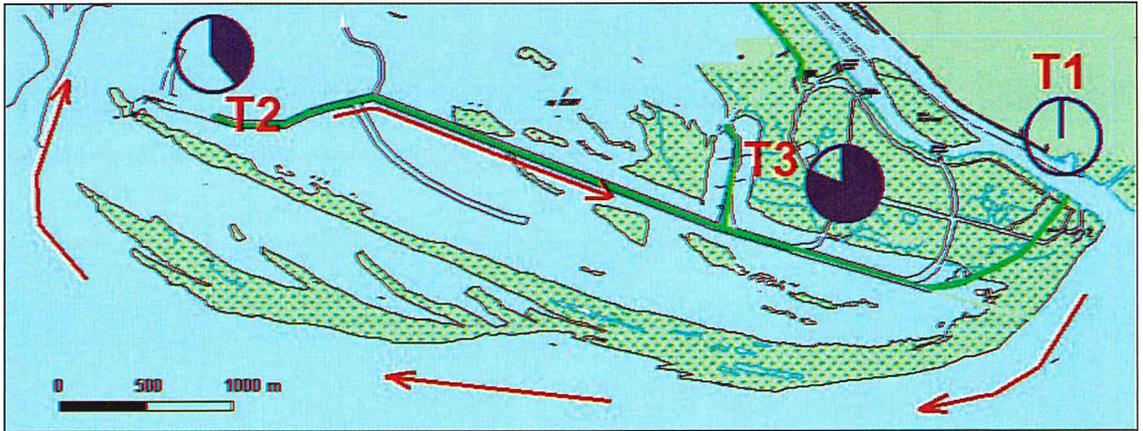


Figura 3 - Schema di funzionamento della soluzione per la movimentazione naturale delle acque della Sacca. L'onda di marea si muove da Est a Ovest lungo lo scanno e penetra poi nella Sacca raggiungendo per ultimo il punto T3. La differenza di livello dovuta al ritardo tra T3 e T1 determina l'apertura della paratoia a ventola e l'espulsione di un certo volume d'acqua.

Descrizione del codice di calcolo utilizzato per la costruzione del modello

Per la costruzione del modello idrodinamico della Sacca è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE 21, prodotto dal Danish Hydraulic Institute (DHI, 1993; Abbott et al., 1979).

Il modulo idrodinamico HD del modello MIKE 21 risolve le equazioni complete del moto di de St. Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St. Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad [2]$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned} \quad [3]$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;

g = accelerazione di gravità;

$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w = densità dell'acqua;

x,y = coordinate spaziali;

t = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componenti del radiation stress.

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è valutato secondo due modalità alternative: dipendente dal flusso locale oppure dipendente dalla velocità locale. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o infine come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski (1963):

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad [4]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0.25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) viene valutato come:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} hE \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad [5]$$

Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando lo schema ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con l'algoritmo DS (Double Sweep, v. Abbott, 1979).

Oltre alla batimetria, assegnata su una griglia di calcolo regolare, devono essere assegnati i valori di scabrezza del fondo per il calcolo delle resistenze e deve essere scelta una formulazione od un valore di riferimento del parametro E per la valutazione del termine di resistenza turbolenta. I dati di input sono completati dai livelli e dalle portate assegnate lungo la frontiera del modello. I risultati del modello rappresentano la situazione idrodinamica ricostruita per effetto delle forzanti idrodinamiche considerate. Essenzialmente possono essere rappresentati i campi delle altezze d'acqua, di concentrazione del flusso ed il campo vettoriale di velocità.

Limiti di rappresentatività del modello

Il sistema di equazioni di de St.Venant è bidimensionale, cioè simula il comportamento di un corpo idrico nello spazio piano, relativamente agli assi cartesiani x e y , facendo riferimento allo schema di flusso di un fluido verticalmente omogeneo. Il codice non è quindi in grado di rappresentare la stratificazione verticale del fluido che è considerato omogeneo, cioè dotato di un unico valore rappresentativo di densità, né di rappresentare l'effettiva distribuzione della velocità lungo la verticale. Nella realtà i fenomeni quanti-qualitativi che si esplicano nella Sacca di Goro risentono in modo più o meno marcato anche della presenza di stratificazioni verticali dovute alla diversa densità delle acque dolci e di acque salate marine che vengono a contatto all'interno della laguna. Essendo comunque i battenti idrici limitati (al massimo 3÷4 m nei punti più profondi dei canali, ma mediamente di circa 1 m per gran parte dell'area interessata) il problema idrodinamico può essere iscritto a quello delle "acque basse" in cui prevale l'effetto dei termini bidimensionali del moto rispetto a quello della stratificazione verticale. Sulla base di tali considerazioni si può ritenere, almeno in prima approssimazione, accettabile e significativo l'approccio seguito.

Campagne di monitoraggio

I dati per la taratura e la verifica del modello idrodinamico e, più in generale, per la comprensione delle caratteristiche del moto mareale all'esterno ed all'interno della Sacca di Goro sono stati raccolti nel corso di una serie di campagne di misura realizzate in parte dalla Regione Emilia-Romagna, nell'ambito del controllo del funzionamento del Taglio Anconon, ed in parte realizzate ad hoc nell'ambito dello studio (Regione Emilia Romagna, 1999).

Prima di progettare e realizzare le campagne di misura per la raccolta dei dati necessari allo studio, ci si è occupati di rintracciare, organizzare e valutare le informazioni esistenti.

Per il controllo del funzionamento del "Taglio Anconon" la Regione Emilia-Romagna, Ufficio Provinciale Difesa del Suolo di Ferrara, aveva predisposto nel mese di Agosto 1998, una campagna correntometrica sul canale artificiale che ha reciso lo scanno, misurando in continuo la velocità con un correntometro bidirezionale. I dati di velocità sono stati rapportati alla sezione del canale ottenendo i corrispondenti valori di portata entrante ed uscente attraverso il taglio. L'integrazione dei valori di portata ha fornito i volumi transitati lungo il canale che sono stati di circa 20 Mm³ in uscita dalla Sacca verso il mare e di circa 18 Mm³ in entrata dal mare alla Sacca, con un bilancio negativo di circa 2 Mm³ nei 15 giorni di misurazione ed una media di circa 130.000 m³ al giorno. I dati misurati hanno confortato la scelta progettuale dell'intervento prima descritto a mezzo della realizzazione del canale e della paratoia a ventola: il "Taglio Anconon", realizzato in una posizione prossima a quella prevista nel progetto e quindi con paragonabili ritardi di marea, sebbene non regolato, aveva infatti mostrato una buona efficacia.

Nel periodo estivo di misura tutte le opere di regolazione dell'area di fitodepurazione erano aperte (per migliorare lo scambio con il Po e quindi la movimentazione delle acque) e non sono quindi stati eseguiti rilievi mareografici, che sono però stati realizzati in tre situazioni differenti appena chiuse

le strutture. Le osservazioni di livello sono state eseguite su un arco di 24 ore, a cadenza oraria, con rilievi a vista sui due lati della chiavica 3 luci che collega la Sacca alla foce del Po di Goro, nei giorni 22 settembre 1998 (con l' "Anconon" ancora aperto), 22 ottobre 1998 (appena chiuso l' "Anconon") e 22 novembre 1998 (con "Anconon" chiuso da tempo). I dati rilevati mostrano con sufficiente evidenza un ritardo di marea di circa 1 ora tra esterno ed interno, il mantenimento pressoché inalterato delle armoniche d'onda e gli stessi valori di massimo e minimo.

Per quanto siano poi state realizzate nella primavera del 1999 altre campagne di misura diretta, le osservazioni effettuate nell'autunno del 1998 hanno avuto l'importante peculiarità di essere state eseguite senza alcuna interferenza tra interno ed esterno (se non il taglio dell' "Anconon" per le misure eseguite nel mese di settembre), cioè senza alterazioni di flusso legate alla connessione tra Sacca e Po di Goro attraverso l'area di fitodepurazione. Per questo motivo tali dati sono risultati basilari per la taratura del modello di simulazione.

Costruzione della batimetria del modello

La costruzione della batimetria su una maglia quadrata atta ad essere utilizzata dal modello numerico è stata basata sul rilievo ad hoc effettuato nel mese di aprile 1999. Sono stati rilevati circa 90.000 punti disposti su linee di navigazione che percorrono la Sacca in direzione nord-sud, ad una distanza relativa di circa 150 m l'una dall'altra. Un tale rilievo è genericamente adatto per la ricostruzione batimetrica di zone che non presentino forti variazioni di profondità. In presenza di canali, come nel caso in esame, la metodologia di esecuzione del rilievo comporta ovvi problemi nell'interpolazione dei dati misurati. Gli usuali interpolatori matematici calcolano infatti la profondità in un punto di griglia come media, opportunamente pesata, dei punti rilevati che si trovano all'interno di un raggio definito. Un punto di griglia che si trova in corrispondenza di un canale, ma è distante dai punti rilevati, risente fortemente anche dei punti a basso fondale. Interpolando quindi i soli punti rilevati si ottiene una rappresentazione geometrica della zona oggetto di studio poco reale, in quanto le discontinuità sono tendenzialmente "smussate".

Per ovviare a questo problema, utilizzando un apposito programma realizzato ad hoc, sono state ricostruite le sezioni verticali determinate da ogni linea di rilievo. Tali sezioni sono state quindi sovrapposte, in ambiente CAD, ai punti planimetrici del rilievo ottenendo così una rappresentazione complessiva quasi-tridimensionale della batimetria dei fondali. Su tale base informativa è stato possibile individuare la posizione dei canali e quindi aumentare il numero di punti rappresentativi del fondale, lungo il loro sviluppo, mediante interpolazione lineare tra due sezioni successive. In tal modo è stato incrementato il numero originario di punti rilevati costituendo un campione di dati significativo per la successiva interpolazione.

Un ulteriore problema è stato determinato dal fatto che il recente rilievo non prevedeva l'individuazione delle zone emerse, ma si fermava alla batimetria -0.5 m. È stato quindi utilizzato un rilievo pregresso per la definizione delle zone emergenti, al perimetro delle quali è stata assegnata una quota rappresentativa di -0.2 m. Alle zone rimaste scoperte dal rilievo e dalla ricostruzione delle terre emerse è stata assegnata una profondità indicativa di -0.4 m.

Il passo successivo nella costruzione della batimetria è stato la scelta del passo spaziale della griglia a maglia quadrata necessaria al codice idrodinamico. Solitamente la scelta deriva da un compromesso tra il dettaglio richiesto ai risultati e i tempi di calcolo. Infatti più piccolo è il passo di griglia maggiore è l'accuratezza della soluzione, ma maggiore è il tempo di calcolo, che cresce con potenza di 3 rispetto al passo di griglia. Nel caso in esame, viste le dimensioni del dominio di calcolo e soprattutto quelle dei canali, che sono gli elementi più piccoli da rappresentare, è stata adottata una griglia con passo 20 m. La batimetria ottenuta (Figura 4) ha una maglia di dimensione di circa 11.7 km in direzione Est-Ovest e di circa 6.2 km in direzione Nord-Sud, per un totale di oltre 180.000 punti di cui circa 110.000 di calcolo.

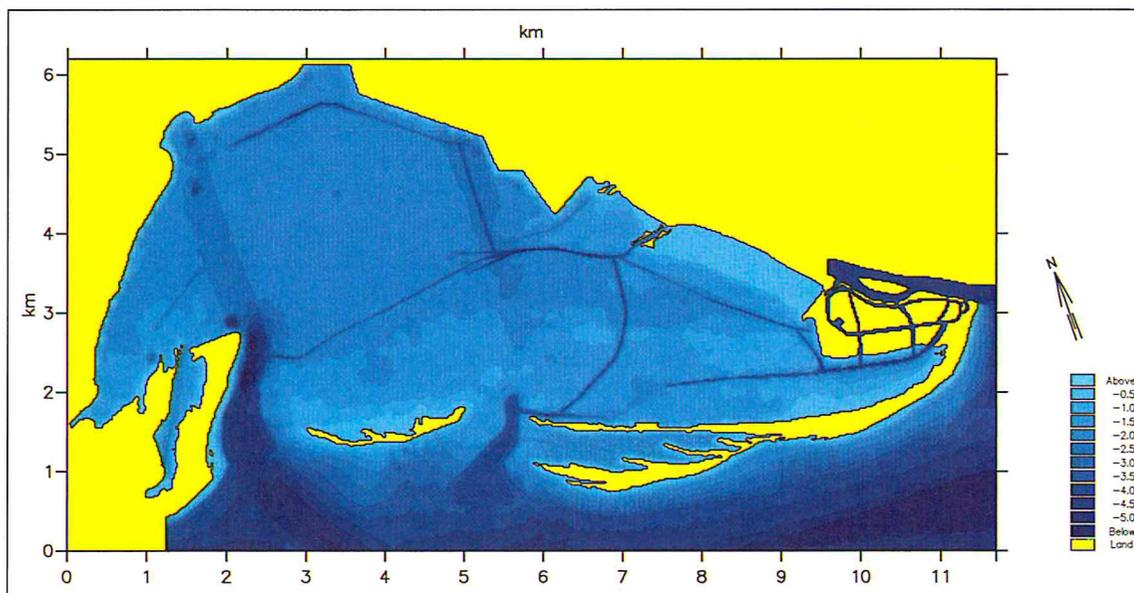


Figura 4 - Batimetria del modello di simulazione ricostruita sulla base dei punti di rilievo tenendo conto della presenza dei canali di marea esistenti e in fase di costruzione.

Parametri idrodinamici

Nel caso del modello idrodinamico il più importante parametro da assegnare è la scabrezza del fondo, che descrive le perdite di energia per attrito. In realtà con il valore di tale coefficiente, di difficile misurazione e quindi normalmente utilizzato come parametro di taratura, si usano rappresentare tutte le perdite di carico distribuite, anche se di altra natura rispetto all'attrito sul fondo.

Da simulazioni preventive effettuate su una batimetria approssimata e con onda di marea sinusoidale, è stato rilevato come il sistema sia praticamente insensibile a differenziazioni di scabrezza tra canali e zone a basso fondale. Molto probabilmente esistono in realtà differenze di scabrezza tra diverse aree, legate anche alla diversa densità degli allevamenti di mitili, come pure variazioni di tipo stagionale: i dati a disposizione per la taratura non sono stati però sufficienti per valutare differenze di questo tipo. Nelle simulazioni effettuate è stato considerato, infine, un valore di scabrezza pari a $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ secondo la formulazione di Strickler.

Un altro parametro assegnato al modello è l' "eddy viscosity" che regola la "macro turbolenza" del sistema e definisce quindi l'entità delle perdite di carico legate alla formazione di vortici. Nel caso in esame, considerata la dimensione della griglia di calcolo ed il tipo di circolazione idrodinamica da simulare, la "viscosità" dovuta alla formazione di vortici non risulta importante, per cui è stato adottato un valore di $1 \text{ m}^2/\text{s}$ che l'esperienza ha dimostrato idoneo a prevenire l'insorgere di instabilità lungo le frontiere del modello dove vengono imposte le condizioni al contorno.

Condizioni al contorno

Mediante la definizione delle condizioni al contorno si impongono anche le forzanti al sistema. Nel caso in esame le frontiere aperte del modello sono il lato Est e il lato Sud (cfr. Figura 4), dove devono essere definiti i livelli determinati dall'evoluzione della marea nell'alto Adriatico. L'andamento spazio-temporale di tali livelli, compresa la sfasatura lungo lo scanno, costituisce la forzante principale del moto all'interno della Sacca. La definizione dei livelli dovuti all'onda di marea è piuttosto complessa. Infatti, mentre è ragionevole considerare lo stesso livello lungo tutta la frontiera Est, ciò non appare lecito lungo la frontiera Sud. L'onda di marea si presenta infatti all'estremo Ovest del contorno (presso la foce del Po di Volano) con un certo ritardo rispetto all'estremo Est (presso la foce del Po di Goro). Il ritardo, come è stato definito in precedenza, dipende dalla combinazione

degli sfasamenti delle armoniche che costituiscono l'onda di marea. Oltre all'effetto del ritardo bisogna anche tenere presente che, nella realtà, anche la forma dell'onda tra i due estremi della frontiera risulta modificata.

Per una corretta interpretazione del fenomeno sarebbero necessari rilievi mareografici di almeno un anno da effettuarsi in almeno due punti esterni alla Sacca, in modo tale da individuare le armoniche principali e i loro sfasamenti. Non essendo possibile una simile analisi, vista la mancata disponibilità dei dati necessari, si è optato per una traslazione rigida dell'onda di marea da Est a Ovest assegnando un ritardo basato sull'analisi dei dati registrati e perfezionato mediante la taratura del modello. I valori di oscillazione dei livelli nei punti di calcolo che costituiscono la frontiera Sud del modello sono stati determinati mediante interpolazione lineare.

Taratura e verifica del modello di simulazione

Taratura del modello

Per la taratura del modello è stato utilizzato il rilievo mareografico del Novembre 1998. La scelta di tale evento è stata dettata dal fatto che in quel periodo erano chiuse tutte le chiaviche della zona di fitodepurazione, come pure il taglio dell'Anconon. Il sistema risulta quindi regolato solamente dall'onda di marea esterna non essendovi alcuna connessione tra interno ed esterno della Sacca nella zona di interesse.

La batimetria utilizzata per la taratura è stata ottenuta dal rilievo, escludendo però i canali scavati successivamente al mese di Novembre 1998, in modo da ottenere la massima rappresentatività rispetto alle condizioni di simulazione.

Come condizione al contorno per il lato Est è stata utilizzata la marea rilevata alla chiavica "tre luci", sul lato esterno, cioè verso il Po (cfr. Figura 2). Dai risultati di alcune simulazioni preliminari è stato infatti verificato che il ritardo di marea tra la frontiera Est del modello e la chiavica "tre luci" è praticamente trascurabile.

Come parametro di taratura è stato utilizzato il ritardo di marea tra Est e Ovest lungo la frontiera meridionale del modello, considerando la scabrezza costante e pari a $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Sono state effettuate 3 simulazioni con ritardi di 20, 40 e 60 minuti. I corrispondenti livelli ottenuti presso la chiavica tre luci, sul lato interno, cioè verso la Sacca, sono stati confrontati con quelli misurati. Dall'analisi effettuata è risultato evidente, come ci si attendeva, che il ritardo di marea non è una costante ma varia durante le fasi di marea. La taratura sull'evento del Novembre 1998, pur mettendo in luce le limitazioni che una traslazione rigida dell'onda di marea causa, ha comunque consentito di individuare l'intervallo di variazione tipico del ritardo di marea lungo la frontiera Sud del modello, da Est a Ovest, che è risultato pari a 40-60 minuti.

Per confermare tale indicazione sono state effettuate delle verifiche sugli altri eventi misurati.

Verifica sull'evento del Settembre 1998

Durante l'evento del Settembre 1998 risultava aperto il "Taglio dell'Anconon" con uno scambio di volumi d'acqua tra mare e Sacca in grado di influenzare i livelli nel punto interno di misura. Nella batimetria utilizzata per la verifica del modello è stato quindi inserito il suddetto taglio, ottenendo come risultato delle simulazioni anche l'entità dei deflussi attraverso il canale di collegamento tra Sacca e mare. La soluzione ottimale, in questo caso, è stata trovata assumendo un ritardo di marea di 1 ora (Figura 5). Il risultato appare molto buono soprattutto per l'onda di marea centrale, mentre nella prima fase discendente e nell'ultima crescente l'onda calcolata è mediamente in anticipo di 10 minuti rispetto a quella rilevata.

Durante la fase discendente della marea esterna i livelli in Sacca sono generalmente superiori a quelli in mare per cui il volume scambiato è in uscita dalla Sacca, in fase crescente invece è in entrata. Sfortunatamente non sono disponibili valori di volumi scambiati durante l'evento, in quanto le misure correntometriche sull'Anconon sono state effettuate solo per il periodo dal 7 al 24 Agosto 1998. Si è notato, in ogni caso, che i volumi misurati durante la campagna di rilevamento sono del-

lo stesso ordine di grandezza di quelli calcolati dal modello ($6 \div 700.000 \text{ m}^3$ per ogni semiciclo di marea) a conferma della rappresentatività anche quantitativa del modello.

Si può quindi concludere che, anche nel caso analizzato (che risulta più complesso di quello utilizzato per la taratura a causa della presenza del taglio), il modello fornisce risultati corretti, nel limite delle approssimazioni e delle schematizzazioni adottate.

Verifica sull'evento di Ottobre 1998

Durante l'evento di Ottobre 1998 il taglio dell'Anconon era appena stato chiuso, per cui la situazione che si presentava era del tutto simile a quella dell'evento di Novembre. E' stata quindi utilizzata la stessa batimetria adottata per la taratura. I risultati migliori sono stati ottenuti con un ritardo di 40 minuti e sono riportati nella figura seguente.

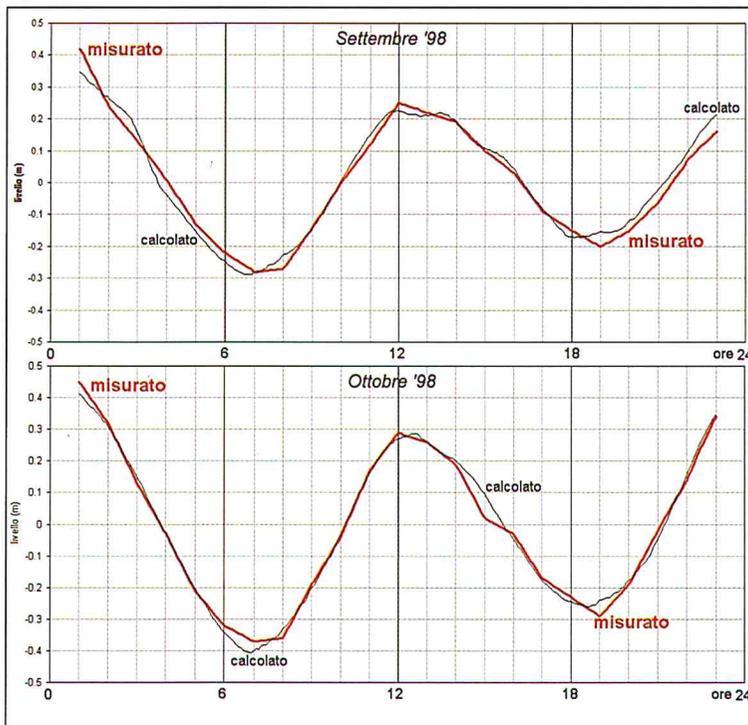


Figura 5 - Confronto tra il livello misurato e quello calcolato in corrispondenza della chiavica tre luci, lato interno, per l'evento di Settembre 1998 (ritardo di marea 1 ora) e per l'evento di Ottobre 1998 (ritardo di marea 40 minuti).

Il risultato è, in generale, soddisfacente. Le uniche discrepanze significative si hanno sui cavi e sono probabilmente legate ai problemi di inerzia del sistema di fitodepurazione non adeguatamente descritti dal modello a causa dei problemi legati alla rappresentazione della batimetria delle zone a basso fondale menzionati in precedenza. Una così buona approssimazione nella ricostruzione dell'onda misurata è probabilmente legata al fatto che per le particolari armoniche che costituiscono l'onda di marea del periodo esaminato, il ritardo di traslazione lungo lo scanno è rimasto pressoché costante, avvicinandosi all'ipotesi adottata per la costruzione della condizione al contorno.

Verifica sull'evento di Maggio 1999

L'ultimo evento utilizzato per la verifica è quello di Maggio 1999. Le misure sono state effettuate subito dopo il rilievo batimetrico, per cui è stata utilizzata la geometria dei fondali ricostruita sulla base del rilievo, in cui sono evidenti i canali mareali in corso di realizzazione (Figura 4).

Nel periodo di simulazione le chiaviche della zona di fitodepurazione erano tutte aperte. Il sistema idraulico risulta quindi più complesso dei precedenti, soprattutto per il fatto che i punti di misura sono fortemente influenzati dallo scambio d'acqua attraverso le chiaviche.

È stato considerato un ritardo di marea di 40 minuti. I risultati sono riportati nella figura seguente. Anche in questo caso, pur con la complessità del sistema idraulico legata all'apertura delle chiaviche, i risultati appaiono positivi.

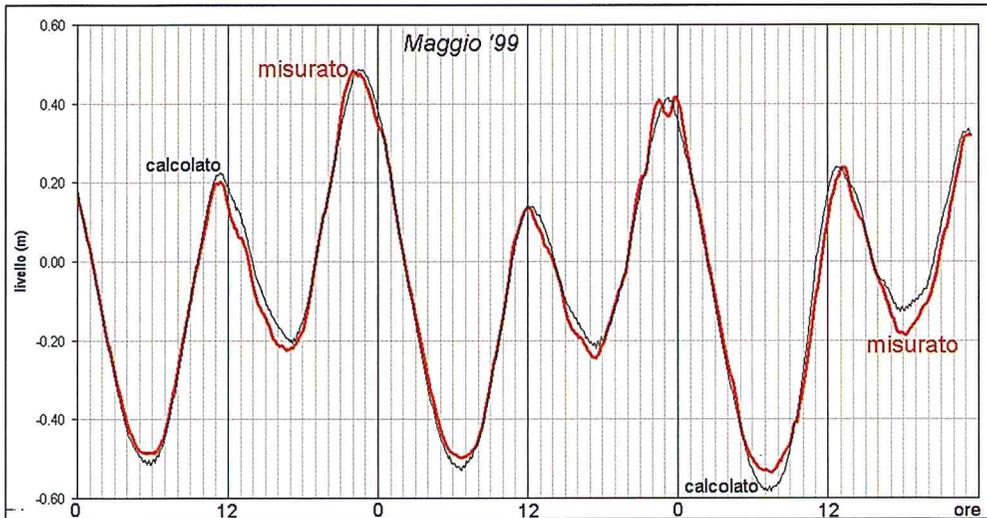


Figura 6 - Confronto tra il livello misurato e quello calcolato in corrispondenza della chiavica tre luci, lato interno, per l'evento di Maggio 1999. Ritardo di marea 40 minuti.

Conclusioni sulla fase di verifica del modello

L'insieme delle situazioni di verifica mette in luce come il modello sia in grado di descrivere in modo adeguato l'idrodinamica della Sacca di Goro pur con le incertezze legate all'imposizione delle condizioni al contorno. Si intende sottolineare che le fasi di taratura e verifica, ed anche la successiva fase di analisi di sensitività dei parametri, sono state condotte su misure di riferimento effettuate nella zona di interesse per la localizzazione dello sbocco del nuovo canale mareale in corso di costruzione. E' quindi da presumere che l'affidabilità del modello risulti buona per la simulazione delle fenomenologie che avvengono nella zona Est della Sacca, cioè verso la Sacca di Gorino, come confermato dai risultati della fase di verifica appena discussi, mentre manca un riscontro significativo per l'insieme delle condizioni idrodinamiche che si verificano nella zona Ovest della Sacca.

Analisi di sensitività dei parametri

Nella taratura del modello e nelle successive verifiche è stato utilizzato come unico parametro il ritardo di marea, considerandolo preponderante rispetto agli altri e, purtroppo, non determinabile per altra via che la taratura stessa. Per valutare l'importanza degli altri fattori è stata effettuata un'analisi di sensitività sui parametri giudicati più importanti. Come evento di riferimento è stato scelto quello di Ottobre 1998, in quanto ha fornito il risultato più prossimo ai valori misurati.

Scabrezza

Come è stato sopra accennato alcune valutazioni preliminari hanno suggerito di trascurare una differenziazione di scabrezza tra canali e zone a basso fondale. Il valore utilizzato, $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ (Strickler) è un valore tipico per ambienti analoghi a quello esaminato. La sensitività del modello rispetto alla scabrezza è stata quindi testata relativamente ad altri 2 valori di scabrezza pari rispettivamente a 30 e $50 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Il variare della scabrezza da 40 a $50 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ porta delle modestissime variazioni, mentre la riduzione a $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ comporta degli sfasamenti che possono arrivare fino a 20 minuti, quindi dell'ordine di grandezza delle variazioni imposte per i ritardi delle condizioni al contorno. Di conseguenza si può concludere che sicuramente questo sarebbe il parametro fondamentale di taratura se

si avessero maggiori informazioni sulle condizioni al contorno.

Livello medio del mare

Un'onda elementare si propaga con velocità pari a \sqrt{gh} , quindi il tirante d'acqua (h) è fondamentale per la propagazione della marea. Le variazioni del livello marino oltre che dall'escursione di marea astronomica sono influenzate anche da fattori meteorologici (fenomeni di "acqua alta") per cui la stessa oscillazione di marea si può presentare con livelli medi diversi. La sensitività del modello a questo parametro è stata analizzata perché negli eventi di Settembre, Ottobre e Novembre 1998 il rilievo è stato effettuato rispetto una quota relativa, senza nessun riferimento al medio mare. I valori sono stati quindi riportati ad un medio mare fittizio, per cui è risultato utile indagare l'influenza sui risultati di un diverso livello del medio mare. Sono stati analizzati due casi: un sovrizzo di 20 cm e uno di 50 cm. In valore assoluto i livelli sono ovviamente influenzati dal medio mare, ma per la finalità dell'applicazione del modello è opportuno fare riferimento alla variazione dello sfasamento di marea. Gli anticipi dovuti al maggior tirante d'acqua raggiungono al massimo i 5 minuti per il sovrizzo di 50 cm: si è quindi concluso che il livello medio mare non appare importante per i fini preposti alla modellazione.

Vento

Il vento influenza i livelli all'interno della Sacca, come pure, in parte, la circolazione idrodinamica. In questo caso per vento si intende quello locale, mentre le condizioni di circolazione atmosferica e variazione barometrica a grande scala che generano i noti fenomeni di "acqua alta" nel Nord Adriatico sono già stati inclusi nell'analisi dell'influenza di diverse quote del medio mare. È stato analizzato, a titolo esemplificativo, l'effetto del vento che spirava da Ovest e quindi tende ad innalzare i livelli presso il punto di misura interno. Sono state considerate 2 velocità pari rispettivamente a 5 e 10 m/s. Dai risultati si è osservato che il vento, oltre ad innalzare i livelli, ritarda anche leggermente l'onda, fornendo un duplice effetto positivo (sullo sfasamento oltre che sul tirante) per il deflusso dalla Sacca verso l'esterno attraverso la paratoia a ventola.

Applicazione del modello idrodinamico nella verifica del progetto per la movimentazione naturale delle acque all'interno della Sacca

Predisposizione del modello per le verifiche idrauliche

La geometria del modello è stata modificata inserendo nella batimetria di rilievo i nuovi canali in progetto. Particolare cura è stata necessaria per la rappresentazione della paratoia a ventola e del suo funzionamento. Nel codice di calcolo utilizzato, MIKE 21, allo stato attuale non esiste ancora la possibilità di rappresentare in modo diretto il funzionamento di una struttura mobile, anche se tale opzione modellistica è in fase di definizione e sviluppo. Utilizzando l'esperienza già maturata in altre applicazioni simili, il funzionamento della paratoia a ventola unidirezionale è stato però correttamente rappresentato ricorrendo alla seguente schematizzazione di calcolo.

Sono state realizzate due versioni della medesima batimetria del modello che differiscono solamente per avere il canale di collegamento tra la laguna ed il mare rispettivamente chiuso o aperto.

Utilizzando la condizione di canale totalmente aperto è stata effettuata una prima simulazione di calcolo valutando gli istanti in cui, nell'ipotetica totale apertura del canale, si presenta l'inversione tra flusso entrante e flusso uscente. Si è quindi proceduto all'esecuzione di simulazioni successive, collegate a mezzo di "hotstart" di calcolo, utilizzando la batimetria con il canale aperto nelle condizioni di flusso uscente e quella con canale chiuso nei periodi che corrispondevano a flusso entrante. Gli "hotstart" di calcolo consistono nel considerare, come condizione iniziale di avviamento del modello la situazione finale calcolata dalla simulazione precedente.

Per effettuare, infine, una simulazione completa e continua del funzionamento del sistema è stato adottato il seguente procedimento: sono state calcolate le portate che fuoriescono dal canale nel corso delle simulazioni alternate; nella batimetria con il canale chiuso sono state inserite delle con-

dizioni "interne" ai due lati della chiusura, corrispondenti rispettivamente a punti "pozzo" nel lato interno e a punti "sorgente" nel lato esterno; alle condizioni interne è stato assegnato l'andamento temporale del flusso calcolato nel corso delle simulazioni alternate effettuate in precedenza e così è stato possibile simulare in continuo il flusso nullo in entrata e la reale portata in uscita.

Condizioni di marea utilizzate nelle verifiche

La verifica del funzionamento del sistema è stata eseguita in relazione a tre forme dell'onda di marea caratteristiche dell'alto Adriatico, in particolare facendo riferimento alle oscillazioni e alle relative armoniche registrate alla stazione di Porto Corsini a Ravenna.

Uno studio effettuato per una tesi di laurea (Bazzi, 1994) aveva considerato un periodo di registrazione di circa due anni e mezzo delle maree a Porto Corsini e, per mezzo di un'analisi statistica di frequenza, aveva individuato le tre forme d'onda che si presentano nel maggior numero di giorni all'anno. Le tre onde sono rispettivamente una tipica onda di marea mista diurna/semidiurna (marea 1) che si riscontra nel 23% circa dei casi, un'onda di marea tipicamente semidiurna (marea 2) nel 19% circa dei casi ed un'onda di marea diurna (marea 3) nel 22% circa dei casi (Figura 7). Utilizzando le costanti armoniche pubblicate nelle tavole di marea per la stazione di Porto Corsini ed i periodi di riferimento indicati nella bibliografia citata, per ognuna delle tre onde tipiche, sono state ricostruite con il modulo Tidal Analysis del codice MIKE 21 (Danish Hydraulic Institute, 1993) le oscillazioni temporali relative alle tre forme d'onda.

Le onde così costruite sono state assegnate alla frontiera Est del modello, mentre sulla frontiera Sud è stato calcolato l'andamento del livello marino considerando istante per istante una variazione lineare del livello lungo la frontiera e un ritardo fisso di marea tra la foce del Po di Goro e la foce del Po di Volano, pari a 40 minuti, con le approssimazioni più volte richiamate nel corso delle analisi effettuate per la costruzione, taratura e verifica del modello.

Oltre alle tre onde così definite è stata utilizzata anche la forma d'onda adottata nel corso della progettazione dell'intervento per la verifica del funzionamento dello stesso (marea 4, Lamberti, 1998).

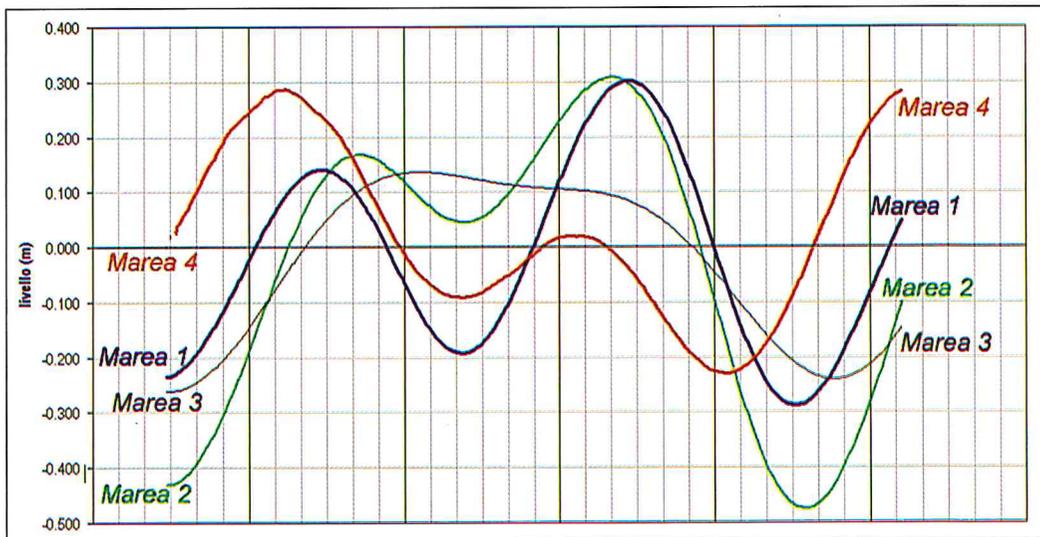


Figura 7 - Onde di marea tipiche utilizzate per le simulazioni idrodinamiche. Marea 1: mista diurna/semidiurna. Marea 2: semidiurna. Marea 3: diurna. Marea 4: onda mista utilizzata nella progettazione dell'intervento.

In tal modo è stato possibile effettuare una verifica del progetto in riferimento alle medesime con-

dizioni forzanti assunte nel calcolo idraulico.

Risultati

Considerazioni sulla movimentazione delle acque

Per valutare la circolazione idrodinamica all'interno della Sacca è stato analizzato il campo vettoriale del flusso (cioè della portata per unità di larghezza $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$). Le Figure 8 e 9 si riferiscono alla Marea 1. La dinamica, qualitativamente, non varia significativamente per le diverse onde di marea esaminate. Il volume di marea entra attraverso le due bocche e si espande all'interno della Sacca, cosicché le portate unitarie diminuiscono man mano che ci si allontana dalle bocche.

Le zone di sofferenza si individuano, di conseguenza, nelle parti più distanti dalle bocche. I canali convogliano portate unitarie superiori a quelle delle zone a basso fondale, influenzando anche le zone limitrofe. Durante la fase discendente risulta evidente la portata scaricata verso l'esterno dalla paratoia a ventola, che in questa fase è aperta.

Per evidenziare in modo migliore la dinamica interna della Sacca in presenza della paratoia a ventola sono stati seguiti i percorsi di sei flottanti, per un periodo di cinque giorni, ottenuti replicando la Marea 1 (Fig. 10).

Si osserva che la paratoia a ventola funziona come sistema di risucchio per la parte Est della Sacca; si evidenzia infatti che nessuno dei flottanti esce dalla bocca secondaria, in quanto gli stessi vengono progressivamente spinti verso la struttura.

Solo il flottante che parte nei pressi di Gorino (coordinate E, N 6.8km, 4.5km in Figura 10) non risente di questo richiamo e oscilla sempre nella stessa zona.

Portate e volumi scaricati dalla paratoia a ventola

Il dato di verifica più importante ottenuto con le simulazioni è la portata che attraversa la paratoia a ventola. È tale deflusso, infatti, che aumenta la circolazione ed il ricambio d'acqua nella zona orientale della Sacca. Le portate che attraversano la paratoia sono state calcolate per tutte e tre le maree caratteristiche e per quella di progetto.

Come è stato sopra osservato la paratoia risulta aperta durante le fasi di marea esterna decrescente. In riferimento alla Marea 1 la portata massima defluente è di circa $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Nella prima fase discendente il volume scaricato è di 215.000 m^3 , nella seconda, più pronunciata, il volume è di 935.600 m^3 , per un totale di $1.150.600 \text{ m}^3$ scaricati al giorno. La paratoia risulta aperta per 11 ore e 20 minuti nelle 24 ore considerate.

La Marea 2 presenta delle oscillazioni tipicamente semidiurne; l'escursione tra massimo e minimo è di circa 60 cm, inferiore alla precedente. Il volume giornaliero scaricato è in questo caso pari a $1.231.700 \text{ m}^3$, leggermente superiore al caso precedente, come di poco superiore è anche il tempo di apertura della paratoia: 11 ore e 40 minuti.

La Marea 3, a differenza delle precedenti, presenta un solo periodo di apertura della paratoia durante il giorno, essendo la forma dell'onda prettamente diurna. Per questa forma di marea la paratoia rimane aperta per 15 ore e 40 minuti per un volume scaricato pari a 657.300 m^3 , con una portata massima di circa $25 \text{ m}^3/\text{s}$. La particolare forma dell'onda, con un'escursione inferiore ai 30 cm, riduce notevolmente il volume rispetto ai due casi precedenti nonostante l'aumento del tempo di apertura della paratoia.

Nei tre casi analizzati, che rappresentano le maree che più frequentemente si presentano, si osserva una variazione dei volumi giornalieri scaricati da circa 700.000 m^3 a circa $1.200.000 \text{ m}^3$. Se si considera una profondità media di 1 m per la parte orientale della Sacca, tali volumi corrispondono a delle superfici variabili da 70 ha a 120 ha nelle quali si attua un ricambio idrico completo in un giorno. Oltre alle tre onde tipiche, la valutazione dei volumi scaricati attraverso la paratoia è stata effettuata anche per l'onda di marea utilizzata per la redazione del progetto. In questo caso il volume scaricato verso l'esterno è pari a $1.021.400 \text{ m}^3$ in buon accordo con il valore di 911.000 m^3 assunto nel progetto.

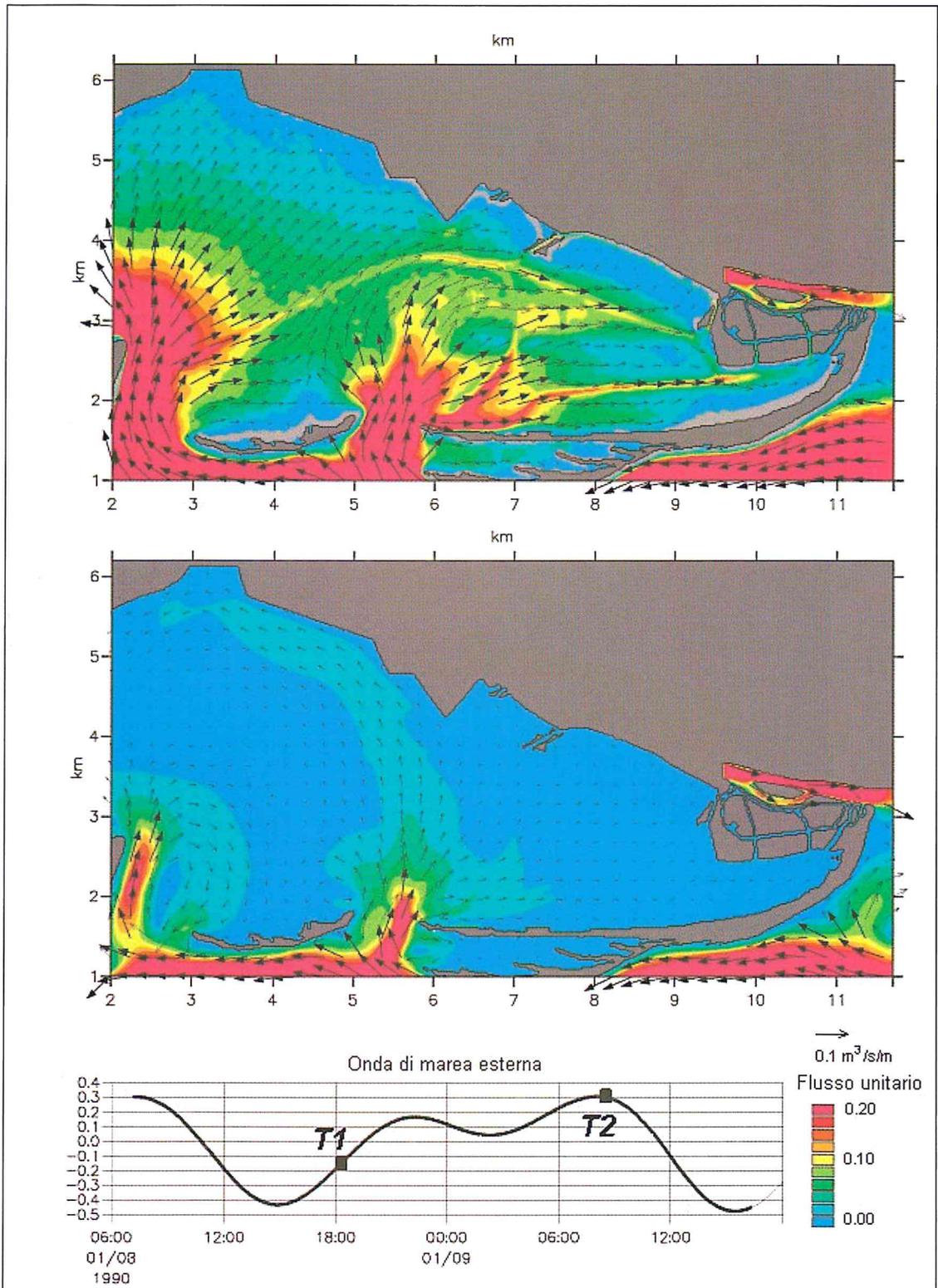


Figura 8 - Rappresentazione del campo di moto all'interno della Sacca di Goro in fase di marea crescente (T1) ed in fase di colmo di marea (T2). Si noti in T1 l'effetto del canale che convoglia le acque dalla bocca secondaria verso la zona interna della Sacca prossima alla foce del Po di Goro.

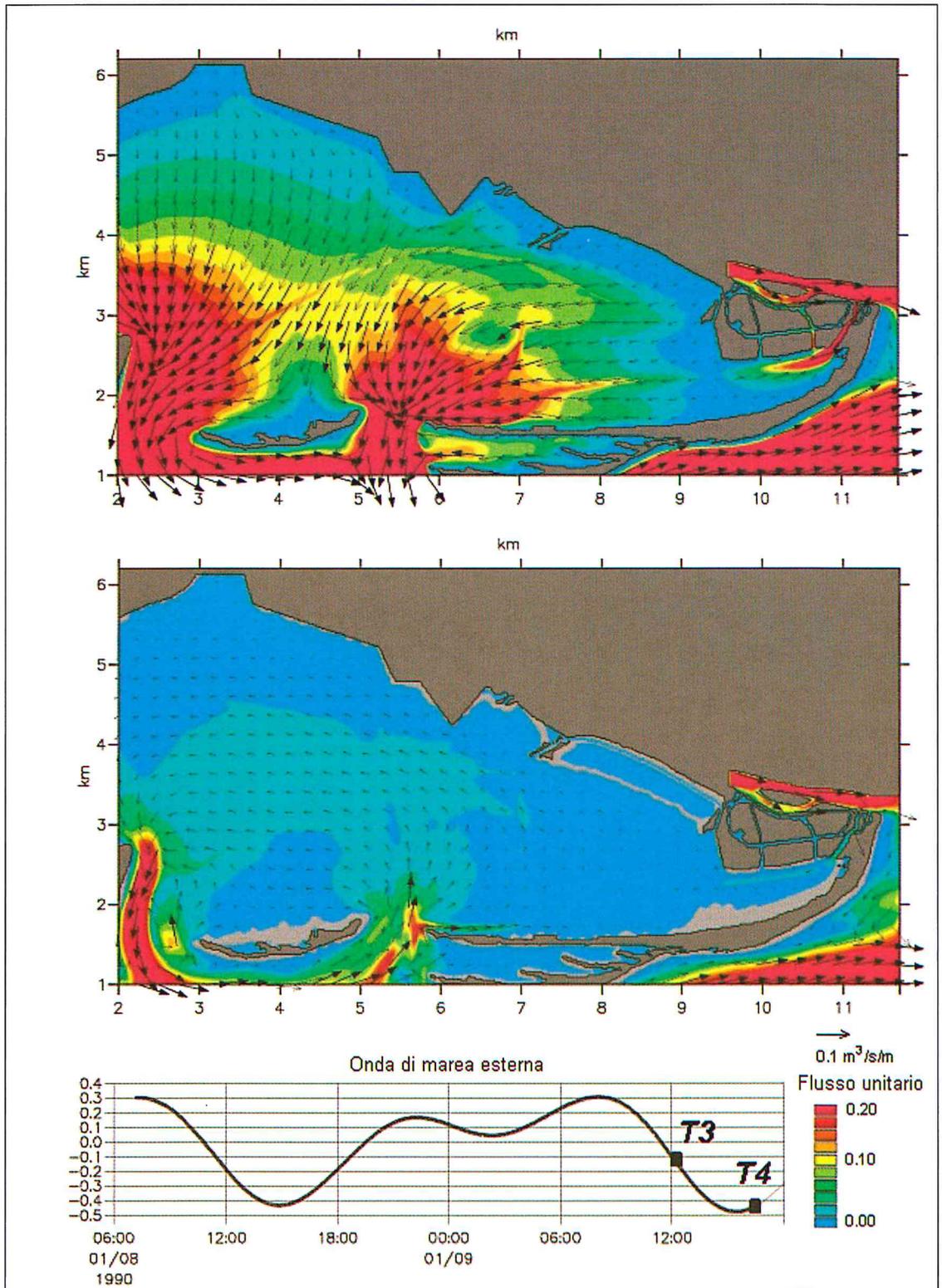


Figura 9 - Rappresentazione del campo di moto all'interno della Sacca di Goro in fase di marea calante (T3) ed in fase di cavo di marea (T4). In T3 la paratoia a ventola sul canale verso la Foce del Po di Goro è aperta e le acque interne della Sacca si scaricano verso l'esterno.

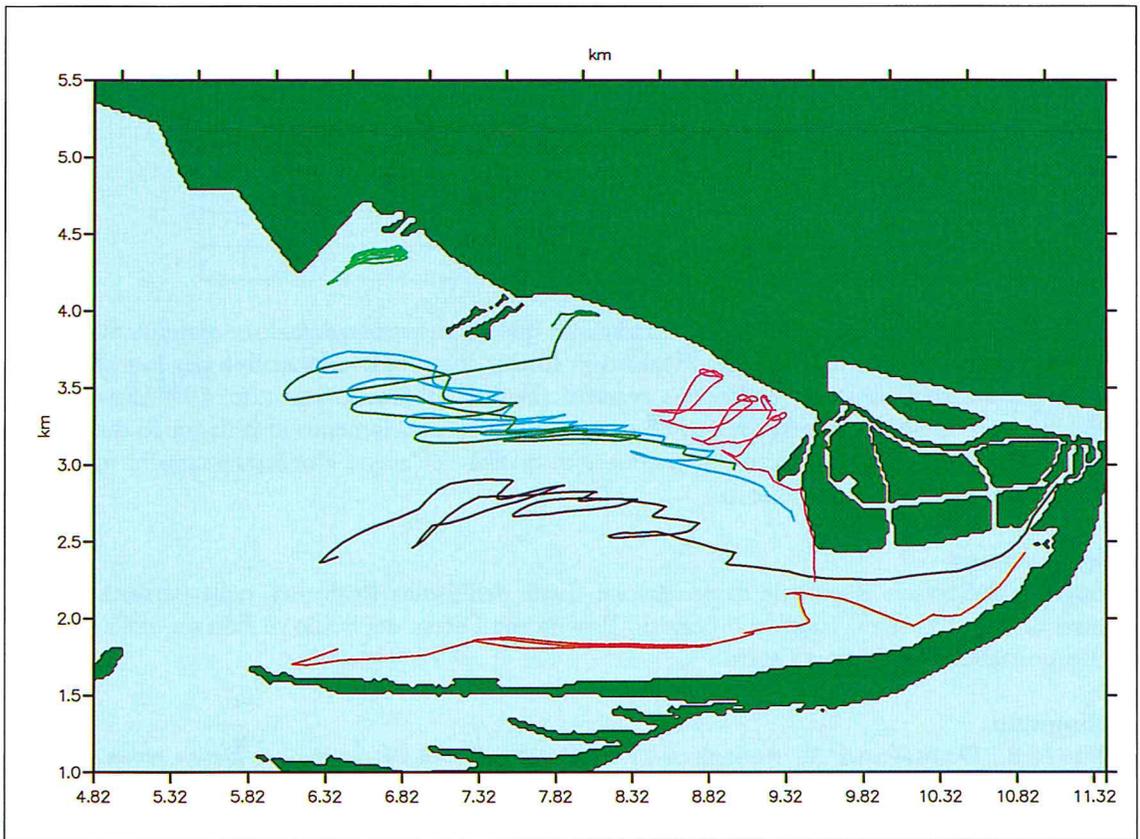


Figura 10 - Traiettorie di particelle flottanti nella Sacca per un periodo di 6 giorni con l'onda di marea 1.

Estensione dell'analisi di sensitività ai risultati dell'intervento

Per la taratura del modello è stato usato, come visto, il ritardo di marea tra Est e ovest, individuando un ritardo presumibile tra i 40 e i 60 minuti. Nelle valutazioni con le tre onde tipiche è stato utilizzato un ritardo di 40 minuti che è più cautelativo dal punto di vista dei volumi scaricati attraverso la struttura a ventola.

Per valutare qual è l'influenza di questo parametro sulle portate che vengono scaricate dalla Sacca verso l'esterno sono state effettuate le simulazioni per le tre onde tipiche di marea e per quella utilizzata nel progetto, anche per ritardi di 60 minuti. I volumi calcolati in questa situazione sono stati confrontati con quelli determinati per ritardo di 40 minuti, come rappresentato nella seguente tabella.

Come si vede solo per la Marea 3 la variazione è rilevante (24%). Per le altre maree l'incremento percentuale non è così accentuato e risulta contenuto all'interno del 16%. È quindi possibile che le portate che il sistema riesce a scaricare siano anche superiori, fino al 15-20% di quanto determinato in condizioni medie.

Conclusioni

Il modello matematico della Sacca di Goro ha consentito di verificare le ipotesi progettuali adottate per la realizzazione del nuovo sistema per la movimentazione naturale delle acque nella zona Est della Sacca. L'approccio bidimensionale, per quanto semplificato rispetto alla reale fenomenologia idrodinamica della Sacca che presenta flussi stratificati e miscelazione di acque dolci e salate, grazie ad una accurata operazione di taratura, è apparso idoneo alla rappresentazione degli effetti idraulici di più diretto interesse ingegneristico.

Tabella 1 - Confronto tra i volumi scaricati dalla struttura per ipotesi di ritardo dell'onda di marea rispettivamente di 40 e 60 minuti lungo la frontiera Sud del modello.

Marea	Volume scaricato m ³ (ritardo 40 min.)	Volume scaricato m ³ (ritardo 60 min.)	Var. %
1	1.150.600	1.324.100	15
2	1.231.700	1.425.000	16
3	657.300	817.100	24
4	1.021.400	1.170.700	15

Lo strumento di simulazione, del resto, fornisce un quadro di rappresentazione idrodinamico piuttosto dettagliato che potrebbe essere utilizzato in futuro come base conoscitiva per lo sviluppo di modelli più accurati basati su codici più avanzati (Danish Hydraulic Institute, 1998; Rasmussen, 1993), che consentano la simulazione tridimensionale del comportamento idrodinamico delle acque e l'analisi dei processi di trasporto-dispersione e di qualità dell'acqua che interessano in modo più diretto l'ecologia della Sacca di Goro.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Servizio Regionale di protezione Civile dell'Emilia Romagna, nella persona del Responsabile Ing. Demetrio Egidi, e il Servizio Provinciale Difesa del Suolo di Ferrara, nella persona del Responsabile Ing. Andrea Peretti.

Bibliografia

- Abbot M.B., Damsagaard A., Rodenhuis G.S. (1973) - *System 21, Jupiter, A Design system for Two-Dimensional Nearly-Horizontal Flows*. Journal of Hydraulic Research, 1, 1973.
- Abbott M.B. (1979) - *Computational Hydraulics - Elements of the Theory of Free Surface Flows*. Pitman, London.
- Bazzi A. (1994) - *Tesi di Laurea. Le Pialasse di Ravenna. Studio generale sul funzionamento idraulico e sulle condizioni ambientali del sistema*. Relatore Prof. Gianni Luigi Bragadin. Università di Bologna.
- Danish Hydraulic Institute (1993) - *MIKE 21. Coastal Hydraulics and Oceanography. Hydrodynamic Module. Release 2.7. User Guide and Reference Manual*. Edito da DHI, Hoersholm, Denmark.
- Danish Hydraulic Institute (1998) - *MIKE 3. Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography. Hydrodynamic Module. Release 2.7. User Guide and Reference Manual*. Edito da DHI, Hoersholm, Denmark.
- Lamberti P. (1998) - *Opere di somma urgenza per la movimentazione naturale delle acque all'interno della Sacca di Goro. Progetto Esecutivo. Relazione Idraulica*. Amministrazione Provinciale di Ferrara.
- Rasmussen E.B. (1993) - *Three Dimensional Hydrodynamic Models*. In Abbott, M.B. and Price, N.A. (eds), *Coastal Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*. Chapman and Hall, London.
- Regione Emilia Romagna (1999) - *Studio su modello matematico della circolazione idrica nella Sacca di Goro*. Servizio Provinciale Difesa del Suolo di Ferrara.
- Smagorinsky J. (1963) - *General Circulation Experiments with the Primitive Equations*. Monthly Weather Review, Vol. 91, pp.91-164.

Manoscritto ricevuto l'11/12/1999, accettato il 26/3/2000.