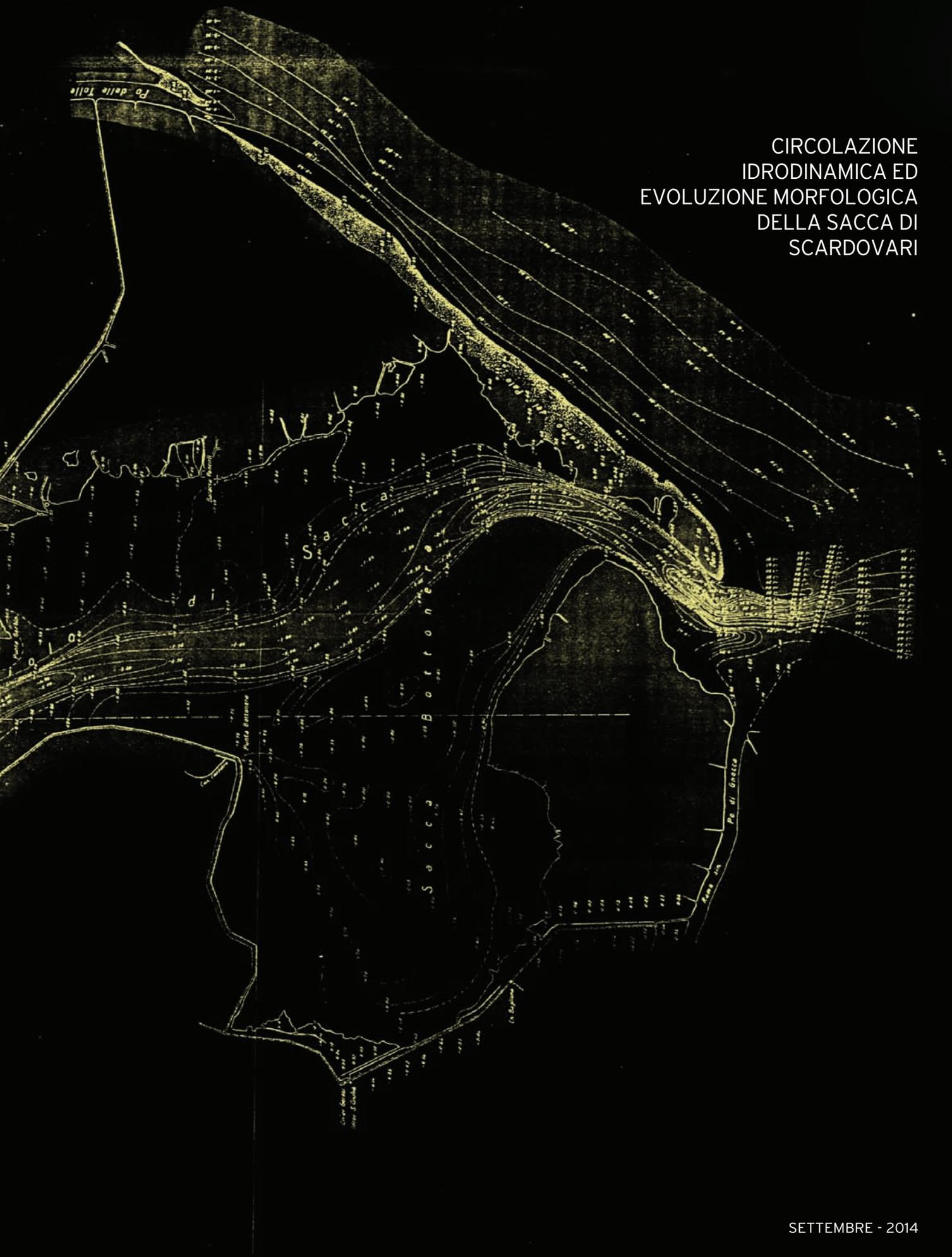


LE LAGUNE DEL DELTA DEL PO

A CURA DEL CONSORZIO DI BONIFICA DELTA DEL PO

CIRCOLAZIONE
IDRODINAMICA ED
EVOLUZIONE MORFOLOGICA
DELLA SACCA DI
SCARDOVARI



LE LAGUNE DEL DELTA DEL PO

A CURA DEL CONSORZIO DI BONIFICA DELTA DEL PO

2 PREFAZIONE

di Fabrizio Ferro

CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA ED EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA SACCA DI SCARDOVARI

di Luigi d'Alpaos

3 INTRODUZIONE

5 I METODI DI INDAGINE

6 CORRENTI DI MAREA

28 EFFETTI DI VARIAZIONI DELL' OFFICIOSITÀ DELLE FOCI DEI RAMI DEL PO

40 AZIONE DEL MOTO ONDOSI SOTTO COSTA

51 CIRCOLAZIONE DELLE CORRENTI IN PRESENZA DI STRATIFICAZIONE

75 ALCUNE CONSIDERAZIONI FINALI

80 BIBLIOGRAFIA

PREFAZIONE

FABRIZIO FERRO

Presidente del Consorzio di Bonifica
Delta del Po

Circa 30 anni fa il Consorzio di Bonifica Delta del Po fu incaricato dalla Regione del Veneto di elaborare e redigere una perizia studi per l'assetto idrico delle aree vallive e litoranee del Delta. A seguito dei risultati degli studi effettuati furono redatti importanti progetti di vivificazione che furono finanziati e realizzati nell'ambito dei P.I.M. (Programmi Integrati Mediterranei) ai sensi del Reg. CEE n° 2088/85 nelle lagune di Caleri, Vallona, Barbamarco e nella Sacca degli Scardovari. Successivamente furono realizzati interventi strutturali anche nella laguna di Basson e nella Sacca del Canarin. Come è noto con l'art. 29 della L.R. n° 7/99 il Consorzio fu incaricato della gestione delle lagune del Delta del Po.

Nelle precedenti pubblicazioni del Consorzio si è posta l'attenzione sulle problematiche affrontate, sugli studi eseguiti, sugli interventi realizzati per garantire la vivificazione delle lagune e, nel contempo, contribuire al mantenimento di un ambiente unico da un punto di vista naturalistico e fonte di reddito per gli abitanti del territorio. In questa pubblicazione il prof. Ing. Luigi D'Alpaos descrive gli ultimi studi effettuati sulla Sacca degli Scardovari partendo dalle problematiche relative alla circolazione idrodinamica, agli effetti causati dall'evoluzione morfologica della Sacca e alle condizioni al contorno che regolano la dinamica delle correnti lagunari. Uno studio tecnico di alto livello che fa il punto della situazione e fornisce elementi di analisi per i prossimi interventi.

Questa pubblicazione evidenzia ancora una volta come il Consorzio di Bonifica, grazie alle collaborazioni con le Università e con gli enti ed istituzioni, abbia saputo organizzare una struttura operativa capace di interagire con il territorio in modo multidisciplinare e multifunzionale condividendo non più solo il problema idraulico, ma integrandolo con una pluralità di aspetti ed interessi. Il modello matematico realizzato per simulare il comportamento idrodinamico della Sacca è stato più volte adeguato sulla base dei più recenti rilievi batimetrici disponibili e tarato rispetto a diverse campagne di misure sul campo. Dal confronto emerge una sostanziale sovrapposizione tra il comportamento teorico e quello reale della laguna.

L'obiettivo è stato raggiunto considerando non solo lo specchio d'acqua della Sacca ma anche tutte le componenti del complesso sistema idro-morfologico lagunare quali l'assetto batimetrico delle bocche e del braccio di mare antistante la laguna, le portate dei fiumi, il moto ondoso, il trasporto solido e il vento. È importante proseguire nell'impegno finalizzato allo studio delle aree umide del Delta del Po, territorio splendido da un punto di vista naturalistico e fonte di reddito per gli abitanti del territorio per poter poi garantire progetti adeguati.

_STUDI E RICERCHE CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA ED EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA SACCA DI SCARDOVARI

PROF. ING. LUIGI D'ALPAOS
Università di Padova

INTRODUZIONE

La Sacca di Scardovari è la più grande delle lagune del Delta del Po estendendosi per quasi 30 km² fra i rami del Po di Tolle, a nord, e del Po della Gnocca, a sud (Figura 1). La sua attuale configurazione è il risultato di opposti processi morfologici determinati da una parte dall'opera costruttrice dei due rami del Delta del fiume, dall'altra dall'azione distruttrice del mare. Su questi processi naturali nel secolo appena trascorso si sono sovrapposti, con effetti non meno decisivi, i fenomeni della subsidenza del suolo per la massiccia estrazione di acque metanifere in tutta l'area del Delta, intensificata soprattutto dopo la fine della seconda guerra mondiale.

Alle conseguenti rapide variazioni morfologiche dei fondali della laguna e della configurazione del cordone litoraneo che la separa dal mare, si sono inevitabilmente accompagnati differenti comportamenti idrodinamici, anche a causa degli interventi attuati dall'uomo negli anni novanta del secolo passato

nel tentativo di attivare gli scambi d'acqua della laguna con il mare e di indurre al suo interno una migliore circolazione delle correnti di marea.

Con queste finalità nel 1994 fu redatto un progetto specifico che, se portato a compimento, avrebbe dovuto permettere di incrementare i volumi di marea scambiati dalla Sacca con il mare e favorire il ricambio delle acque nella sua parte più interna, dove maggiormente erano evidenti i problemi di decadimento della loro qualità, soprattutto nei caldi mesi estivi, e più in generale dell'ambiente lagunare.

Di tale progetto fino a oggi è stata portata a termine solo una minima parte degli interventi previsti, i quali, accanto all'apertura di una seconda bocca, effettivamente realizzata, ipotizzavano la possibilità di sovrapporre alla circolazione periodica indotta dall'alternarsi delle maree, una circolazione secondaria generata dalla manovra di uno sbarramento interno da mantenere aperto durante la fase di flusso e chiuso durante la



Figura 1: il Delta del Po con evidenziata la Sacca di Scardovari.

successiva fase di riflusso. Ne derivava la possibilità di indurre nella parte più interna della Sacca a ogni ciclo di marea una circolazione oraria, capace di attivare il ricambio delle acque in tempi relativamente brevi rispetto a quelli naturali.

Ora come ora la manovra, ovviamente, non è praticabile, essendo nel frattempo venuti meno i finanziamenti che avrebbero dovuto, sia pure per stralci successivi, dare compimento alle opere a tale fine concepite. Anzi, l'idea sembra essere tramontata, anche perché gli intensi processi erosivi, che si sono manifestati da qualche anno a questa parte a danno del cordone litoraneo che separa la laguna dal mare, catturano le ridotte risorse finanziarie disponibili, essendo diventato prioritario salvaguardare questo elemento morfologico senza il quale la Sacca sarebbe inevitabilmente trasformata in un vero e proprio braccio di mare.

La complessità della situazione ambientale della Sacca, che per la sua estensione e per la sua morfologia vede maggiormente penalizzato il ricambio delle acque nella parte più decentrata del suo bacino, favorisce la possibilità che si manifestino condizioni particolarmente critiche per le importanti attività produttive in essere all'interno della Sacca stessa, soprattutto per quelle riferibili alla mollischicoltura. E così in alcune circostanze è stata colpita la pesca delle vongole, mentre in altre sono rimasti coinvolti gli specchi d'acqua dedicati alla produzione delle cozze.

A questi episodi seguono generalmente polemiche e accese contrapposizioni, forse anche per la difficoltà di accettare da parte degli operatori economici che l'uomo non sia (per fortuna) in grado di controllare, sempre e co-

munque, gli eventi. Gli accadimenti periodici negativi per la produzione e per la pesca che interessano la Sacca sono da considerare come fatti possibili, non necessariamente riconducibili alla responsabilità dell'uomo o all'adozione di provvedimenti di contrasto poco o per niente efficaci.

Alla luce di queste premesse, nello specifico della Sacca di Scardovari è di un qualche interesse esaminare alcuni aspetti significativi del suo comportamento morfodinamico, confrontando le attuali condizioni con quelle di un recente passato, quando la pressione antropica sulla laguna era praticamente inesistente ed essa, pur soggetta ad una relativamente rapida evoluzione morfologica, non era stata nemmeno interessata dalle opere con le quali negli anni successivi si è tentato in qualche modo di governare il regime naturale delle correnti di marea al suo interno. Partendo dalla situazione esistente negli anni del secondo dopoguerra, epoca per la quale è disponibile il primo rilievo batimetrico generale della Sacca (Matticchio, 2009), l'obiettivo dell'analisi comparativa fra le diverse situazioni è quello di inquadrare in quale misura nei decenni successivi i fenomeni naturali e l'opera dell'uomo abbiano singolarmente e nel loro insieme inciso sul regime delle correnti di marea all'interno della Sacca, portando un contributo conoscitivo fondato su metodi di indagine scientificamente e tecnicamente condivisibili, derivanti da un procedimento fisico-matematico controllabile e ripetibile e supportati da misure di campo.

Lasciando sullo sfondo sensazioni ed emozioni, che pure sono importanti nella vita dell'uomo poiché ne animano la passione e concorrono a far crescere gli interessi verso i problemi da risolvere,

con l'ausilio della modellazione matematica e con il conforto dell'osservazione sperimentale, si esamineranno e confronteranno alcune delle situazioni notevoli che si sono determinate dagli anni cinquanta del secolo passato a oggi.

Innanzitutto ci si soffermerà sugli effetti idrodinamici prodotti dalla già ricordata subsidenza antropica, che ha comportato per la Sacca un generale approfondimento dei fondali e un apprezzabile incremento delle sue superfici liquide. L'analisi si fonderà sul confronto fra la situazione esistente nel 1950, epoca del citato primo rilievo batimetrico disponibile, e quella relativa al 1967, quando nell'area del Delta può considerarsi esaurita la fase più intensa dei fenomeni di abbassamento del suolo, prodotti dallo sfruttamento dei giacimenti metaniferi.

La configurazione della laguna secondo il rilievo del 1994 permetterà di evidenziare le conseguenze dell'apertura della seconda bocca, avvenuta poco dopo, sul regime delle correnti di marea all'interno della Sacca e sugli scambi mare-laguna. Il confronto con la situazione attuale fornirà, invece, la possibilità di soffermarsi sulle criticità ancora esistenti e sugli eventuali provvedimenti che si potrebbero adottare per porvi rimedio, evidenziando aspetti positivi e non di interventi complessi che, per la loro stessa natura, comportano modificazioni ambientali da considerare con attenzione. Si tratta di interventi che spesso sono dettati da scelte non solo tecniche ma anche da spinte di carattere sociale e politico e dal modello di sviluppo economico al quale ci si intende ispirare nel governo del territorio del Delta, in generale, e della Sacca di Scardovari, in particolare. Sempre con riferimento alla situazione attuale della Sacca si svi-



lupperanno alcune considerazioni per l'inquadramento dei complessi fenomeni di interazione tra le correnti di marea in ingresso e in uscita dalla laguna e le correnti indotte sotto costa dalla propagazione del moto ondoso generato dal vento nonché sui processi di dispersione delle acque dolci scaricate dai rami del Po di Tolle e della Gnocca nelle acque salate del mare antistante destinato a riceverle.

Da ultimo si illustreranno i processi legati all'interazione delle correnti comunque indotte negli specchi d'acqua antistanti la Sacca con i sedimenti presenti sui fondali, valutando in particolare i problemi connessi alla conservazione del cordone litoraneo che separa la laguna dal mare.

I METODI DI INDAGINE

Il progresso delle conoscenze fisiche e matematiche che governano la propagazione delle onde lunghe in acque basse, quali sono le maree, da alcuni de-

cenni ormai consente di inquadrare con buona attendibilità i fenomeni generali e locali che si determinano in un bacino costiero. Tra i numerosi schemi di calcolo che la ricerca in questo campo ha reso disponibili, i modelli matematici messi a punto dai ricercatori del Dipartimento IMAGE dell'Università di Padova trovano la giusta considerazione tecnico-scientifica, essendo fra quelli che, nel panorama generale offerto dalla letteratura scientifica, uniscono al meglio efficienza e accuratezza della soluzione numerica alle non meno importanti questioni della modellazione fisico-matematica del problema.

Si tratta di modelli basati su di una soluzione agli elementi finiti delle equazioni del moto, messi a punto per le molte indagini condotte in questi anni sulla laguna di Venezia, ma anche proprio sulle lagune del Delta del Po, che sono state un significativo banco di prova per la loro verifica, grazie a estesi e sistematici confronti fra risultati forniti dalle simulazioni matematiche e risultati ottenuti da

specifiche campagne di misura contemporanea dei livelli di marea, delle portate scambiate attraverso le sezioni più significative dei sistemi simulati, delle velocità misurate lungo transetti interni particolarmente estesi, e quindi indicativi di aspetti locali e generali dei campi di moto indotti dall'alternarsi delle maree, e la distribuzione spaziale della salinità.

Senza entrare nel dettaglio delle soluzioni numeriche implementate o sulle peculiarità della modellazione matematica alle quali si ispirano i modelli messi a punto, per le quali si rimanda alla letteratura scientifica (D'Alpaos e Defina, 1992; Defina, 2002; D'Alpaos *et al.*, 2008), è sufficiente in questa sede limitarsi a ricordare alcune caratteristiche di tale modellazione.

Con riferimento alla modellazione idrodinamica, la prima peculiarità rilevante da evidenziare riguarda la possibilità di accoppiare in modo del tutto generale nel dominio di calcolo agli elementi bidimensionali elementi unidimensionali

e tutta una serie di elementi speciali per simulare la presenza di eventuali dispositivi di regolazione e controllo del flusso.

La seconda peculiarità da segnalare è quella che consente di descrivere con grande efficienza operativa, mediante l'introduzione di un originale modello di sottogriglia, il transitorio asciutto-bagnato di ampie porzioni del dominio di calcolo, senza generare le perturbazioni numeriche che comportano altri approcci al problema noti in letteratura. Si tratta di fenomeni che sono di un qualche rilievo per le lagune nelle quali sono presenti estese superfici di barena che si bagnano o si asciugano durante la fase di alta marea più spinta.

Nella modellazione idrodinamica, i termini di accelerazione convettiva sono trattati in modo lagrangiano, mentre i termini di Reynolds sono descritti utilizzando come schema di chiusura della turbolenza il modello suggerito da Smagorinsky e successivamente perfezionato da Stansby. Si può anche tener conto dell'eventuale azione del vento e del moto ondoso generato.

Quest'ultimo è valutato sulla base della formulazione di Longuet-Higgins e Stewart, risolvendo l'equazione differenziale che governa la conservazione dell'azione d'onda nell'ipotesi di oscillazione monocromatica e considerando sia i contributi che tendono ad accrescere l'energia del moto ondoso (il vento in primis), sia quelli che la dissipano come le resistenze al fondo, il frangimento e il fenomeno del whitecapping.

Quanto alla direzione di propagazione del moto ondoso, all'interno del dominio di calcolo, essa è determinata preliminarmente imponendo la condizione di irrotazionalità per il numero d'onda.

Nelle situazioni in cui la mobilità del fondo assume importanza, gli effetti legati alla modificazione di quota nel tempo dei fondali sono analizzati, partendo dall'osservazione che generalmente i tempi caratteristici che caratterizzano le variazioni dell'idrodinamica e dei fondali, sono molto diversi fra loro. Dal punto di vista della modellazione matematica, pertanto, è possibile trattare i due fenomeni in modo disaccoppiato senza perdere di efficacia nella soluzione. In queste ipotesi, ad ogni passo di calcolo, si risolve dapprima l'idrodinamica del campo di moto, assumendo come invariante la geometria del fondo e poi il trasporto dei sedimenti, considerando questa volta invarianti le grandezze idrodinamiche e determinando l'evoluzione altimetrica del fondo sulla base dell'equazione di Exner:

$$(1-n) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \nabla \mathbf{q}_b = D(C) - E$$

Quanto alle due modalità di trasporto dei sedimenti, al fondo e in sospensione, esse sono valutate separatamente con specifiche relazioni, essendo il trasporto al fondo influenzato, per intensità e direzione, dalla pendenza del fondo, diversamente dal trasporto in sospensione. Il modello idrodinamico accoppiato al modulo di evoluzione dei fondali può fornire utili indicazioni per inquadrare sia i problemi di stabilità delle bocche dalle quali dipendono gli scambi mare-laguna sia i fenomeni di erosione e deposito soprattutto con riferimento agli specchi d'acqua immediatamente antistanti al cordone litoraneo che separa la Sacca dal mare.

Poiché nelle situazioni caratterizzate di più abbondanti apporti di acqua dolce da parte dei rami del Delta che sfociano ai lati della Sacca, la diversa

salinità delle acque assume un ruolo rilevante nei processi di ricambio dell'ambiente lagunare, per inquadrare al meglio i fenomeni è stato messo a punto anche un modello 3D multistrato.

Nella formulazione di tale modello peraltro si assume densità variabile per la colonna d'acqua, conservando comunque l'ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni lungo la verticale. Dal punto di vista numerico, la soluzione del modello 3D si sviluppa adattando opportunamente ai singoli strati costituenti la colonna d'acqua la soluzione dello schema idrodinamico bidimensionale, assumendo le ipotesi valide per le cosiddette "correnti di densità".

Una volta valutata l'elevazione della superficie libera nei nodi del reticolo di calcolo è immediato ottenere il campo orizzontale di velocità e i flussi verticali scambiati attraverso le interfacce di ciascun elemento e quindi la concentrazione della sostanza trasportata (nello specifico la densità del fluido variabile per effetto della salinità) utilizzando uno schema alle differenze in avanti (schema upwind). L'insieme dei modelli sinteticamente descritti è stato applicato alla Sacca di Scardovari per analizzare sia le conseguenze delle più importanti modificazioni morfologiche intervenute dal 1950 ad oggi sia le più recenti situazioni che l'hanno esposta a crisi anossiche di una qualche rilevanza e hanno visto il litorale che la separa dal mare interessato da importanti processi erosivi.

CORRENTI DI MAREA

I fenomeni morfodinamici che caratterizzano il comportamento della Sacca di Scardovari sono fondamentalmente governati dalle correnti di marea, pur risentendo in talune circostanze degli

Figura 2: reticolo di calcolo utilizzato per le simulazioni con il modello bidimensionale.



effetti generati dal vento e della diversa salinità delle acque, che ne modificano il comportamento. Far riferimento alla marea come unica forzante esterna, almeno in via preliminare, e assumere densità costante in tutto il campo di moto sono ipotesi più che accettabili, in grado di inquadrare i caratteri generali dei processi che si sviluppano all'interno della laguna.

All'analisi dei fenomeni mediante modelli matematici, con buonissima approssimazione, possono inoltre applicarsi le ipotesi di bidimensionalità del moto, essendo del tutto trascurabili gli effetti della componente verticale della velocità. Fanno eccezione in generale zone di limitata estensione, che non influenzano se non marginalmente la soluzione generale, per le quali i caratteri del moto sono spiccatamente tridimensionali e non possono essere correttamente simulati se non si considera il ruolo delle curvature.

Schematizzazione del sistema e condizioni al contorno

Dati utilizzati

I dati utilizzati per l'implementazione del modello matematico bidimensionale utilizzato per lo studio della circolazione delle correnti di marea nei rami del Delta nelle sue lagune, in generale, e nella Sacca di Scardovari, in particolare, sono stati interamente reperiti nell'Archivio Geografico delle Lagune, recentemente predisposto a cura del Consorzio di Bonifica Delta del Po.

L'archivio raccoglie in un sistema GIS i più recenti dati relativi alla cartografia, alle foto aeree e ai rilievi batimetrici relativi all'area del Delta. La base cartografica utilizzata per la costruzione del reticolo di calcolo del modello bidimensionale è costituita dalle Ortofotocarte della Regione Veneto, che si integrano perfettamente con la Carta

Tecnica Regionale (CTR) e forniscono un'immagine dettagliata ed aggiornata del territorio. Nel caso in esame sono state utilizzate le foto del volo Terraltaly it2000 NR volo 2006-2007. Come necessario supporto per la costruzione del modello è stata utilizzata anche la CTR. Pur essendo riferita a rilievi aerofotogrammetrici non molto recenti (i voli sono del 1983 e del 1990), la CTR fornisce i temi vettoriali necessari per la corretta interpretazione delle Ortofotocarte. Il sistema cartografico di riferimento adottato è il sistema Gauss Boaga fuso Ovest.

Per descrivere la geometria del sistema lagunare e in particolare la batimetria dei fondali si è fatto ricorso ai diversi rilievi disponibili. La principale base di riferimento è rappresentata dal rilievo eseguito dalla ditta Bellan per conto del Consorzio di Bonifica Delta del Po, nel marzo 2008, esteso a tutto il bacino. L'intera Sacca è stata rilevata

con una griglia batimetrica regolare con passo di circa 250 m, infittita con ulteriori strisciate intermedie e associata a batimetrie di dettaglio nei canali e nelle zone maggiormente significative.

I rilievi in questione sono stati integrati con un rilievo di dettaglio dei fondali nel mare antistante le bocche e lo Scanno del Palo, condotto nel gennaio 2009 secondo una griglia a passo costante di circa 50 m ed eseguito dallo stesso studio topografico. L'insieme dei dati citati è stato ulteriormente integrato con una serie di strisciate acquisite nel corso di un'ulteriore campagna batimetrica eseguita nel gennaio 2008 dalla ditta Geostat di Padova e finalizzata a rilevare la geometria del canale che dalla Bocca Nord penetra verso la laguna settentrionale.

Per schematizzare le aree non coperte dai rilievi elencati sono stati utilizzati anche altri dati batimetrici meno recenti, raccolti sempre a cura del Consorzio di Bonifica Delta del Po. In particolare, per completare la batimetria del mare antistante lo scanno sono state considerate le sezioni ortogonali alla costa, estese dalla riva fino alla batimetrica -15, rilevate a supporto di un recente studio idraulico e morfologico [10], [11].

Da ultimo, ci si è avvalsi del rilievo Lidar eseguito dal Genio Civile di Rovigo nell'aprile 2006 sulla fascia dello scanno e nella zona della foce del Po di Gnocca. Questo rilievo, riferibile a condizioni di bassa marea, consente di rappresentare con dettaglio l'altimetria delle zone di bassofondo e di battigia non descritte o descritte solo parzialmente dai rilievi tradizionali, che però fanno parte del dominio di calcolo del modello poiché risultano allagate in condizioni di alta marea.

Costruzione del reticolo di calcolo

La costruzione del reticolo di calcolo del modello bidimensionale implementato sulla base dei dati cartografici e batimetrici descritti nel paragrafo precedente è stata effettuata in modo automatico mediante il software di interfaccia dei modelli matematici utilizzati. Con tale strumento è possibile costruire una triangolazione che si appoggia ai vincoli imposti dalla morfologia del dominio di calcolo, che devono essere convenientemente digitalizzati.

La triangolazione risultante risulta ottimizzata sia per la forma che per le dimensioni delle maglie triangolari. In funzione delle necessità del calcolo idrodinamico, infatti, le maglie stesse debbono essere più piccole dove il campo di moto presenta accentuati gradienti (variazioni planimetriche, curve, dossi, etc.) ma possono avere dimensioni più grandi dove il campo di moto è più uniforme o dove l'accuratezza richiesta per i risultati è minore (ad esempio in mare lontano dalla linea di riva).

La Figura 2 illustra il reticolo di calcolo ottenuto. Esso è composto da 25136 nodi e 48654 triangoli e permette un dettaglio descrittivo del dominio di calcolo di grande qualità. La superficie complessiva simulata dal modello è di circa di 200 km², circa 29 km² dei quali sono di pertinenza della Sacca di Scardovari vera e propria mentre gli altri sono destinati a descrivere le adiacenti foci del Po di Tolle, del Po di Gnocca e del Po di Goro, e un'ampia fascia di mare antistante il litorale.

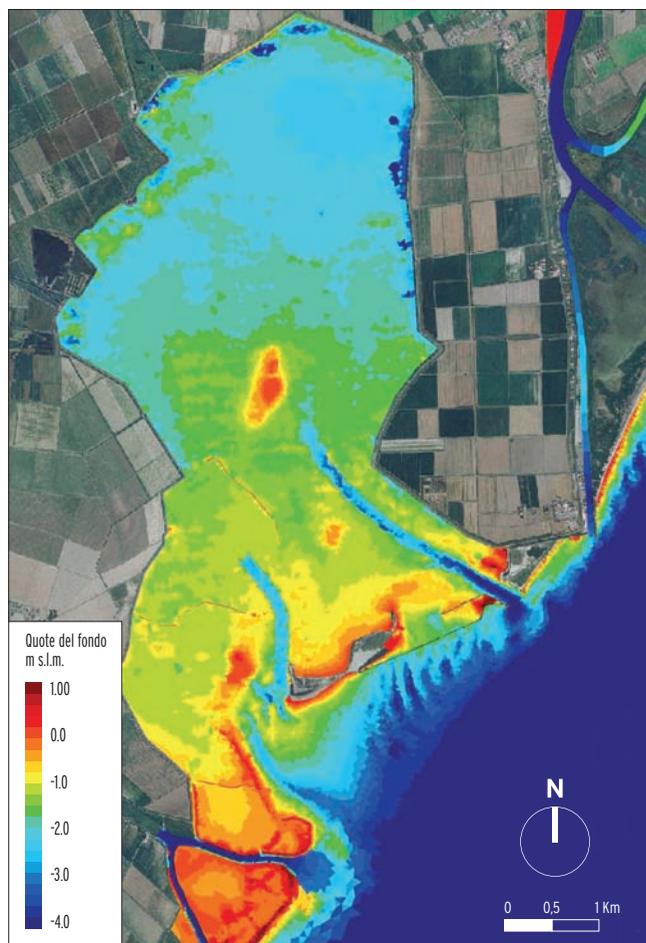
Le dimensioni delle maglie del reticolo di calcolo sono molto variabili. Nella Sacca di Scardovari, dove è incentrato l'interesse delle simulazioni, i lati del-

le maglie hanno mediamente una lunghezza caratteristica di circa 50÷80 m. Tale lunghezza si riduce fino a circa 10 m nell'area delle bocche a mare e di altre zone in cui la geometria dei contorni è complicata, come ad esempio nell'intorno degli scanni o lungo i margini lagunari. Molto più grandi sono invece le maglie utilizzate per descrivere il braccio di mare antistante la laguna. Al largo, infatti, i triangoli di maggiori dimensioni hanno un lato di circa 400 m.

La batimetria della laguna secondo la schematizzazione modellistica predisposta è illustrata con una scala di colori nella Figura 3. Il bacino è caratterizzato, nella sua parte settentrionale (Sacca di Scardovari vera e propria), da fondali praticamente uniformi, con quote variabili fra -2.0 m e -2.5 m, e con presenza di avvallamenti e dossi solo lungo i margini. Nella parte centrale le profondità si riducono apprezzabilmente, essendo comprese tra -1.4 e -1.8 m. È evidente, inoltre, l'area occupata dalla "barena" artificiale realizzata dal Consorzio di Bonifica nell'ambito dei lavori realizzati per la vivificazione idrodinamica della Sacca. Essa risulta parzialmente erosa e alquanto meno elevata rispetto alla sua configurazione originale, con quote massime di poco superiori al livello medio del mare.

Nella parte meridionale del bacino (Sacca di Bottonera) i fondali sono generalmente meno profondi. Fanno eccezione le due incisioni formate dai canali che dalle bocche a mare penetrano verso l'interno, realizzate anch'esse nell'ambito dei lavori condotti per la vivificazione del bacino stesso. Il canale che proviene dalla Bocca Nord presenta fondali superiori ai 3 m, che si approfondiscono ulteriormente in corrispondenza della bocca. Il canale che proviene dalla Bocca

Figura 3:
schematizzazione
della batimetria
della Sacca di
Scardovari.



Sud, invece, ha quote del fondo dell'ordine di -2.5 m, le quali si riducono drasticamente in corrispondenza della Bocca, dove il canale stesso si perde in una serie alternata di dossi e di avvallamenti.

Nella parte occidentale della Sacca di Bottonera si nota la presenza del relitto sommerso della scogliera che un tempo, prima dei vistosi fenomeni di subsidenza che hanno interessato la Sacca, delimitava un'estesa area emersa (area Caneastro). In tutta la fascia che si sviluppa a ridosso degli scanni i fondali hanno generalmente profondità molto modeste, spesso inferiori a 1 m, e sono caratterizzati dalla presenza di dossi presumibilmente dovuti al deposito del materiale

in sospensione sospinto verso l'interno dalle correnti di marea.

Alcune indicazioni significative documentate dai rilievi batimetrici, riguardano anche la conformazione dei fondali all'esterno della Sacca (Figura 3). Procedendo da Nord verso Sud, si nota innanzitutto la profonda incisione dovuta alla presenza della Bocca Nord, il cui canale all'uscita dai due moli che la configurano tende a piegare decisamente verso Sud. Lungo la difesa in scogliera che delimita lo scanno è particolarmente evidente un sistema di barre disposte quasi ortogonalmente alla costa. Tali barre si sviluppano secondo una sequenza periodica, con interasse medio

di circa 150÷200 m e altezza apprezzabile di circa 1.5÷2.0 m. Il sistema di barre testimonia la presenza di intensi processi morfodinamici associati ai fenomeni di trasporto solido indotti dalle interazioni fra fondali e correnti indotte dalla propagazione sotto costa del moto ondoso generato dal vento. Si tratta di una configurazione morfologica dovuta all'azione combinata del trasporto parallelo alla costa e di quello a essa perpendicolare, che si esplica in un processo di erosione sottocosta e in un trasporto di materiale verso il largo sostenuto dalle correnti di ritorno (rip-current).

Sempre dall'immagine di Figura 3 si possono trarre, infine, significative indicazioni sulla situazione batimetrica dei fondali nell'intorno della Bocca Sud. Davanti alla bocca è presente un dosso piuttosto esteso, dove le profondità sono ridotte, fino a valori inferiori a 1.0 m. Il canale a marea, all'esterno della bocca, è decisamente spostato verso SW, a ridosso del cordone sabbioso delimitante la bassura che contorna la foce del Po di Gnocca (Punta del Polesine). Il dosso, evidentemente dovuto al deposito delle sabbie trasportate dal moto ondoso in direzione NE-SW, sembra estendersi a tutta la bocca, essendo solo localmente interrotto da alcuni avvallamenti, lungo i quali presumibilmente si esplica con maggiore intensità l'azione modellatrice delle correnti di marea.

Condizioni al contorno

Con riferimento alle simulazioni numeriche condotte sul comportamento della Sacca, le condizioni al contorno utilizzate consistono essenzialmente nell'assegnazione dell'andamento del livello di marea sui nodi del bordo a mare del reticolo di calcolo. Nello specifico, poiché il dominio di calcolo include an-

che il tratto terminale del Po di Tolle, è necessario assegnare anche una immissione di portata nella sezione di monte di questo ramo del Delta del Po.

Per le prime simulazioni condotte, finalizzate al confronto fra i risultati forniti dal modello e la situazione riscontrata con la campagna di misure del 7-8 aprile 2009, relativamente ai livelli in mare è disponibile l'andamento misurato del livello di marea presso i mareografi appositamente installati per le misure e presso il più vicino mareografo della rete ISPRA (ex APAT) di Porto Caleri. Non essendo disponibili invece dati sulle portate proprie del Po di Tolle, tenuto conto anche della modesta influenza di tali portate sul regime generale delle correnti, si è assunto in prima approssimazione in ingresso a tale ramo una portata propria minima di $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

In una seconda serie di simulazioni, finalizzate a confrontare situazioni diverse tra loro per la geometria dei fondali, si è adottata una marea di riferimento sinusoidale di ampiezza pari ad 1 m e periodo di 12 ore, oscillante attorno alla quota del medio mare. Tale marea è, in pratica, rappresentativa delle normali condizioni di sizigia e può convenientemente essere assunta, per le sue caratteristiche di regolarità e di periodicità, come termine di confronto in un'analisi comparativa fra situazioni diverse.

Per quanto concerne l'attribuzione dei coefficienti di scabrezza con i quali caratterizzare le resistenze al moto, in analogia con le scelte effettuate nell'ambito di altri studi sulle lagune del Delta del Po [10], [11], si è ritenuto opportuno, in linea generale, di non differenziare il valore di tale parametro tra le maglie che compongono il reticolo di calcolo, dal momento che, da una parte, sulla

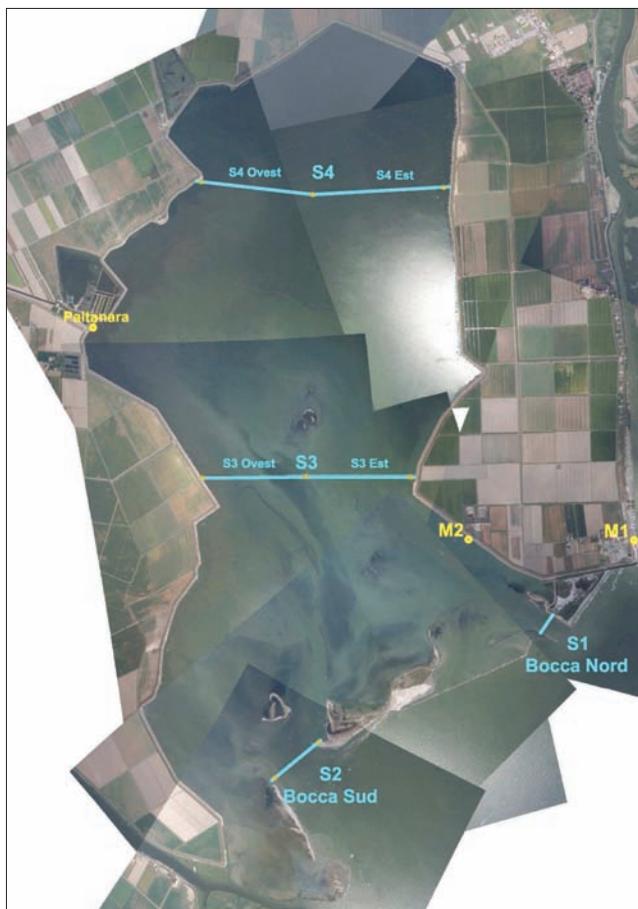


Figura 4: ubicazione delle stazioni mareografiche e delle sezioni di misura della portata relative alla campagna di misure dei giorni 7-8 aprile 2009.

base dei dati disponibili non è sembrato possibile individuare nel dominio considerato zone in cui fosse giustificabile la scelta di una diversa scabrezza del fondale, dall'altra, come si vedrà, il modello è sembrato in grado di riprodurre con sufficiente accuratezza le misure sperimentali, pur adottando un unico valore del coefficiente di scabrezza. Per queste ragioni, in definitiva, in tutto il dominio di calcolo si è adottato un coefficiente di scabrezza (espresso nella formulazione di Strickler) costante e uguale a $35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

Confronto fra misure e risultati del calcolo

Nel corso della campagna di misure

del 7 e 8 aprile 2009, descritta dettagliatamente nel rapporto [12], sono stati misurati gli andamenti del livello di marea in 3 stazioni diverse (M1, M2, Paltanara) e la portata fluente attraverso 4 sezioni significative (le due sezioni di bocca e 2 transetti interni, Figura 4). I dati raccolti hanno consentito una prima taratura del modello matematico per confronto fra i risultati del calcolo e le osservazioni sperimentali, ma soprattutto di inquadrare il comportamento idraulico della Sacca rispetto a grandezze fondamentali del fenomeno propagatorio.

Come condizione al contorno sui nodi del bordo a mare è stata assegnata la registrazione del livello del mareografo della rete ISPRA (ex APAT) di Porto Ca-

leri, che costituisce l'unica registrazione disponibile lungo il litorale del Delta. In effetti, in condizioni meteorologiche normali, gli sfasamenti e le differenze di ampiezza della marea fra il litorale di Porto Caleri e quello di Scardovari sono relativamente contenute. È evidente, tuttavia, che la scelta operata può introdurre qualche incertezza sul confronto tra i risultati del calcolo e i rilievi sperimentali. Pur con qualche limite, nelle ipotesi assunte, il modello si dimostra in grado di riprodurre con approssimazione più che accettabile tutti i dati di livello e di portata resi disponibili dalle misure.

Per quanto riguarda i livelli, l'accordo dei valori calcolati con gli andamenti di marea misurati ai due mareografi provvisori (M1 e M2) e allo strumento installato presso l'idrovora Paltanara è più che accettabile, il modello riproduce con buona concordanza lo sfasamento del segnale registrato dai sensori rispetto al mare. Si riscontra invece qualche differenza per quel che riguarda l'ampiezza dell'oscillazione della marea, che, nel caso del modello, è leggermente superiore a quella misurata.

Queste differenze sono più evidenti sia per il mareografo M1, che è collocato all'interno della darsena posta alla foce del Po di Tolle, per il quale l'ampiezza delle oscillazioni calcolate risulta eccessivamente amplificata in corrispondenza dei cavi, sia per il mareografo dell'idrovora Paltanara, per il quale le massime discrepanze si verificano in corrispondenza dei colmi. Per quel che concerne invece il mareografo M2, situato all'interno della Sacca lungo il margine orientale, la corrispondenza fra i dati misurati e i valori calcolati è quasi perfetta.

Per quanto riguarda le portate fluenti, i risultati ottenuti con il calcolo indi-

cano a che il modello riproduce in modo molto soddisfacente i loro valori in tutte le sezioni considerate. Relativamente alla Bocca Nord (sezione S1), i valori calcolati seguono accuratamente la sequenza dei valori misurati in tutte le fasi della marea. In particolare il modello riproduce quasi perfettamente la fase di flusso entrante (portate di segno positivo), indicando un valore massimo della portata pari a 770 m³/s attorno alle ore 20:30 del 7 aprile. Solo nella fase di flusso uscente (portate di segno negativo) si riscontra qualche modesta discrepanza, con il modello che indica un valore massimo di portata di 405 m³/s contro un valore misurato di 440 m³/s.

Soddisfacente risulta anche il confronto tra i risultati del calcolo e le misure alla Bocca Sud (sezione 2). In questo caso peraltro le misure non descrivono tutte le fasi della marea, restando sostanzialmente inesplorata la fase di massima portata entrante, per la quale il modello indica un valore al colmo di 775 m³/s attorno alle ore 20:30 del 7 aprile. Nella fase di flusso uscente il modello tendenzialmente sovrastima le portate, essendo il valore massimo calcolato di 345 m³/s, a fronte di una portata misurata di 285 m³/s. Nel complesso, tenuto conto degli errori di misura e delle difficoltà tipicamente insite in questo tipo di valutazioni, anche questo risultato si può ritenere ampiamente accettabile.

È da sottolineare al riguardo il fatto che la sezione della misura, e di conseguenza anche quella considerata nel modello, non intercetta completamente tutta la portata fluente attraverso la Bocca Sud. Esistono, infatti, zone di bassi fondali sul lato occidentale della bocca stessa dove in condizioni di alta marea possono fluire portate modeste ma non del tutto trascurabili, che, come è illu-

strato anche nel rapporto sugli esiti della campagna di misure [12], non è stato possibile rilevare per evidenti difficoltà operative. Molto interessante è anche il confronto fra le portate calcolate e quelle misurate in corrispondenza dei due transetti interni formati dalle due sezioni S3 e S4 individuate all'interno della Sacca. Nel primo caso (sezione S3) la corrispondenza tra i valori risultanti dai calcoli e le misure è quasi perfetta. Se si considera la sezione S3 nel suo complesso (linee rosse), in entrambi i casi le portate massime entranti sono di circa 650 m³/s, mentre quelle uscenti sono di circa 450 m³/s.

Se si considerano le due parti in cui la sezione è stata suddivisa, emerge che il modello sottostima leggermente la portata fluente attraverso la sezione orientale e sovrastima di conseguenza leggermente quella fluente attraverso la sezione occidentale. Emerge comunque anche dal calcolo la tendenza evidenziata dalle misure, secondo la quale gli scambi di portata lungo il lato orientale sono apprezzabilmente superiori a quelli che competono alla parte occidentale della Sacca. Questa asimmetria sembra invertirsi se ci si riferisce alle due parti in cui è suddivisa la sezione S4, che si colloca nella parte più interna della Sacca. In questo caso le portate massime complessive indicate dalle misure sono di 225 m³/s in fase di flusso e di 210 m³/s in fase di riflusso, e sono solo leggermente sottostimate dal modello. Sia le misure che il modello indicano che le portate fluenti attraverso la sezione nella sua parte orientale sono minori di quelle che attraversano la sua parte occidentale.

In definitiva, tenute in debito conto le incertezze di questo tipo di valutazioni, legate da una parte alla difficoltà di mettere a punto un modello che sia in grado

di riprodurre correttamente la ripartizione dei flussi mareali attraverso le bocche lagunari, dall'altra alle difficoltà insite nelle stesse misure sperimentali, soprattutto in situazioni come quella in esame in cui le sezioni osservate sono molto ampie e caratterizzate dall'alternarsi di profondità elevate e bassifondi, si può ritenere che il risultato ottenuto sia più che soddisfacente.

Se ne conclude che il modello matematico messo a punto messo a punto è da ritenersi adeguato per le finalità delle indagini, ovvero per condurre valutazioni sugli effetti idrodinamici che gli interventi in progetto possono comportare per la circolazione idrodinamica della laguna.

Evoluzione morfodinamica della Sacca dal 1950 ad oggi

La Sacca di Scardovari, come del resto tutte le lagune del Delta, ha subito nel corso della seconda metà del '900 profonde modificazioni morfologiche, a causa della sovrapposizione, sui naturali processi evolutivi tipici di tutti i bacini costieri in aree di recente formazione geologica, di importanti processi di subsidenza conseguenti a massicce estrazioni di acque metanifere dal sottosuolo.

I rilievi batimetrici disponibili

Nel caso della Sacca, una prima significativa rappresentazione dei suoi fondali è riferibile agli anni '50 del novecento, quando fu eseguito un primo esteso rilievo batimetrico di tutta la laguna a cura del Magistrato alle Acque, accompagnato, e questo è un dato di estremo interesse, da contemporanei rilievi mareografici, per valutare in quale misura le variazioni medie del livello del mare avessero potuto incidere sulle quote dello zero della rete altimetrica dello

Stato, allora fatto coincidere con il medio mare 1898 a Punta della Salute. Con riferimento a questo aspetto dalle analisi condotte sulle osservazioni mareografiche risulterebbe un innalzamento del livello medio del mare di circa 12 cm, del tutto confrontabile con quello rilevato per l'area di Venezia.

Il confronto con la situazione batimetrica attuale mette in evidenza importanti modificazioni morfologiche sia per gli specchi d'acqua interni della Sacca sia per il litorale che la margina rispetto al mare. Al mare la Sacca risulta collegata a Sud-Ovest tramite la foce di un canale (Canale Curiolo) che la incide in posizione centrale penetrando verso il suo margine settentrionale.

Risultano evidenti alcune differenze che si riflettono sul comportamento idrodinamico della laguna. Innanzitutto una maggiore differenziazione dei fondali, grazie alla presenza del canale citato e di zone d'acqua adiacenti sensibilmente meno profonde e tutto sommato più articolate di quelli attuali, anche per la presenza di fasce marginali che tendono a emergere rispetto al livello medio della marea. Molto evidente è inoltre la separazione fra gli specchi d'acqua della Sacca di Scardovari vera e propria e quelli di Sacca Bottonera, più prossima al mare. Appaiono infine ampie fasce di terreni, in adiacenza a Bottonera e in corrispondenza del collegamento fra Bottonera e Scardovari, poste a quote superiori a quelle medie del mare e quindi coltivate.

Il successivo rilievo disponibile della Sacca del 1967, eseguito a cura dell'Ente Delta Padano, evidenzia già alcune importanti modificazioni della morfologia lagunare. È ancora presente, seppure con una minore evidenza, il canale cen-

trale che, partendo dalla bocca, penetra verso i margini settentrionali della Sacca, incidendola in posizione mediana.

Risultano alquanto incrementati i fondali delle zone d'acqua adiacenti al canale e, parallelamente, si è apprezzabilmente estesa la loro superficie complessiva, che ora congloba sia aree poste a ridosso del litorale, in posizione immediatamente retrostante, sia aree poste in sinistra rispetto alla bocca nella zona di collegamento fra Bottonera e Scardovari. Si tratta dei segni evidenti della subsidenza antropica che ha interessato il Delta nel suo complesso e, con riflessi negativi dal punto di vista idrodinamico, anche le sue lagune costiere e la Sacca di Scardovari in modo particolare.

Incomincia inoltre a manifestarsi un apprezzabile arretramento della linea di riva del cordone litoraneo, ora inciso, sempre verso sud-ovest, da una bocca più ampia che ne piega leggermente i bordi, e a nord-est, da una bocca minore che si apre proprio a ridosso della foce del Po di Tolle. Sempre verso nord-est le quote del cordone litoraneo sono alquanto ridotte e vi è possibilità di sormonto da parte dei più elevati livelli di marea. Non positivo è l'assetto generale che tende ad assumere la linea di riva con una concavità del profilo che favorisce, a parità di altre condizioni, la concentrazione di energia del moto ondoso e quindi verosimilmente l'erosione.

Il successivo rilievo della Sacca, eseguito a cura del Consorzio di Bonifica Delta del Po, è relativo al periodo 1991-1994. Esso conferma la tendenza evolutiva della morfologia della laguna già evidente negli anni precedenti. L'incisione di quello che era stato il Canale Curiolo è ormai quasi totalmente scomparsa, e se ne trova traccia solo in prossimità della grande

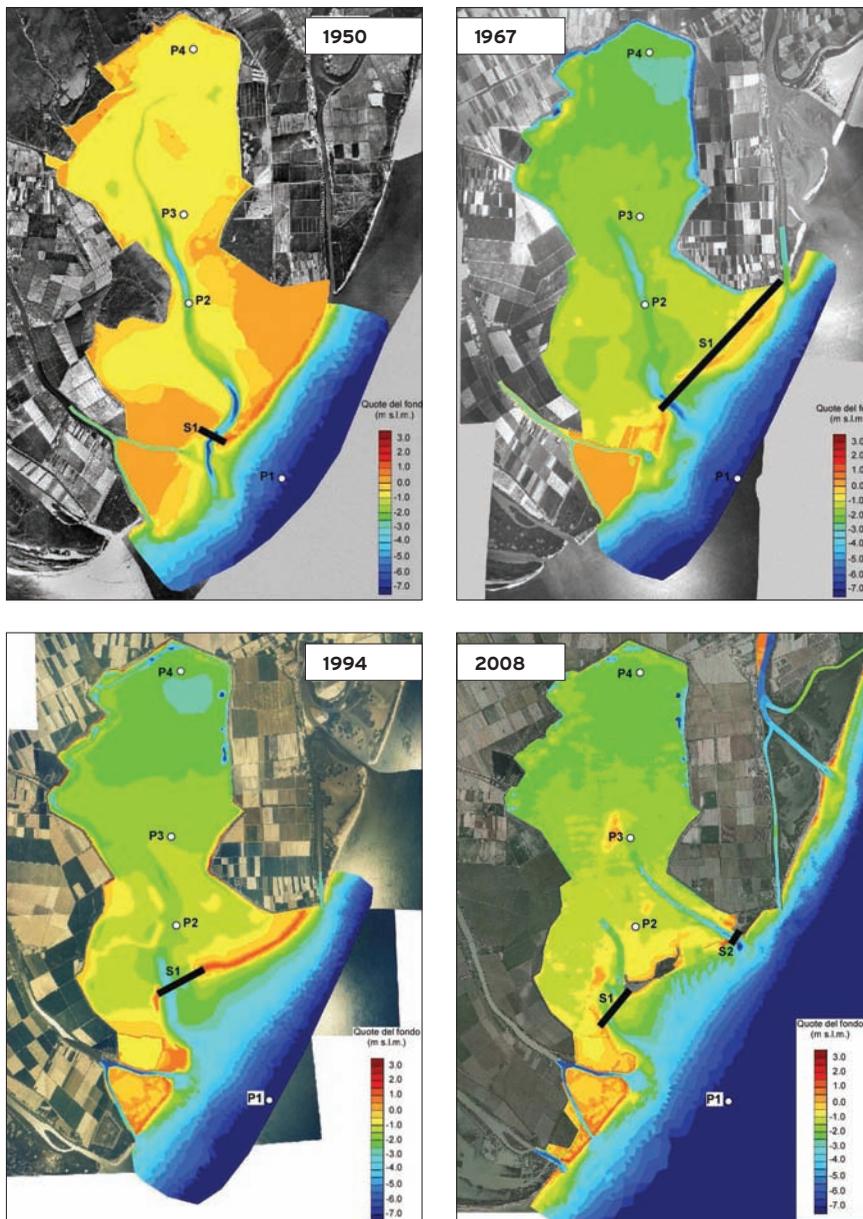


Figura 5: mappe batimetriche delle schematizzazioni predisposte per l'analisi dell'evoluzione storica della Sacca.

bocca a mare che si apre a sud-ovest.

È confermato il processo generalizzato di approfondimento dei fondali, soprattutto nella Sacca di Scardovari vera e propria. L'assetto del litorale si presenta con una linea di riva ulteriormente arretrata rispetto al rilievo precedente, e con un'accentuazione della concavità, sfavorevole se si considerano i processi

energetici ed erosivi innescati sotto costa dalla propagazione del moto ondoso.

Quanto alle quote del litorale, verso nord-est esse sono in grado di contenere i livelli di marea degli eventi usuali e non è più presente la bocca secondaria che precedentemente si apriva nelle vicinanze della foce del Po di Tolle.

L'ultimo rilievo disponibile della Sacca (2008), conferma l'evoluzione morfologica del litorale e l'esistenza di intensi processi erosivi a suo danno. A seguito dei lavori eseguiti nell'ambito dei P.I.M. sono ora presenti sul litorale due bocche, dalle quali si dipartono verso l'interno i canali appositamente scavati per migliorare il ricambio delle acque all'interno della laguna. Questi canali interessano la sola Sacca di Bottonera e si spingono fino alla fascia che la separa dalla parte più meridionale della Sacca di Scardovari vera e propria.

Nella Sacca di Bottonera i fondali presentano una maggiore articolazione delle quote, anche come conseguenza del fatto che una parte dei sedimenti erosi dal cordone litoraneo, introdotta dalla corrente nelle zone lagunari immediatamente retrostanti vi si è depositata. Il confronto tra le diverse situazioni sinteticamente illustrate può essere convenientemente visualizzato rappresentando a scala di colori le batimetrie rilevate, modellando i fondali mediante una maglia triangolare di appoggio (Figura 5). Emergono in tutta evidenza le importanti trasformazioni morfologiche subite dalla Sacca in un arco di tempo relativamente breve, di nemmeno 60 anni, e in particolare l'approfondimento generalizzato dei fondali, quantificabile mediamente in oltre 1 m per la Sacca di Scardovari vera e propria, e il radicale cambiamento dell'assetto della linea di

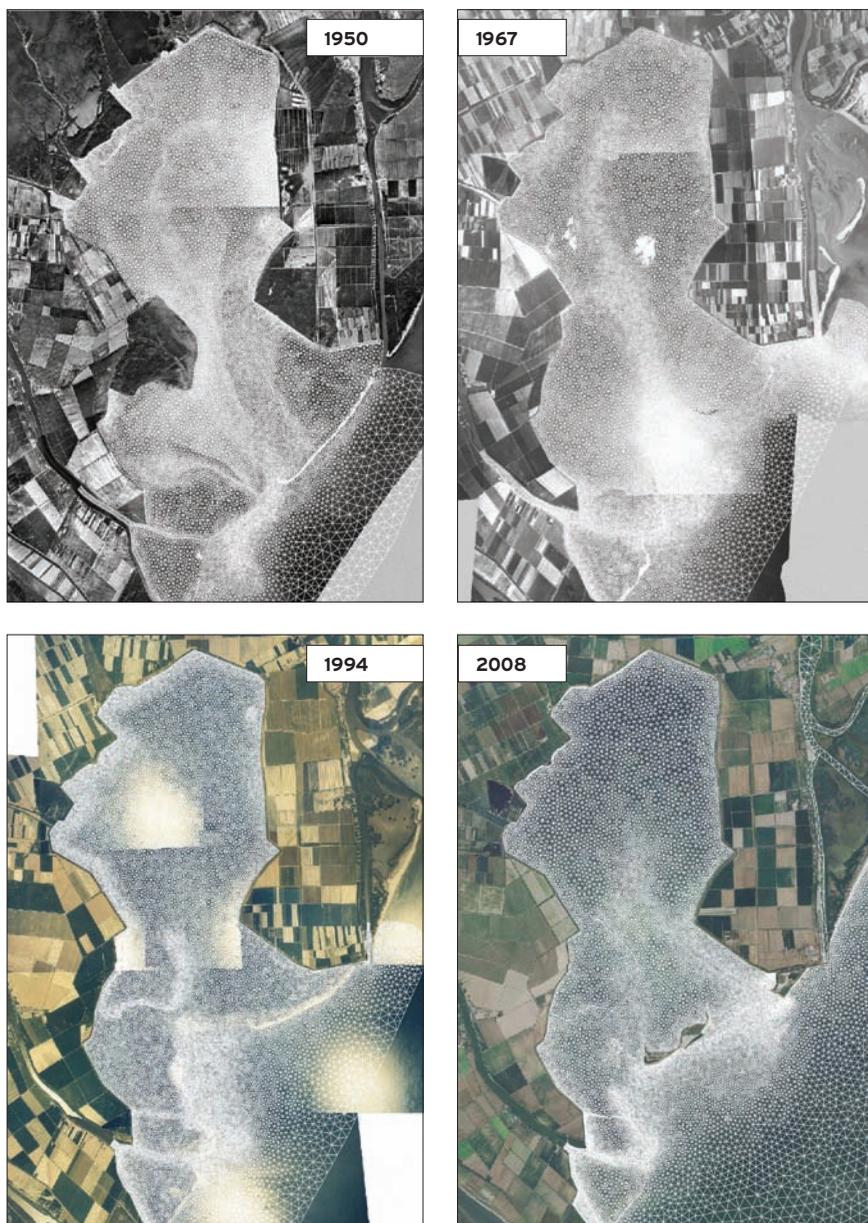


Figura 6: rappresentazione dei 4 diversi reticoli di calcolo predisposti per l'analisi dell'evoluzione storica della Sacca.

riva del cordone litoraneo che la separa dal mare, inizialmente con un andamento planimetrico quasi convesso ed ora decisamente concavo verso il mare. Si tratta di cambiamenti che hanno comportato riflessi di un qualche rilievo anche sul comportamento idrodinamico della laguna e sulle interazioni fra le correnti mareali e le correnti costiere indotte dal moto ondoso.

Modellazione matematica del comportamento idraulico della Sacca nel passato

Le importanti modificazioni della morfologia dei fondali della Sacca suggeriscono di valutare almeno nei loro aspetti fondamentali quali siano state le conseguenti variazioni del comportamento idrodinamico della laguna dal 1950 ad oggi.

Con questi obiettivi si è proceduto ad implementare e modellare le quattro diverse configurazioni della Sacca illustrate dai rilievi del 1950-1967-1991 e 2008, esaminandone il comportamento idraulico con lo schema bidimensionale predisposto, basato su di un reticolo di calcolo confrontabile, per caratteristiche geometriche (numero di elementi, dimensioni massime, grado di infittimento del reticolo) per tutte e quattro le situazioni esaminate (Figura 6).

Considerando la stessa marea in mare (marea sinusoidale di periodo semidiurno di 12 ore oscillante per ± 0.5 m attorno al valore medio) si sono quindi valutati e confrontati tra loro innanzitutto gli andamenti dei livelli in alcuni punti caratteristici, le portate scambiate con il mare, i gradienti istantanei di livello con i relativi campi di velocità e successivamente le modalità con cui sono trasportate macchie di particelle rilasciate nello stesso istante rispettivamente all'interno della Sacca Bottonera e di Scardovari vera e propria.

Se si esaminano le portate scambiate dalla Sacca con il mare, appaiono per le 4 configurazioni considerate comportamenti alquanto diversi. Per la prima delle configurazioni (1950) le massime portate in fase di flusso sfiorano i $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Portate massime inferiori, di circa 800

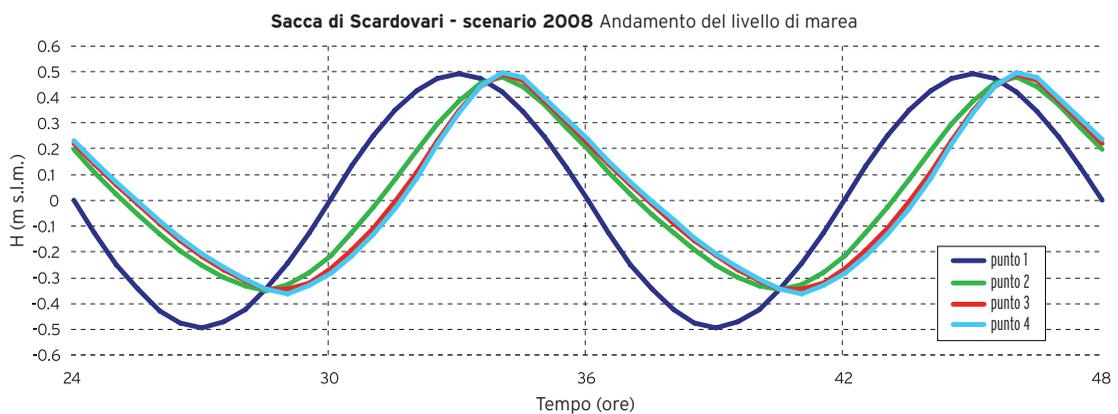
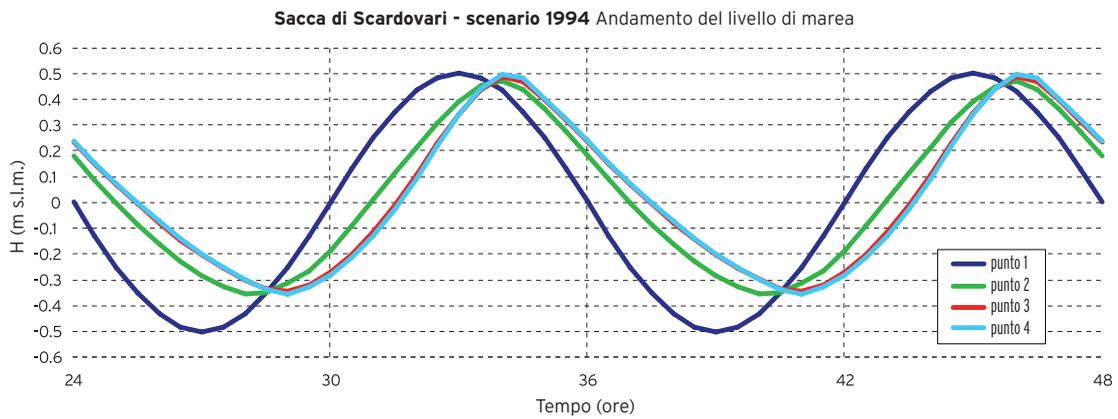
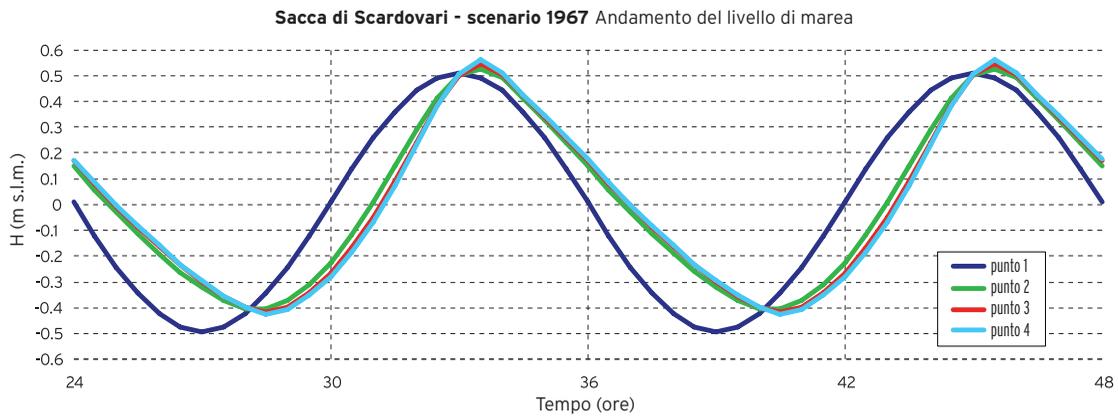
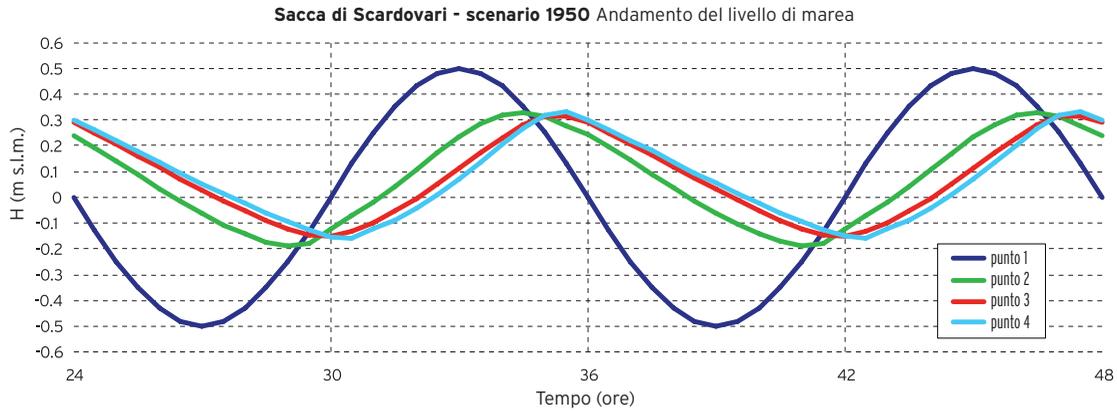


Figura 7: andamento dei livelli di marea nei punti di Figura 5 per le diverse configurazioni storiche della Sacca.

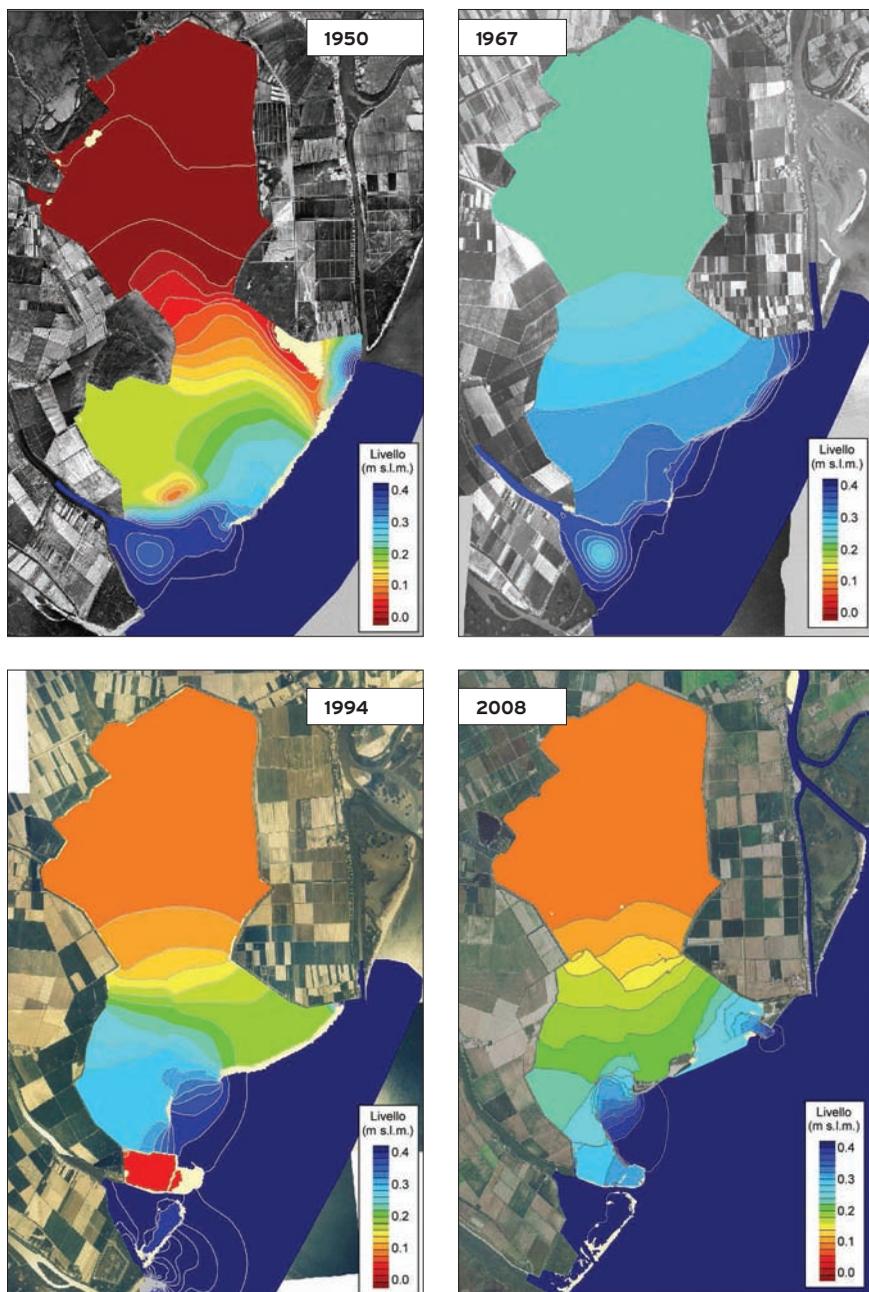


Figura 8: mappa dei livelli istantanei nella fase di flusso entrante (T=32 ore) per le diverse configurazioni storiche della Sacca.

m^3/s , sono invece scambiate durante la fase di riflusso, che si presenta però con un cavo più disteso per mantenere inalterato il volume complessivo uscente.

Guardando i livelli (Figura 7) si riscontrano importanti riduzioni dei colmi e dei cavi di marea rispetto al mare, con

effetti particolarmente apprezzabili soprattutto nel superamento della bocca. Effetti molto diversi della propagazione della marea sono segnalati dal calcolo per la configurazione batimetrica del 1967. I colmi di marea si propagano verso l'interno con sfasamenti decisamente più ridotti del caso precedente, tendendo i colmi addirittura ad esaltarsi per qualche cm a misura che ci si allontana dal litorale e ci si porta verso l'interno.

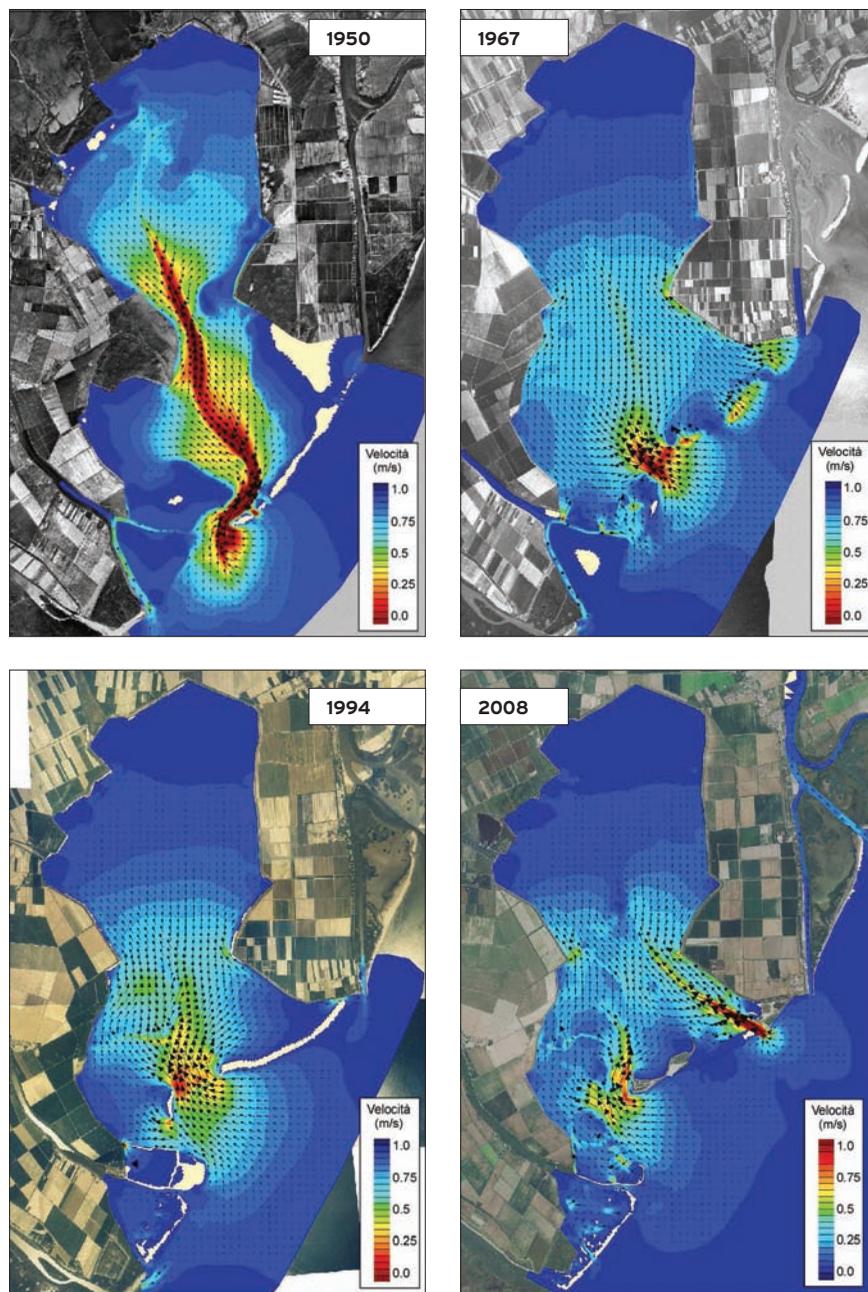
I cavi, anch'essi meno sfasati, si attenuano ancora, ma in modo meno pronunciato di quanto non si riscontri per la configurazione del 1950 (Figura 7). Il tutto è determinato dai maggiori fondali presenti all'interno della Sacca conseguenti ai già ricordati fenomeni di subsidenza antropica, ma soprattutto dalle minori resistenze idrauliche che la marea incontra nel superamento del cordone litoraneo con un'area complessiva di bocca decisamente incrementata e del contemporaneo maggior ruolo dei termini inerziali nella propagazione. Per la configurazione in esame aumentano apprezzabilmente i volumi d'acqua scambiati con il mare, ora caratterizzati da portate massime che in fase di flusso sfiorano i $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ e i $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ in fase di riflusso. La Sacca, che nel primo dopoguerra vedeva la propagazione della marea dominata dai fenomeni dissipativi, manifesta un comportamento fortemente inerziale, che si riflette anche sugli altri aspetti del regime idrodinamico. Significativa al riguardo è la diversa distribuzione dei gradienti istantanei di livello (Figura 8) molto diversa nelle due situazioni (1950 e 1967), in modo particolare nella Sacca di Bottonera.

Alla diversa distribuzione dei gradienti di livello si accompagna una differente distribuzione delle velocità istantanee

(Figura 9), molto meno differenziata per la configurazione del 1967 rispetto a quella del 1950, quando il Canale Curiolo controllava maggiormente il fenomeno propagatorio. Relativamente simili per gli aspetti idrodinamici i comportamenti delle due configurazioni della Sacca risultanti dai rilievi del 1994 e del 2008, con quest'ultima che si differenzia dalla prima per l'apertura a nord di una seconda bocca per migliorare la circolazione delle correnti nell'ambito di un complesso di opere previste, ma realizzate solo in minima parte. L'andamento dei livelli di marea all'interno della Sacca (Figura 7) segnala un'attenuazione dei cavi con i colmi che si propagano sostanzialmente immutati rispetto al mare e che risultano solo sfasati nel tempo. La distribuzione dei gradienti istantanei dei livelli nella Sacca di Bottonera (Figura 8) è appena diversa, mentre i campi di velocità si presentano per lo stato attuale (2008) con maggiori articolazioni dei valori (Figura 9), grazie ai canali interni scavati assieme all'apertura della bocca nord e poi mantenuti attivi con operazioni successive di dragaggio.

Dal confronto fra le diverse situazioni, emerge la scarsa attività delle correnti di marea nella Sacca di Scardovari vera e propria, idraulicamente troppo lontana dalle bocche a mare e caratterizzata dal punto di vista morfologico da una uniformità dei fondali, che agisce a sua volta sugli aspetti del ricambio in senso sfavorevole.

Significativi riscontri di questa condizione sono forniti dall'analisi della dispersione di macchie di particelle rilasciate, nella stessa fase di marea, rispettivamente nella Sacca di Bottonera e nella Sacca di Scardovari. Per quest'ultima, in tutte le configurazioni considerate (1950-1967-1994-2008), la dispersione è



molto modesta per non dire quasi nulla (Figura 10,11) e testimonia i problemi di ricambio delle acque che da sempre si riscontrano in questa parte della laguna.

Per i suoi specchi d'acqua, a meno di non dare completezza al progetto a suo tempo predisposto nell'ambito dei P.I.M.,

Figura 9: mappa delle velocità nella fase di flusso entrante (T=32 ore) per le diverse configurazioni storiche della Sacca.

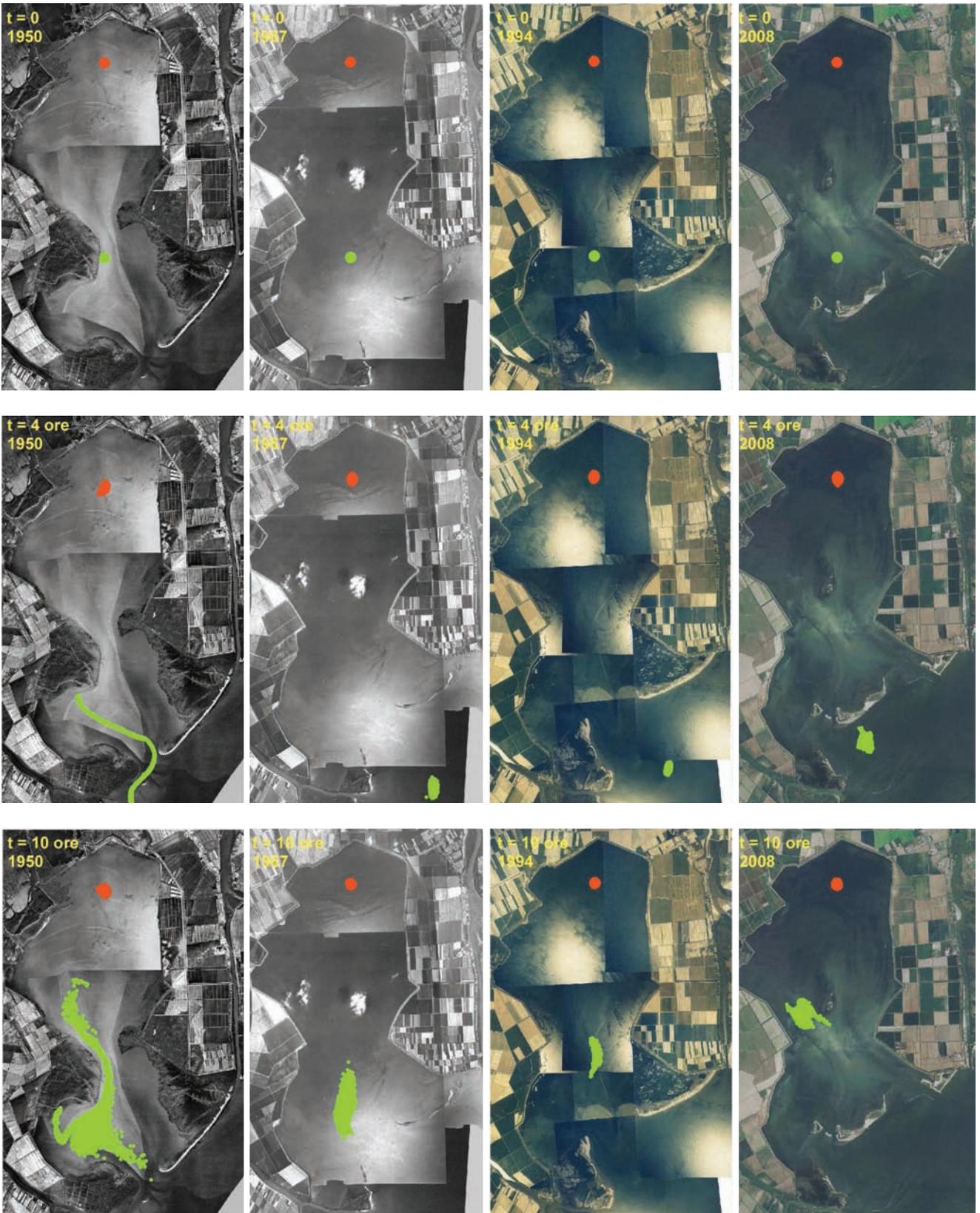


Figura 10: mappe che rappresentano la dispersione di due "macchie" di particelle

calcolata con il modello lagrangiano-dispersivo per una marea sinusoidale.

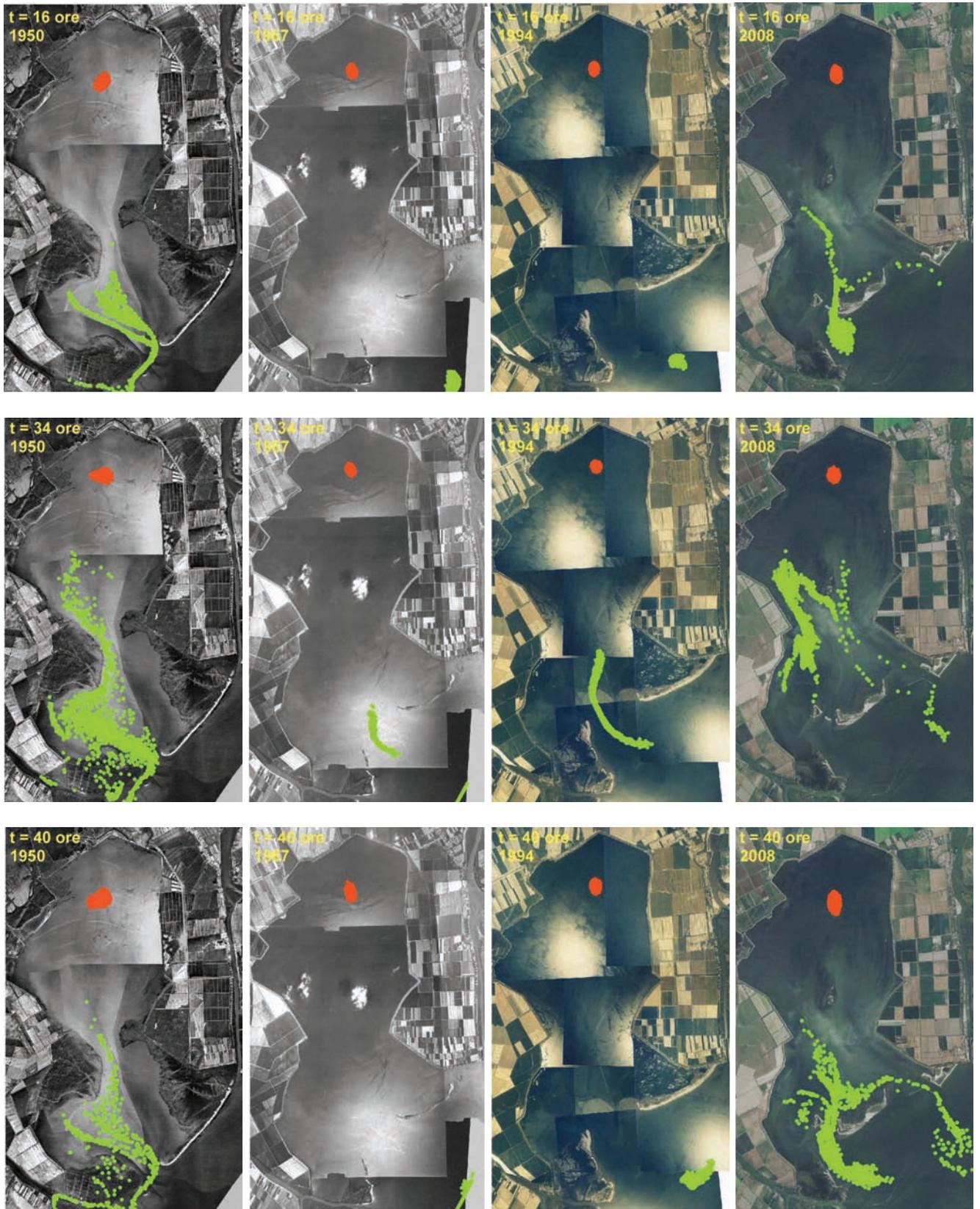


Figura 11: mappe che rappresentano la dispersione di due "macchie" di particelle

calcolata con il modello lagrangiano-dispersivo per una marea sinusoidale.

il ricambio delle acque viene a dipendere in misura determinante dai fenomeni di dispersione, in particolare da quelli indotti dall'azione del vento, essendo modesti, assolutamente modesti come si è visto, quelli generati dalla diversa distribuzione locale della velocità delle correnti di marea.

Condizioni più favorevoli si presentano per la Sacca di Bottonera, dove il ricambio delle acque è sostenuto direttamente dai fenomeni convettivi legati alla propagazione delle correnti di marea ed è ulteriormente favorito dai fenomeni di dispersione, a loro volta più significativi anche per la maggior articolazione dei fondali e come dimostrano i risultati ottenuti con il modello lagrangiano - dispersivo (Figura 10,11). Per questi aspetti l'apertura della bocca nord e lo scavo dei canali interni risultano essere stati provvedimenti positivi in grado di accentuare globalmente la dispersione convettiva e, quindi, il ricambio delle acque.

Analisi della situazione attuale

Una volta espletata la taratura del modello matematico, per esaminare i caratteri principali della circolazione idrodinamica nella laguna di Scardovari sono state effettuate alcune simulazioni, facendo riferimento a una marea ipotetica di tipo sinusoidale con periodo di 12 ore oscillante tra le quote +0.5 e -0.5 m s.l.m.. Tale andamento è rappresentativo di una situazione di sizigia e, rispetto alle maree reali, consente, per le sue caratteristiche di periodicità e

regolarità, più agevoli confronti tra scenari diversi rispetto alle maree reali. La simulazione è stata estesa ad un periodo di 48 ore, le prime 24 delle quali sono state utilizzate, in pratica, per la "messa a regime" del sistema, in modo da far perdere di significato le condizioni iniziali.

Le altre condizioni al contorno, che peraltro, come si è già detto, sono praticamente ininfluenti sui risultati delle simulazioni ma che devono necessariamente essere assegnate, sono state mantenute invariate rispetto ai calcoli condotti in fase di taratura. In particolare, sulle sezioni di monte del Po di Tolle si sono attribuite, in via ipotetica, portate entranti costanti pari a 50 m³/s, intendendo in tale modo rappresentare condizioni ordinarie di regime di magra del suddetto ramo del Po.

Alcuni risultati ottenuti con il modello idrodinamico

La Figura 13 illustra i risultati ottenuti per i livelli di marea in alcuni punti scelti all'interno della laguna (Figura 12) e per le portate fluenti attraverso le due bocche e due transetti interni alla Sacca. Con riferimento ai livelli, risulta innanzitutto che l'oscillazione della marea in laguna si presenta sfasata alquanto in ritardo rispetto al mare, a causa evidentemente delle resistenze idrauliche che la propagazione dell'onda di marea incontra nel superamento delle bocche.

Tale ritardo, prendendo come riferimento l'istante in cui la marea attraversa la quota 0.0 m s.l.m. in fase crescente, si può valutare in poco più di 1 ora nel punto P1, situato poco lontano dalle bocche, e in quasi 1.5 ore per i punti P2 e P3



Figura 12: ubicazione dei punti e delle sezioni di riferimento per la rappresentazione grafica dei risultati delle simulazioni.

posti nelle parti più interne della Sacca.

Per i punti interni alla laguna si osserva anche un' apprezzabile attenuazione dell'ampiezza dell'oscillazione della marea. Rispetto al mare, l'escursione si riduce di più del 10% (da 1 m a 87 cm). Tale variazione è conseguente soprattutto all'attenuazione dei cavi, a causa dei maggiori effetti dissipativi che si realizzano in condizioni di bassa marea. Del tutto insignificanti sono gli effetti sui colmi che sostanzialmente non si riducono e tendono anzi, nel caso del punto P3 posto presso il margine lagunare, ad incrementarsi leggermente. È interessante osservare che, se sono molto accentuate le variazioni dell'onda di marea tra il mare e l'interno della laguna, le differenze fra i punti interni alla Sacca sono molto modeste, tanto da diventare quasi trascurabili se si confrontano i punti P2 e P3. Ne consegue che gli effetti dissipativi incontrati dalla marea nella sua propagazione in laguna sono, come si è detto, rilevanti solo nel superamento delle bocche.

All'interno del bacino, invece, tali effetti diventano praticamente trascurabili soprattutto nella parte settentrionale della Sacca, dove le profondità sono più elevate (mediamente -2.0÷-2.5 m) e la morfologia dei fondali è più uniforme. In definitiva, nelle parti più interne, la propagazione della marea è praticamente istantanea e l'oscillazione dello specchio liquido avviene in modo "quasi statico".

Con riferimento alle portate (Figura 13 e Tabella 1), i risultati del calcolo indicano che per una marea come quella considerata le portate massime fluenti attraverso la Bocca Nord sono di circa 850 m³/s, in fase di flusso, e di 675 m³/s, in fase di riflusso: esse sono leggermente superiori a quelle che attraversano

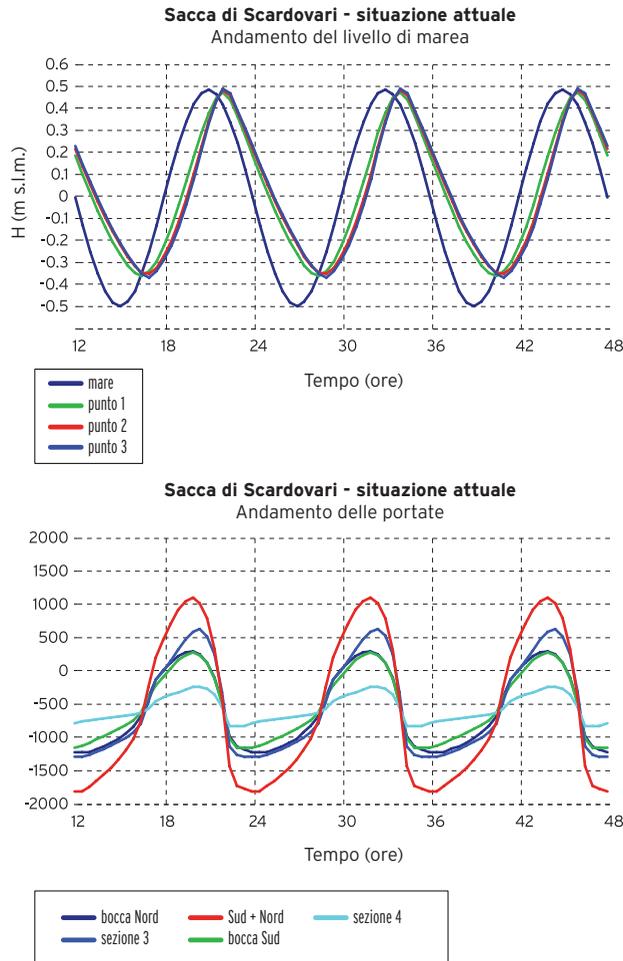


Figura 13: andamento dei livelli di marea e delle portate fluenti calcolati con il modello bidimensionale nei punti e nelle sezioni indicate in Figura 12.

	Bocca Nord	Bocca Sud	Somma Bocche	S3	S4
Qmax in (m ³ /s)	839	823	1661	1189	306
Qmax out (m ³ /s)	-677	-609	-1266	-744	-284
Volume scambiato (m ³ *106)	11.52	10.19	21.70	14.13	3.90

Tabella 1: portate massime in fase di flusso e riflusso e volumi complessivi scambiati in un semiciclo di marea nelle sezioni rappresentate in Figura 12.

la Bocca Sud. Risulta inoltre che i volumi complessivamente scambiati in un semiciclo di marea (6 ore) sono di circa $11.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per la Bocca Nord e di circa $10.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per la Bocca Sud.

In quest'ultimo caso si deve sottolineare che, come per la situazione precedentemente esaminata, la sezione della Bocca Sud considerata (Figura 12) non intercetta completamente i flussi entranti e uscenti dalla laguna, poiché nelle fasi di alta marea il cordone sabbioso che delimita la bocca sul lato occidentale viene sommerso ed è attraversato dalle correnti di marea in più punti. Tuttavia dal calcolo risulta che, anche considerando questo contributo, il risultato non cambierebbe sostanzialmente poiché il fenomeno di superamento comporta, in termini di volume scambiato attraverso la Bocca Sud, un incremento di meno del 5%.

In base a quanto riportato nella Tabella 1 le due bocche scambiano con il mare in un semiciclo di marea un volume complessivo di $21.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Considerando che la superficie del bacino sottesa dalle bocche è di circa 26.5 km^2 e che l'escursione del livello di marea all'interno del bacino è, mediamente, di poco più di 85 cm (Figura 13), secondo il calcolo il volume scambiato sarebbe di poco inferiore a quello che si otterrebbe considerando un comportamento del bacino di tipo "statico" con colmi e cavi interni ovunque coincidenti. In tale caso, infatti, il volume scambiato (definito a volte in letteratura anche "prisma di marea") risulterebbe pari a $22.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Per quanto riguarda le sezioni S3 e S4, che intercettano superfici più ridotte delle parti interne della laguna, le portate massime e i volumi scambiati si riducono progressivamente. Attraverso la

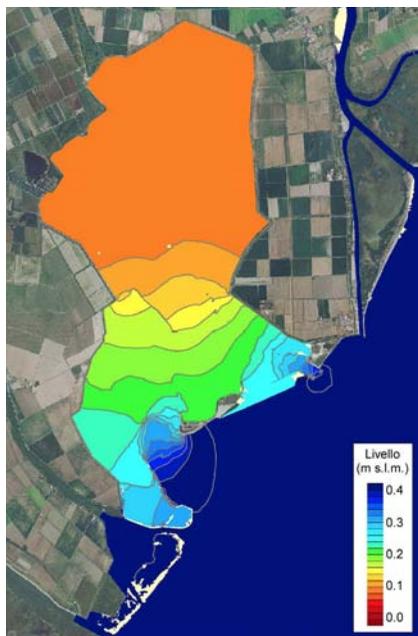


Figura 14: situazione attuale. Mappa dei livelli di marea calcolati con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso entrante (T=32 ore).

sezione S3, che sottende una porzione di laguna di circa 16.5 km^2 , il volume scambiato è di $14.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, mentre attraverso la sezione S4, che sottende una superficie di 4.35 km^2 , il volume scambiato è di $3.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. In entrambi i casi il rapporto tra volume scambiato e superficie è di circa 0.85 m, coincidente di fatto con l'escursione della marea all'interno della Sacca. Il risultato conferma quanto già evidenziato, ovvero che il comportamento della Sacca nel suo complesso si discosta poco da quello prevedibile con un modello "statico".

La dinamica della circolazione mareale nella Sacca è significativamente descritta dalle mappe che illustrano la distribuzione planimetrica dei livelli di

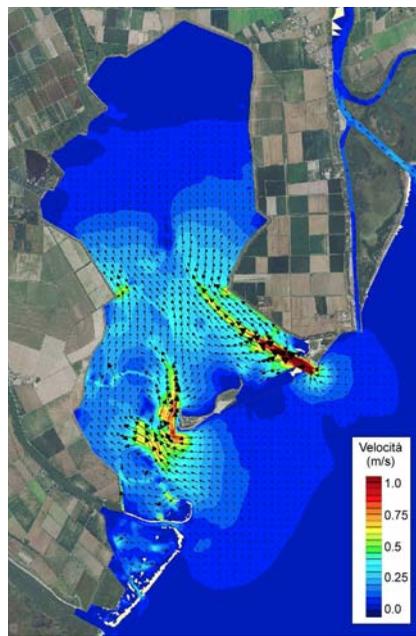


Figura 15: situazione attuale. Mappa della velocità delle correnti di marea calcolate con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso entrante.

marea e della velocità della corrente. Nell'istante di massimo flusso entrante (Figura 14), si nota come i gradienti dei livelli siano significativi solo in corrispondenza delle due bocche e nella parte meridionale della Sacca (Sacca di Bottonera), dove si esplica la quasi totalità degli effetti dissipativi. Nella parte settentrionale della Sacca (Sacca di Scardovari), invece, la superficie libera si dispone praticamente orizzontale.

Il campo delle velocità istantanee ottenute nella fase di massimo flusso entrante è illustrato nella Figura 15, nella quale il modulo e la direzione della velocità sono rappresentati rispettivamente con una scala di colori e con dei vettori (essendosi posto, nella rappresentazio-

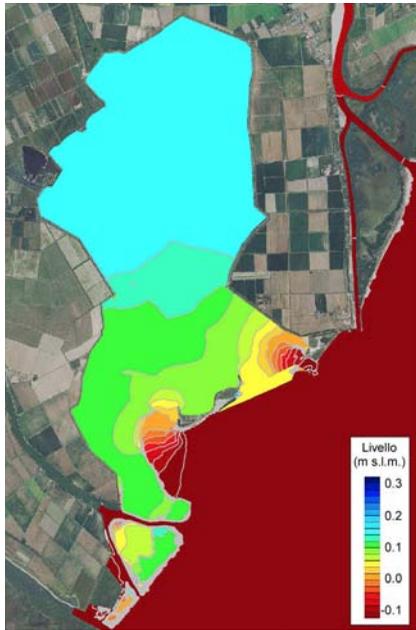


Figura 16: situazione attuale. Mappa dei livelli di marea calcolati con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso uscente (T=36.5 ore).

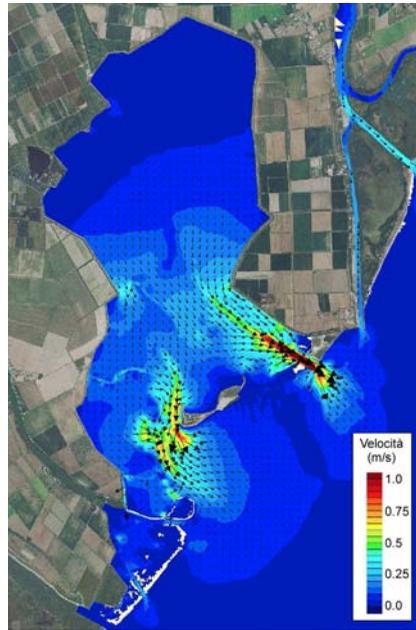


Figura 17: situazione attuale. Mappa della velocità delle correnti di marea calcolate con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso uscente.

ne dei vettori, il limite minimo di 5 cm/s). I valori della velocità sono rilevanti (maggiori di 0.75 m/s) solo in prossimità delle due bocche a mare, anche se le velocità rimangono significative in tutta la parte della Sacca più prossima alle bocche, soprattutto sul lato orientale. Si nota in particolare che lungo il canale che penetra in laguna dalla Bocca Sud le velocità restano superiori a 0.5 m/s fino all'incirca all'altezza di Punta Garbin, ossia della punta che segna in pratica la separazione tra le due parti (Bottonera e Scardovari) della laguna. Dai risultati ottenuti si evince inoltre che una parte consistente della corrente entrante dalla Bocca Sud tende a piegare verso est e a seguire una direttrice che si colloca al centro della Sacca di Bottonera. Conse-

guentemente è poco attiva la circolazione delle correnti a ridosso del margine occidentale della Sacca. Questa situazione è determinata dalla presenza della barriera sommersa costituita dal relitto del vecchio argine che, prima dello sprofondamento dovuto alla subsidenza, conterminava la porzione di laguna denominata "area Canestro".

La circostanza trova conferma in quanto evidenziato dalle misure correntometriche, che indicano come la circolazione delle correnti di marea sia apprezzabilmente più intensa sul lato orientale della Sacca rispetto al lato occidentale. Nella gran parte degli specchi d'acqua della Sacca di Scardovari, soprattutto verso il margine settentrio-

nale, infine, l'intensità delle correnti mareali è molto modesta, di fatto quasi trascurabile. Nelle Figure 16 e 17 sono rappresentati i campi di livello e di velocità nella fase di flusso uscente. Essendo la marea considerata di tipo sinusoidale, le condizioni idrodinamiche che si verificano sono, nella sostanza, analoghe a quelle ottenute per la fase di flusso entrante, anche se con gradienti di livello e le velocità massime in generale inferiori, come è ovvio attendersi.

Risultati del modello lagrangiano-dispersivo

Le simulazioni con il modello idrodinamico bidimensionale mettono in evidenza che in una considerevole parte degli specchi d'acqua della Sacca di Scardovari, verso il margine settentrionale, l'intensità delle correnti mareali è molto modesta e praticamente trascurabile in tutte le fasi della marea. La ridotta attività delle correnti di marea è da ritenersi tra le principali cause dei ricorrenti problemi di scarso ricambio che si verificano in questa parte del bacino, che danno origine sia a crisi anossiche, soprattutto nelle stagioni più calde, sia al ristagno delle acque dolci, introdotte in laguna in occasione delle piene del Po e in presenza di campi di vento particolari. Per evidenziare più chiaramente questi aspetti è stata effettuata una simulazione con un modello lagrangiano dispersivo, che permette di analizzare il trasporto e la diffusione di un certo numero di particelle inizialmente rilasciate all'interno della laguna, che si muovono per effetto combinato del "trasporto convettivo" indotto dalla corrente di marea e di una componente "dispersiva" introdotta per tener conto, almeno in prima approssimazione, degli effetti di mescolamento che si manifestano per effetto della natura turbolenta del moto.

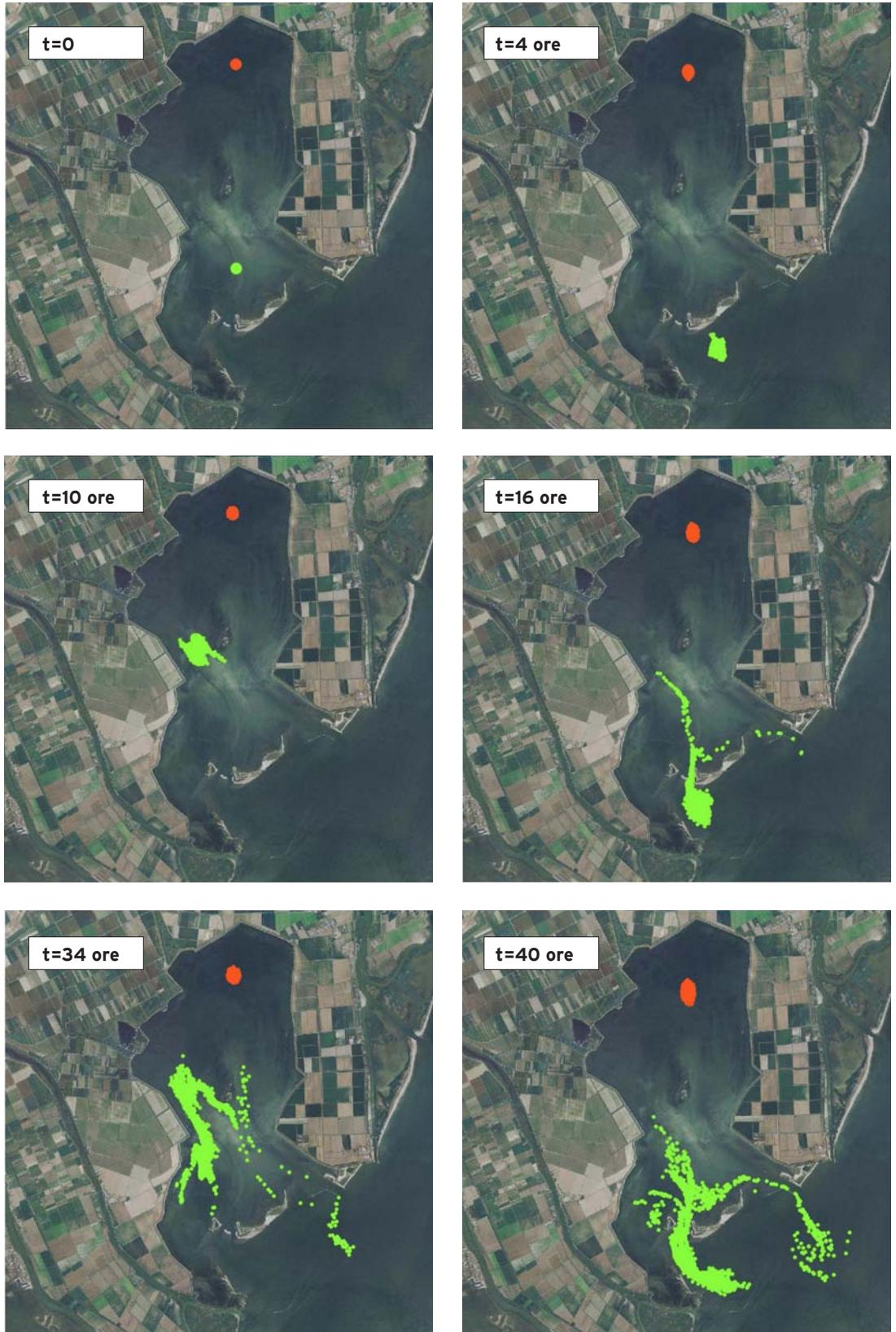


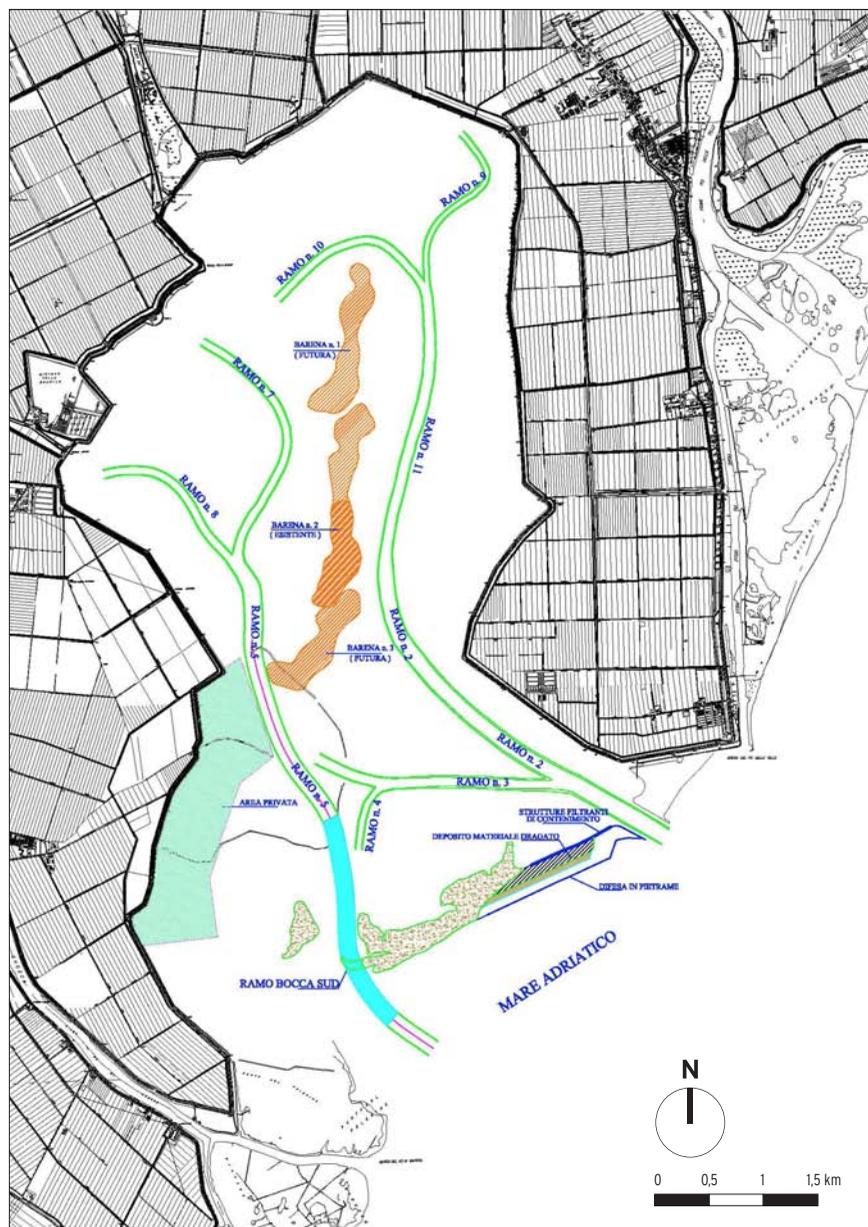
Figura 18:
situazione attuale.
Simulazione
del trasporto
di particelle
con il modello
lagrangiano per la
marea sinusoidale
semidiurna
oscillante tra ± 0.5 m
s.l.m..

Nello specifico il calcolo è stato effettuato rilasciando 2 “macchie” ciascuna composta da 4000 particelle in due diverse posizioni dello specchio lagunare appartenenti rispettivamente alla Sacca di Bottonera e alla Sacca di Scardovari vera e propria (parte più settentrionale della Sacca).

La Figura 18 rappresenta la posizione delle particelle in diversi istanti della simulazione, utilizzando come forzante una marea sinusoidale semidiurna di ampiezza pari a 1 m e di periodo pari a 12 ore. Le immagini mostrano il risultato del calcolo all’incirca negli istanti in cui il flusso si inverte e le particelle si trovano alla massima distanza dalla loro posizione iniziale.

Anche se l’efficacia della rappresentazione è limitata dal ridotto numero di istanti considerati, dalle immagini si evince come le particelle poste in prossimità della bocca (colore verde), siano quelle soggette alla dinamica più intensa e tendano a muoversi alternativamente dentro e fuori la bocca stessa. Gli effetti dispersivi del moto tendono a loro volta a differenziare le traiettorie delle particelle, che progressivamente sono soggette a distanziarsi in misura accentuata.

Si nota viceversa come le particelle rilasciate nella parte settentrionale del bacino (colore arancio) non si spostino sostanzialmente dalla loro posizione iniziale. Il risultato sta a indicare che i fenomeni convettivi e quelli dispersivi legati alle correnti di marea e alla turbolenza del moto, assumono in tali aree intensità molto ridotte. Se ne conclude che in questa parte della laguna sono eventualmente solo i fenomeni dispersivi indotti dal vento a garantire un più efficace ricambio delle acque.

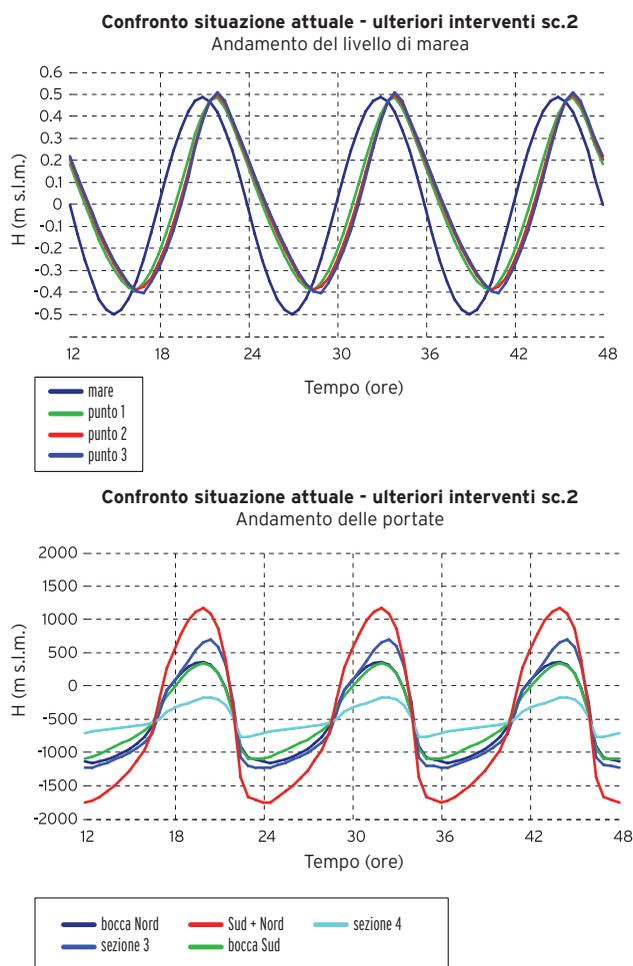


Effetti di un ulteriore stralcio di interventi

Il progetto generale degli interventi previsti nell’ambito dei progetti P.I.M. per la sistemazione e il miglioramento del regime idraulico della Sacca di Scardovari, accanto all’apertura della Bocca nord prevedeva lo scavo di un sistema di canali, la realizzazione all’interno della

Figura 19: planimetria del complesso degli interventi previsti dal progetto di vivificazione della Sacca.

Figura 20: ulteriore stralcio degli interventi previsti - scenario 2. Andamento del livello di marea e della portata fluente calcolato con il modello bidimensionale nei punti e nelle sezioni indicate in Figura 12.



laguna in posizione mediana di un setto di barene e la costruzione di uno sbarramento manovrabile al limite della Sacca di Bottonera, in grado di intercettare completamente il flusso delle correnti di marea in ingresso alla Sacca di Scardovari vera e propria attraverso la sua parte occidentale (Figura 19).

Nel complesso i provvedimenti suggeriti rendevano concreta la possibilità di ricambiare attivamente anche le acque della parte più settentrionale della Sacca mediante un'opportuna manovra dello sbarramento, che intercettasse completamente le correnti di marea nella fase di flusso e consentisse di ali-

mentare anche questa zona della laguna attraverso i canali e i bassifondi della parte orientale della Sacca, lasciando invece la corrente evolversi naturalmente nella successiva fase di riflusso. La manovra, ripetuta a ogni ciclo di marea, avrebbe indotto una circolazione secondaria in senso antiorario, permettendo di ricambiare completamente in pochi cicli di marea le acque della parte settentrionale della Sacca ed eliminando i problemi che ancor oggi si osservano e che possono comportare conseguenze pesantemente negative sulle attività della molluschicoltura. Nonostante l'approvazione del Progetto Generale di sistemazione della Sacca, solo una mini-

ma parte degli interventi previsti è stata attuata. È concreta la possibilità che nei prossimi anni, per ragioni di carattere economico ma anche per considerazioni di altro genere (che, diversamente da allora, rendono accettabili penalizzazioni in ambito produttivo), solo una minima parte di quei provvedimenti venga realizzata. È probabile, in particolare, che non si proceda più alla realizzazione dello sbarramento e si rinunci definitivamente alla possibilità di attivare i processi di ricambio delle acque nella parte più settentrionale della Sacca, forzando opportunamente la circolazione delle correnti di marea. Con queste prospettive, è sembrato di un qualche interesse valutare entro quali limiti e con quali benefici si possano perseguire, in misura più ridotta evidentemente, gli obiettivi di quel progetto, realizzando solo gli interventi che non introducono una artificializzazione eccessiva del regime delle correnti all'interno della Sacca, ma si limitino al più a considerare modeste modificazioni della struttura morfologica della laguna, maggiormente rispettose della "naturalità" dell'ambiente costiero.

Completamento dello scavo dei canali, costruzione del setto di barene e scavo della Bocca Sud

Tra gli scenari sicuramente compatibili con la "naturalità" della Sacca può collocarsi quello che prevede di completare lo scavo dei canali interni secondo il progetto originale del programmi P.I.M. e la realizzazione del setto di barene disposto in direzione sud-nord in modo da dividere gli specchi d'acqua della Sacca di Scardovari vera e propria e da indurre, come conseguenza del solo fenomeno propagatorio, una circolazione secondaria delle correnti di marea (Scenario 1). In aggiunta a tali provve-

		attuale	ulteriori interventi sc.1		ulteriori interventi sc. 2		ulteriori interventi sc. 3	
Bocca Nord	Qmax in (m ³ /s)	839	897	6.9%	880	5.0%	880	5.0%
	Qmax out (m ³ /s)	-677	-717	5.9%	-706	4.3%	-700	3.5%
	Volume scambiato (m ³ *10 ⁶)	11.52	12.46	8.2%	12.25	6.4%	12.24	6.3%
Bocca Sud	Qmax in (m ³ /s)	823	807	-2.0%	852	3.5%	861	4.6%
	Qmax out (m ³ /s)	-609	-598	-1.8%	-632	3.7%	-634	4.1%
	Volume scambiato (m ³ *10 ⁶)	10.19	9.93	-2.5%	10.62	4.3%	10.67	4.8%
Somma Bocche	Qmax in (m ³ /s)	1661	1704	2.5%	1730	4.1%	1738	4.6%
	Qmax out (m ³ /s)	-1266	-1286	1.6%	-1314	3.8%	-1312	3.6%
	Volume scambiato (m ³ *10 ⁶)	21.70	22.39	3.2%	22.87	5.4%	22.91	5.6%
sezione S3	Qmax in (m ³ /s)	1189	1148	-3.4%	1166	-2.9%	1166	-2.0%
	Qmax out (m ³ /s)	-744	-766	3.0%	-779	4.7%	-782	5.0%
	Volume scambiato (m ³ *10 ⁶)	14.13	14.40	2.0%	14.66	3.8%	14.69	4.0%
sezione S4	Qmax in (m ³ /s)	306	311	1.7%	317	3.7%	317	3.5%
	Qmax out (m ³ /s)	-284	-266	-6.3%	-267	-5.9%	-269	-5.3%
	Volume scambiato (m ³ *10 ⁶)	3.90	4.01	2.7%	4.11	5.1%	4.11	5.3%

Tabella 2: confronto tra le portate massime in fase di flusso e riflusso e i volumi complessivi scambiati in un semiciclo di marea nelle sezioni rappresentate in Figura 12, per i diversi scenari considerati.

dimenti si può ipotizzare di intervenire con operazioni di dragaggio sulla Bocca Sud per portarne i fondali attuali almeno alla quota di -2.5 m s.l.m., attivandola maggiormente rispetto alla Bocca Nord (Scenario 2).

Agli interventi sopra descritti, si può aggiungere eventualmente anche l'eliminazione dell'ostacolo costituito dal relitto della conterminazione della più volte citata "area Canestro", che occupa la parte occidentale della Sacca di Bottonera. In questo modo si potrebbe

favorire la penetrazione delle correnti di marea lungo la parte occidentale della Sacca (Scenario 3). I risultati del calcolo evidenziano, per la marea di riferimento sinusoidale assunta, come il complesso degli interventi previsti in tutti i casi esaminati non influenzi sensibilmente l'andamento dei livelli di marea all'interno della Sacca (Figura 20 in alto) e comporti modificazioni limitate (qualche per cento) delle portate fluenti attraverso le bocche e di quelle scambiate tra la Sacca di Bottonera e la Sacca di Scardovari vera e propria (Figura 20

in basso, Tabella 2). Più significativi sono gli effetti dei provvedimenti sulla distribuzione istantanea dei livelli di marea e dei loro gradienti in fase di massimo flusso e riflusso di marea (Figura 21-23). Rispetto alla situazione attuale, i gradienti di livello tendono a differenziarsi maggiormente nella Sacca di Scardovari vera e propria. Come conseguenza sono maggiormente attivate anche le velocità in questa parte della laguna, in fase sia di flusso (Figura 22) che di riflusso (Figura 24).

Si riscontra anche la tendenza ad uno spostamento in senso antiorario della fascia di partiacque, con la parte di laguna idraulicamente più lontana dalle bocche, che tende ad essere ora alimentata da acque provenienti soprattutto dalla Bocca Nord (Figura 22-24). Ai fini del ricambio delle acque, particolarmente significativi e di interpretazione immediata sono i risultati ottenuti esaminando con il modello lagrangiano- dispersivo il movimento di una macchia di particelle rilasciata inizialmente in due diverse posizioni della Sacca (Figura 25-26).

Il confronto con la situazione attuale mette in evidenza un'apprezzabile accentuazione dei fenomeni dispersivi per la Sacca di Bottonera. Anche per gli specchi d'acqua della parte più settentrionale della laguna si registrano effetti dispersivi maggiori, ma comunque ben lontani da quelli che la completa attuazione del progetto P.I.M. nella sua formulazione originale sarebbe in grado di garantire. Il dragaggio, sia pur modesto, previsto per la Bocca Sud, associato allo scavo dei canali interni (Scenario 2) migliora le condizioni del flusso delle correnti di marea soprattutto nella Sacca di Bottonera. Il risultato è facilmente intuibile ed è conseguente alle maggiori portate scambiate attraverso la Bocca

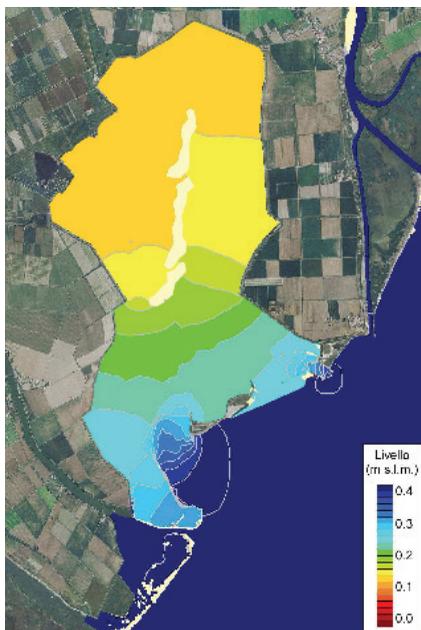


Figura 21: ulteriore stralcio degli interventi previsti - scenario 2. Mappa dei livelli di marea calcolati con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso entrante (T=32 ore).

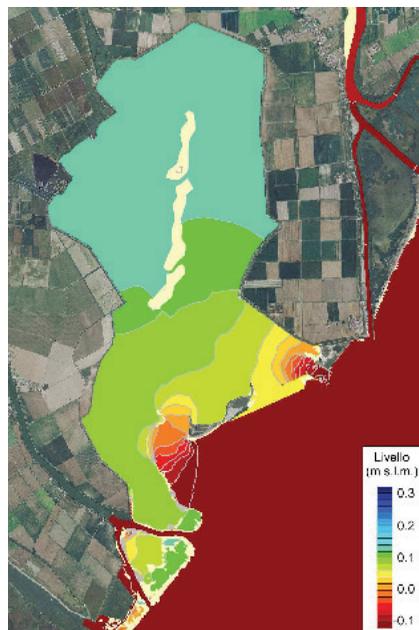


Figura 22: ulteriore stralcio degli interventi previsti - scenario 2. Mappa dei livelli di marea calcolati con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso uscente (T=36.5 ore).

Sud (Tabella 2). Restano invece sempre modesti i benefici per gli specchi d'acqua della Sacca di Scardovari vera e propria, per i quali permangono condizioni di ricambio problematiche per i motivi ripetutamente ricordati. Si tratta di condizioni che generalmente non comportano pesanti riflessi negativi sulla qualità delle acque. In casi eccezionali, tuttavia, o per situazioni di temperatura elevata, come può verificarsi nei mesi estivi, o per eccessiva dolcificazione delle acque, come può accadere quando crescono in misura importante le portate dei rami del Po di Tolle e del Po di Gnocca, non si possono escludere problemi alle attività della mitilicoltura, del tutto analoghi a quelli che si sono registrati in anni recenti.

EFFETTI DI VARIAZIONI DELL'OFFICIOSITÀ DELLE FOCI DEI RAMI DEL PO

Oltre che per l'analisi della circolazione delle correnti mareali nella Sacca di Scardovari, il modello bidimensionale ad elementi finiti è stato impiegato per analizzare il funzionamento idraulico del tratto terminale del Po e dei rami che ne costituiscono il sistema deltizio, due dei quali, il Po di Gnocca e il Po di Tolle, sfociano in mare proprio a ridosso del litorale che delimita la laguna. Uno di essi, il Po di Tolle, è stato oggetto di interventi con l'intento di agevolare il convogliamento al mare delle portate di piena mediante l'apertura di un nuovo ramo (la

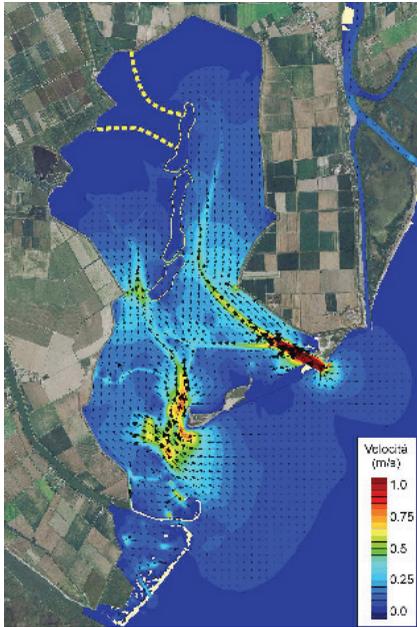


Figura 23: ulteriore stralcio degli interventi previsti - scenario 2. Mappa della velocità delle correnti di marea calcolate con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso entrante. In giallo sono indicati i limiti della fascia di partiacque.

Busa Storiona), senza valutare altre conseguenze dell'intervento stesso e in particolare quelle dovute allo spostamento in altra posizione sul litorale del punto di recapito dei sedimenti convogliati dalla corrente fluviale.

Il modello bidimensionale del tratto terminale del Po e dei suoi rami

L'implementazione del modello è avvenuta a partire da una schematizzazione finalizzata alla valutazione delle condizioni di navigabilità del fiume in funzione del progetto di riconversione della centrale termica di Porto Tolle. Il dominio di calcolo (Figura 27) compren-

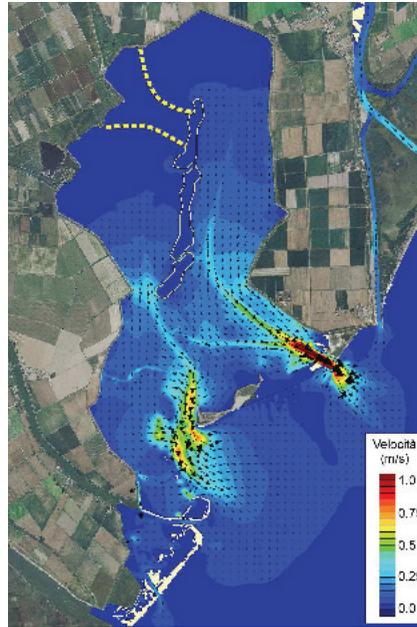


Figura 24: ulteriore stralcio degli interventi previsti - scenario 2. Mappa della velocità delle correnti di marea calcolate con il modello bidimensionale nell'istante di massimo flusso uscente. In giallo sono indicati i limiti della fascia di partiacque.

de del tratto terminale del Po (Po di Venezia e Po di Pila), a partire dall'ansa di Corbola e fino al mare (circa 42 km), e i 6 rami in cui il fiume si suddivide nel suo tratto terminale (Po di Gnocca, Po di Maistra, Po di Tolle, Busa Dritta, Busa di Tramontana e Busa di Scirocco). Date le finalità dell'indagine il modello era stato a suo tempo utilizzato per analizzare il funzionamento idraulico del sistema principalmente in condizioni di magra. Esso può essere tuttavia convenientemente dedicato anche a indagini relative a situazioni di piena, per analizzare il campo di moto bidimensionale e i relativi fenomeni di trasporto solido al fondo e in sospensione, nonché quelli di esondazione nel caso di eventi estremi.

Nello specifico lo schema implementato può essere generalizzato e consentire simulazioni con il modello 3D multistrato, una volta definito il numero di strati in cui si vuole suddividere la colonna d'acqua e le dimensioni di ciascuno strato. Pertanto è possibile condurre con il modello messo a punto simulazioni sulla dinamica delle correnti stratificate per indagare, ad esempio, i fenomeni di risalita del cuneo salino lungo i diversi rami del Po e l'eventuale interazione fra le acque dolci portate dai diversi rami del delta del fiume e le acque salate del mare che le accoglie. La geometria delle sezioni dei diversi rami del Delta è stata sostanzialmente ricostruita tramite i dati resi disponibili dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po di Parma (A.I.PO) e dall'Enel, che, sia pure in epoche diverse, hanno eseguito campagne di rilievi topo-batimetrici lungo il fiume.

Alcune informazioni riassuntive sui dati utilizzati per la modellazione matematica sono sintetizzati nel seguente elenco, in cui per ciascun ramo del delta del fiume sono riportati il numero di sezioni disponibili e la fonte dei dati stessi:

- Po di Venezia, Po di Pila, Busa Dritta: per il ramo principale del Po, che varia il suo idronimo procedendo verso valle, si sono considerate le sezioni rilevate negli anni 1998-1999 nell'ambito dello studio "Aggiornamento delle sezioni e dei profili del fiume Po e delle sue arginature" a cura del Ministero dei Lavori Pubblici - Magistrato per il Po - Parma, messe a disposizione dall'A.I.PO. In particolare si sono utilizzate 25 sezioni, dalla n. 75A nel Po di Venezia all'altezza dell'abitato di Corbola, fino alla n. 90 in corrispondenza dello sbocco della Busa Dritta in mare;

- Po di Gnocca: per questo ramo se-

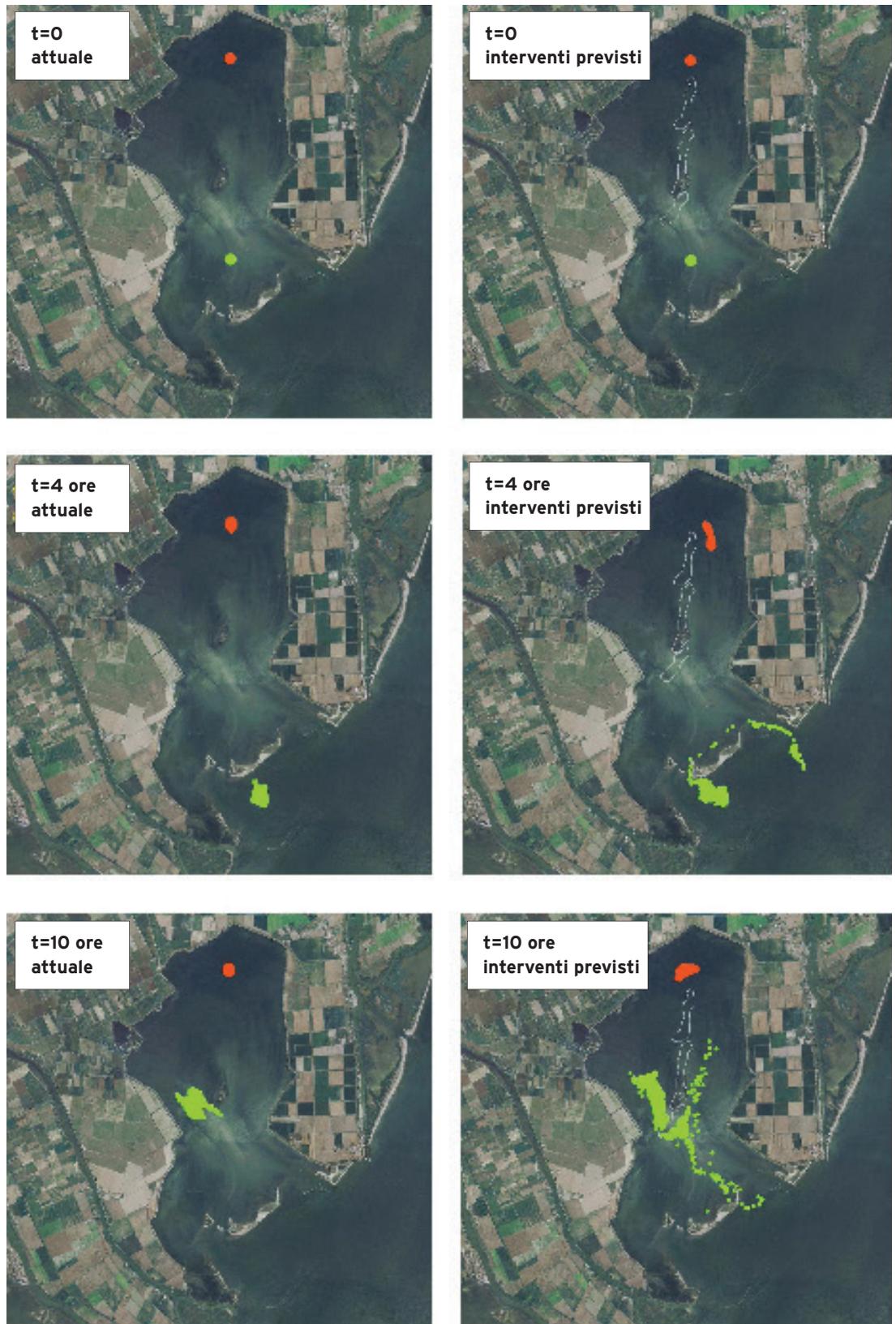


Figura 25: confronto situazione attuale-interventi previsti (sc.2). Simulazione del trasporto di particelle con il modello agrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m.

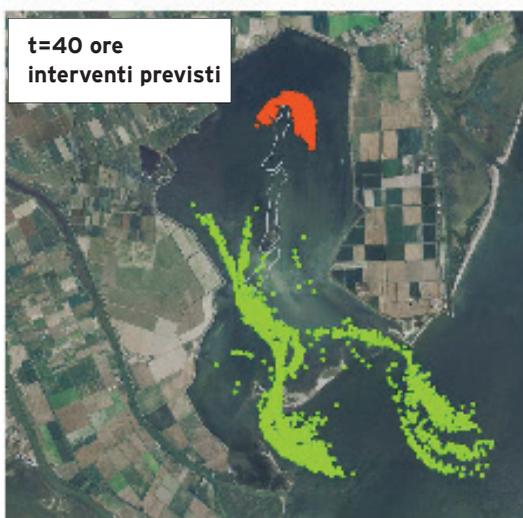
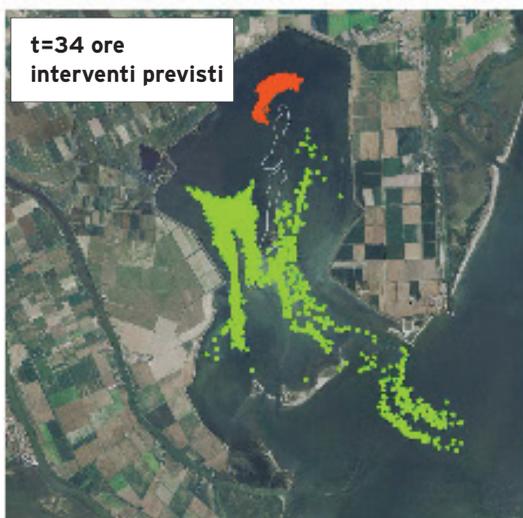
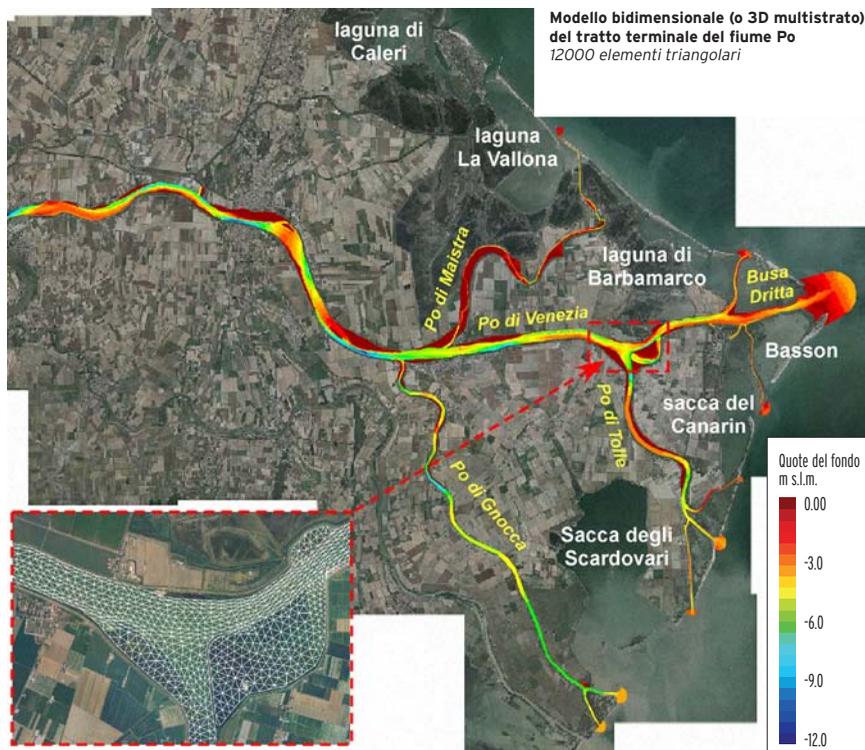


Figura 26: confronto situazione attuale-interventi previsti (sc.2). Simulazione del trasporto di particelle con il modello agrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m..

Figura 27: modello bidimensionale ad elementi finiti del tratto terminale del Po e dei rami deltizi a valle dell'ansa di Corbola.



condario del fiume si sono considerate 40 sezioni topografiche a partire dalla sua diramazione fino allo sbocco in mare, messe a disposizione da AIPO, rilevate nel 1996;

- Po di Maistra: per tale ramo secondario in sinistra del fiume si è fatto riferimento a 25 sezioni a partire dalla sua diramazione a Ca' Venier fino allo sbocco in mare, messe a disposizione da AIPO, rilevate nel 1996;

- Po di Tolle e Busa del Bastimento: per l'alveo di tale ramo del fiume, a partire dalla sua diramazione dal Po di Venezia fino alla sua successiva diramazione della Busa del Bastimento, si sono considerate 36 sezioni messe a disposizione da AIPO, rilevate nel 1996. Per il tratto terminale del Po di Tolle, fino allo sbocco in mare a Porto Barricata, e per la diramazione della Busa del Bastimento, si è invece fatto riferimento rispettivamente

a 28 sezioni ed a 13 sezioni rilevate nel 1989 a cura del Magistrato per il Po - Ufficio Operativo di Rovigo nell'ambito dei "Lavori di sistemazione della foce del Po delle Tolle in località Bonelli";

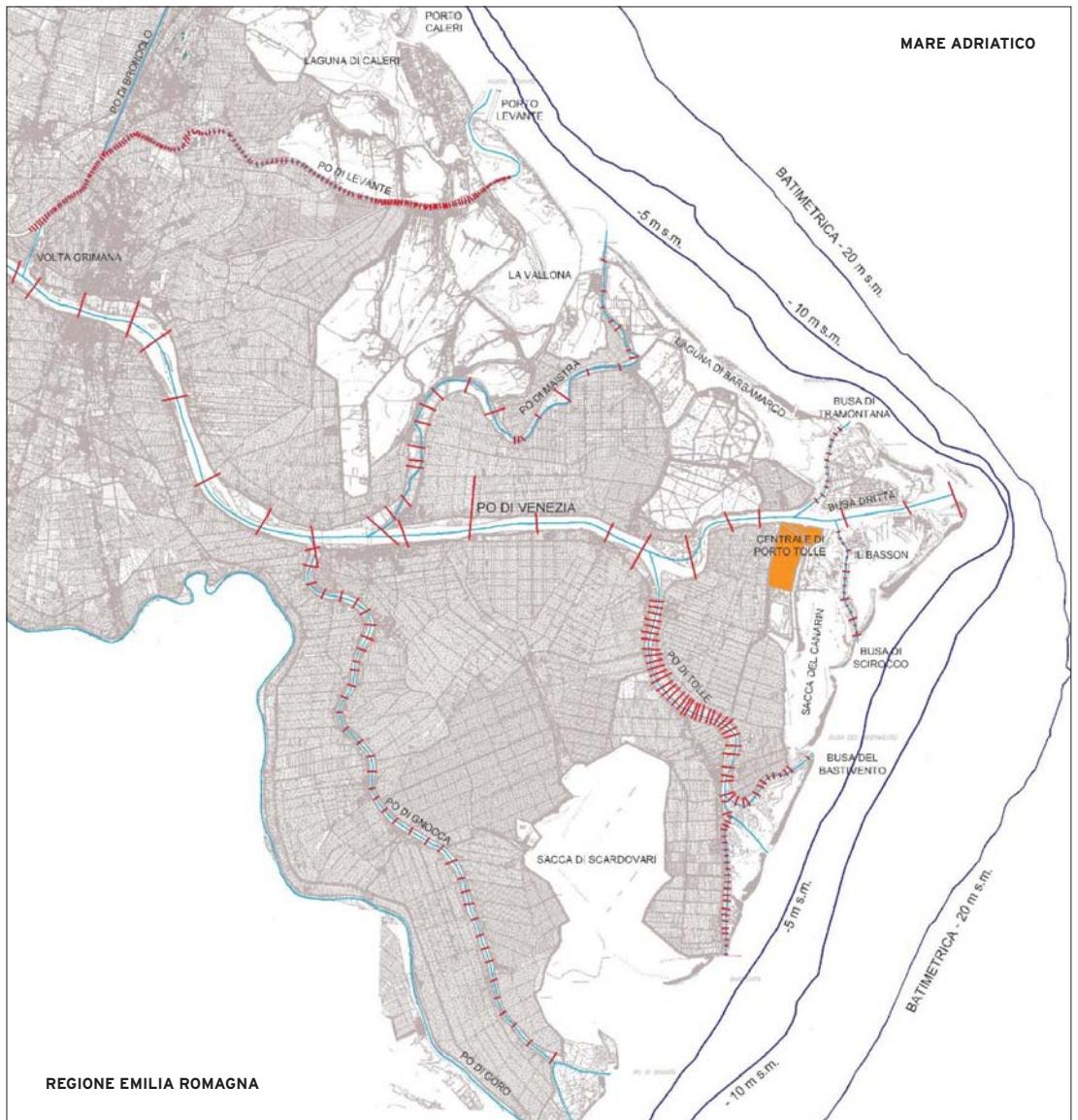
- Busa di Tramontana: per la schematizzazione con il modello matematico dell'ultimo ramo del fiume che si diparte in sinistra del Po all'altezza dell'abitato di Pila, si sono considerate 12 sezioni rilevate nel 1972 dall'Enel nell'ambito degli studi propedeutici alla realizzazione della centrale di Porto Tolle;

- Busa di Scirocco: per tale ramo, che si sviluppa fra la Sacca del Canarin e il Basson, in destra della Busa Dritta, a valle della centrale di Porto Tolle, si sono considerate 17 sezioni rilevate nel 1972 dall'Enel nell'ambito degli studi preliminari per la realizzazione della centrale stessa. La Figura 28 rappresenta l'ubicazione delle sezioni sopraelencate.

La schematizzazione dei vari rami fluviali si è basata, oltre che sugli elementi geometrici appena ricordati, anche su foto aeree, per verificare l'assetto planimetrico degli alvei, e sulla Carta Tecnica Regionale numerica in scala 1:5000, utilizzata per definire le quote delle aree di golena comprese tra una sezione e la successiva. La distribuzione delle sezioni disponibili (Figura 28) fornisce un'accettabile copertura del dominio di calcolo.

Si deve comunque evidenziare che le sezioni, ad eccezione di quelle relative al Po di Venezia-Po di Pila, derivano da rilievi molto datati e potrebbero fornire una rappresentazione della geometria del sistema non del tutto attuale. Per aggiornare la schematizzazione dei diversi rami del fiume, sono stati reperiti i più recenti rilievi disponibili, che consistono in una serie di sezioni effettuate sul ramo principale del Po e sugli altri rami

Figura 28: corografia del delta del fiume Po con la posizione delle sezioni topografiche dei corsi d'acqua raccolte presso gli enti competenti.



del Delta nel 2005 a cura di A.I.PO. e di ARPAV (Figura 29).

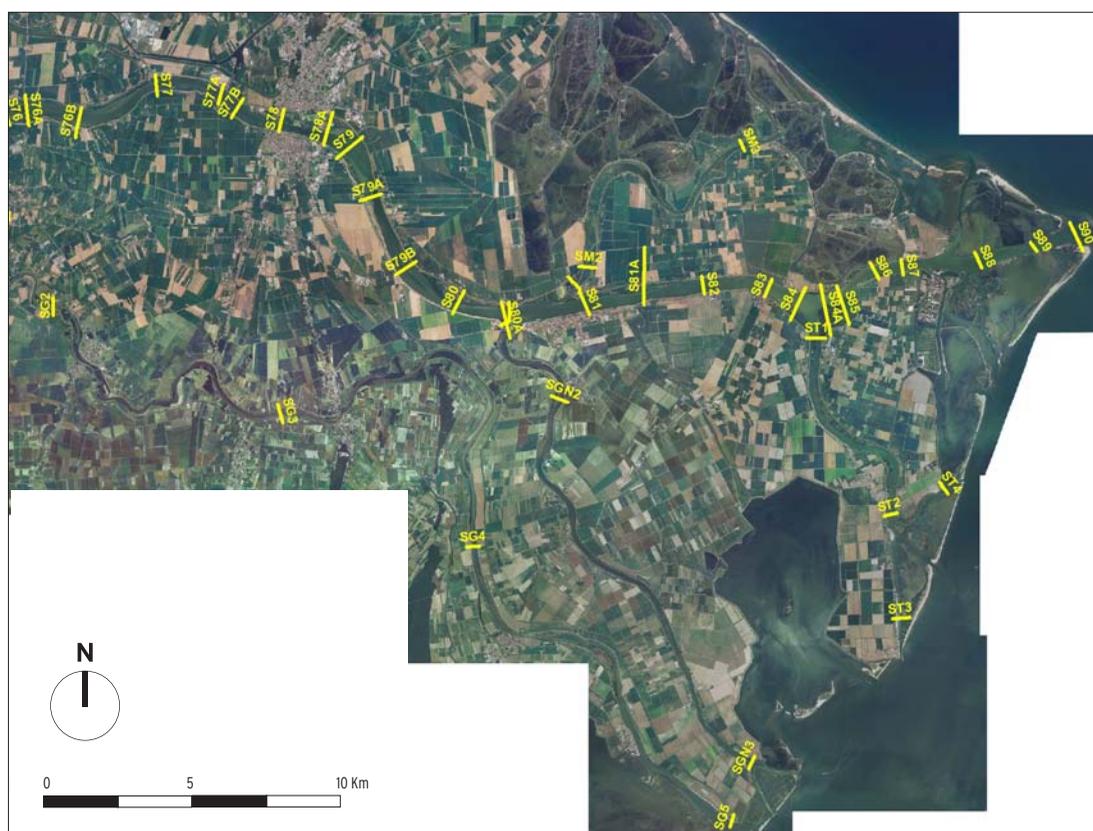
Esaminando l'ubicazioni di queste ultime sezioni si rileva da una parte che le sezioni sul Po di Venezia-Po di Pila sono collocate sulle medesime tracce di quelle precedenti (Figura 28), dall'altra che le sezioni sui rami secondari sono in numero insufficiente (3 sezioni sul Po di Gnocca, 3 sul Po di Maistra, 4 sul sistema Po di Tolle - Busa Bastimento - Busa

Storiona, nessuna su Busa di Scirocco e Busa di Tramontana) per fornire da sole una descrizione soddisfacente della geometria dei rami stessi. Per tale ragione non si è ritenuto opportuno in alcuni casi procedere all'aggiornamento della geometria originale del modello. Tanto più che da alcuni controlli effettuati in via preliminare è risultato che la geometria introdotta nello schema si può ritenere idraulicamente equivalente a quella che si otterrebbe utilizzando i nuovi dati.

Il modello dei rami terminali del Po, delle lagune e della fascia costiera

La necessità di stimare non solo le portate transitanti attraverso i rami del Po, e in particolare lungo il Po di Tolle e le sue diramazioni, ma anche il conseguente trasporto di sedimenti in corrispondenza delle foci, ha reso necessario l'ampliamento del modello bidimensionale dei rami del Po in modo da include-

Figura 29:
ubicazione delle
nuove sezioni (rilievo
2005) fornite da
Arpav.



re nel dominio di calcolo un'ampia fascia di mare aperto di fronte alle foci stesse.

In tal modo, è possibile descrivere più realisticamente il trasporto e la diffusione del materiale solido trasportato in sospensione dalle correnti fluviali. Al tempo stesso, è possibile affrontare con il calcolo l'analisi degli effetti del trasporto solido litoraneo dovuto all'azione delle correnti indotte dal moto ondoso e alle loro interazioni con le foci del Delta e delle sue lagune in genere. Se si considera la dinamica del trasporto solido per effetto combinato delle portate fluviali e del moto ondoso, il comportamento delle foci fluviali interferisce spesso con quello delle adiacenti bocche lagunari. Per questa ragione è opportuno che il reticolo di calcolo del modello includa anche le lagune, in modo da valutare

eventualmente l'influenza dei rami del delta sui flussi scambiati attraverso le bocche lagunari per effetto della marea.

Il modello bidimensionale consente di fatto di analizzare l'insieme di questi fenomeni nella loro complessa interazione, con il solo limite dell'onere computazionale nel caso in cui il dettaglio della griglia richieda un passo di calcolo ridotto, a fronte di un numero di nodi molto elevato.

Un'applicazione preliminare del modello secondo il suddetto approccio, con obiettivi di carattere generale più che locali, è stata effettuata nell'ambito di uno studio svolto nel 2006 per conto del Consorzio di Bonifica Delta del Po [11]. In tale indagine, incentrata sul regime dei litorali antistanti le lagune di Barbaramar-

co e del Canarin, il modello bidimensionale del Po era già stato ampliato con l'inserimento nel suo dominio delle Sacche del Canarini e di Scardovari.

Nell'ulteriore aggiornamento predisposto, a partire dalla linea di spiaggia, il dominio di calcolo è stato esteso verso il mare aperto, in modo da includere tutta la fascia costiera prevedibilmente interessata dalla circolazione delle correnti dovute alla marea e di quelle generate dal moto ondoso. Tale fascia ha una profondità media di circa 8 km, e si estende in alcuni punti del bordo esterno verso il mare fino alla batimetrica -25.00 m s.l.m..

Tenendo conto degli scopi dell'indagine, incentrata in modo particolare nel valutare il ruolo del Po di Tolle e degli

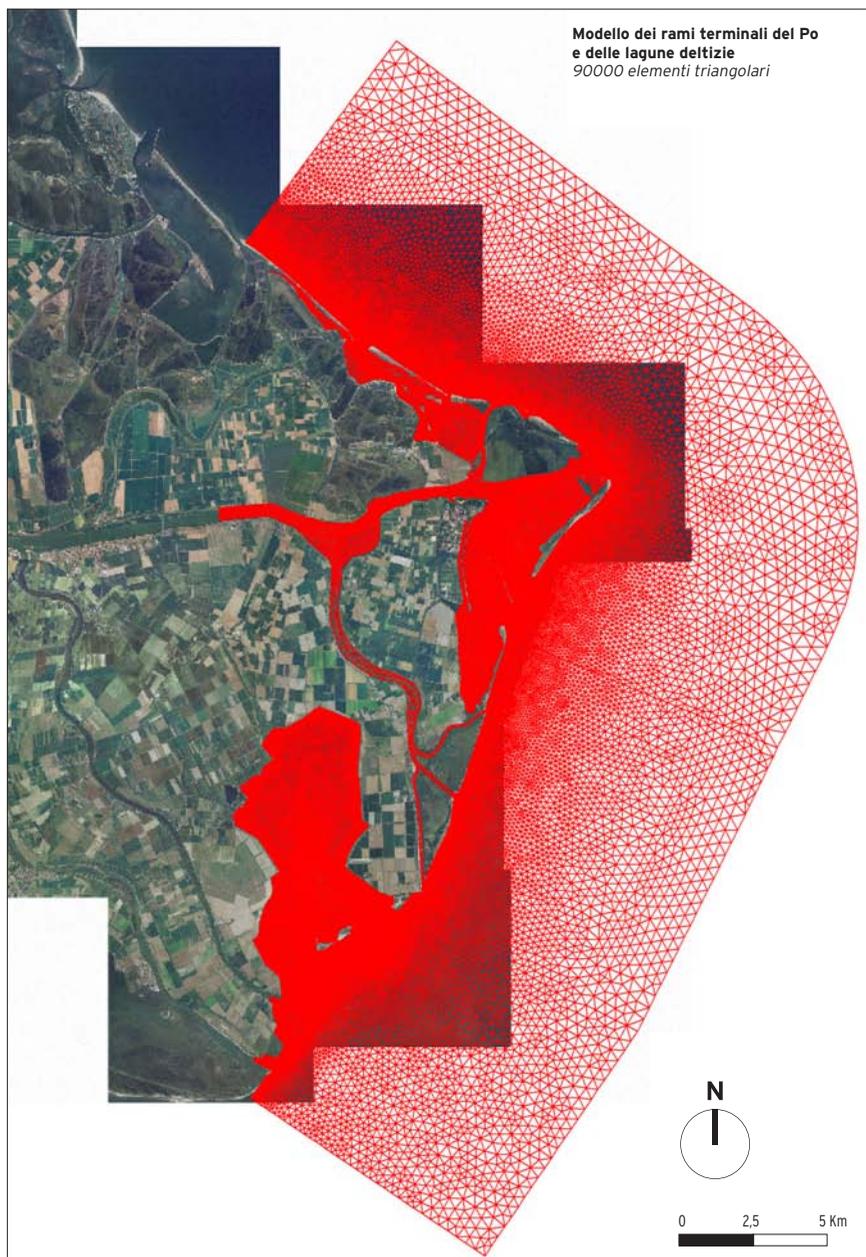


Figura 30: modello bidimensionale dei rami terminali del delta del Po, delle lagune e del mare antistante (tratto dallo studio Matteotti-D'Aipaos del 2006 [11]) completato con l'aggiunta della Sacca di Scardovari e del braccio di mare antistante.

interventi più recenti attuati su di esso, il modello generale dei rami del Delta è stato ridotto escludendo dal calcolo i rami non direttamente coinvolti nei fenomeni indagati. La sezione di monte del modello è stata perciò fissata a valle dell'incile del Po di Maistra, escludendo dal calcolo, oltre a quest'ultimo ramo, anche quello del Po di Gnocca.

In definitiva, il modello predisposto copre una superficie di circa 343 km² e si compone di circa 26600 nodi e 50500 elementi triangolari. Esso comprende ovviamente anche la Sacca di Scardovari e il litorale ad essa antistante. A tale scopo si è provveduto ad assemblare il reticolo di calcolo messo a punto nello studio [11] con quello predisposto per l'analisi della circolazione nella Sacca e qui illustrato. Il reticolo di calcolo risultante è rappresentato in Figura 30. Esso copre una superficie di circa 450 km², si compone di circa 46500 nodi e di circa 90000 maglie triangolari.

La Figura 31 fornisce una rappresentazione a scala di colori della batimetria del dominio di calcolo. Si può osservare come il reticolo predisposto sia molto dettagliato. Le dimensioni dei lati delle maglie variano da un minimo di circa 5 m, dove la geometria del sistema è descritta con la risoluzione più elevata, a un massimo di circa 500 m, per le maglie più grandi poste a ridosso del bordo esterno in mare. Oltre che lungo i litorali e in corrispondenza delle foci e delle bocche lagunari, le dimensioni delle maglie sono generalmente molto ridotte anche all'interno di tutte le lagune. Sono in tal modo consentite simulazioni molto dettagliate di fenomeni che non possono prescindere dall'interazione tra il campo di moto in mare e quello negli specchi d'acqua interni. Ci si riferisce in particolare ai fenomeni di trasporto

(salinità, trasporto solido in sospensione, diffusione di sostanze conservative e non) e agli effetti sulla circolazione indotti dall'azione del vento.

Con queste caratteristiche del reticolo di calcolo, dati i passi temporali di integrazione necessari per ottenere una soluzione numerica stabile (che sono dell'ordine di 2 s), i tempi di calcolo necessari sono piuttosto elevati. Si ottiene infatti che, nel caso di una simulazione bidimensionale che accoppi la soluzione del problema idrodinamico a quello del trasporto in sospensione, la durata della simulazione su di un personal computer di discreta potenza è pari a circa 1/10 del tempo reale. Il modello predisposto non può, quindi, essere utilizzato per simulazioni bidimensionali di lunga durata (ad esempio dell'ordine del mese), tanto meno per simulazioni con il modello 3D multistrato, a meno di non ricorrere a strumenti di calcolo adeguatamente potenti o di utilizzare, come sarebbe possibile, una versione parallela del codice sequenziale predisposto.

In alternativa, nel caso si debbano condurre simulazioni molto onerose, è possibile, con un minimo intervento "diradare" la griglia di calcolo aumentando le dimensioni delle maglie o in modo generalizzato o limitatamente alle zone in cui è possibile rinunciare ad un elevato dettaglio della soluzione numerica, a favore di tempi di calcolo accettabili.

Risultati delle simulazioni

Il modello bidimensionale dei rami terminali del delta del Po, delle lagune e del mare antistante, è stato utilizzato per valutare da una parte la ripartizione delle portate di piena fra i tre rami in cui il Po di Tolle si suddivide al suo ingresso nella bassura denominata "Bonelli", pri-

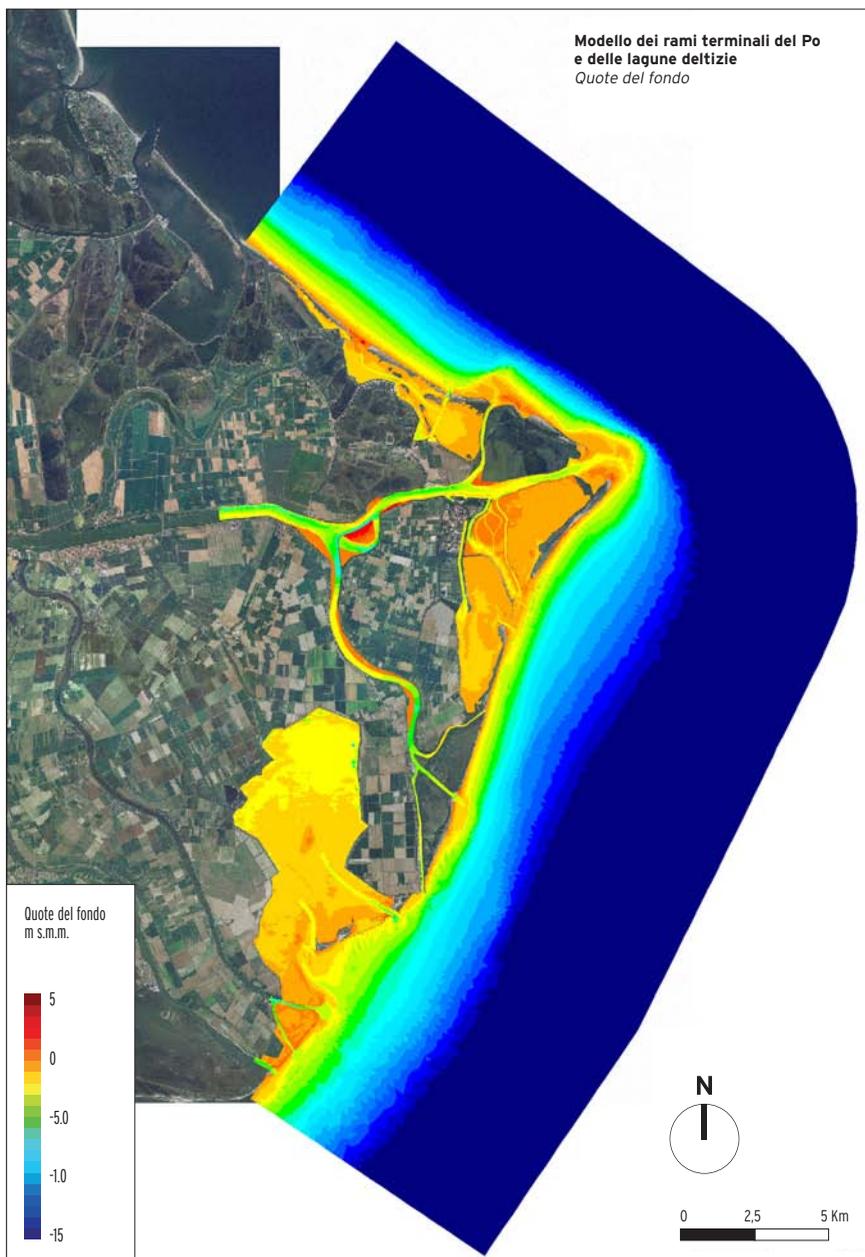


Figura 31: schematizzazione della batimetria del nuovo modello bidimensionale dei rami terminali del delta del Po, delle lagune e del mare antistante.

ma di sfociare in mare, dall'altra gli effetti di questa ripartizione sulle portate solide in sospensione e, quindi, sull'apporto dei sedimenti fluviali lungo il litorale adiacente.

Per inquadrare il problema, il Consorzio di Bonifica Delta del Po ha effettuato alcune misure di portata in condizioni idrometriche sostenute nel Po, per ottenere un riscontro sperimentale sulla suddetta ripartizione. Le misure sono state effettuate il 28 novembre 2007, utilizzando un correntometro ADCP, in una giornata in cui il Po a Pontelagoscuro è stato caratterizzato da portate superiori a 2000 m³/s, come conseguenza di un evento di morbida la cui portata al colmo, verificatasi il giorno 26/11, è stata valutata in poco più di 2500 m³/s. Si tratta di una portata relativamente contenuta, che determina condizioni influenzate dalla marea di sizigia, per cui le misure sono state ripetute più volte nell'arco della giornata.

Nella Figura 32 è evidenziata la posizione delle 3 sezioni di misura considerate ed è inclusa una tabella che riporta i valori delle portate misurate. Si osserva che, pur nell'ambito di variazioni anche cospicue delle portate, dovute alle oscillazioni della marea, la frazione della

portata del Po di Tolle che sfocia in mare attraverso la Busa Storiona (il nuovo ramo scavato) resta all'incirca costante, e vale mediamente il 76% della portata complessiva in arrivo da monte. Maggiori sono le variazioni nel tempo delle portate che percorrono il vecchio ramo di foce verso Punta Barricata e la Busa del Bastimento. Mediamente tali portate valgono il 17% e il 7% del totale, rispettivamente.

È evidente come, secondo i risultati ottenuti, il ramo della Busa Storiona, realizzato alla fine degli anni '80 dal Magistrato per il Po e recentemente potenziato, sia attualmente di gran lunga il ramo più attivo del Po di Tolle, mentre risultano fortemente penalizzate le portate fluenti attraverso gli altri due rami. Ne discende che, anche in termini di portate solide, il contributo della Busa Storiona al trasporto di sedimenti verso il mare dovrebbe essere dominante rispetto a

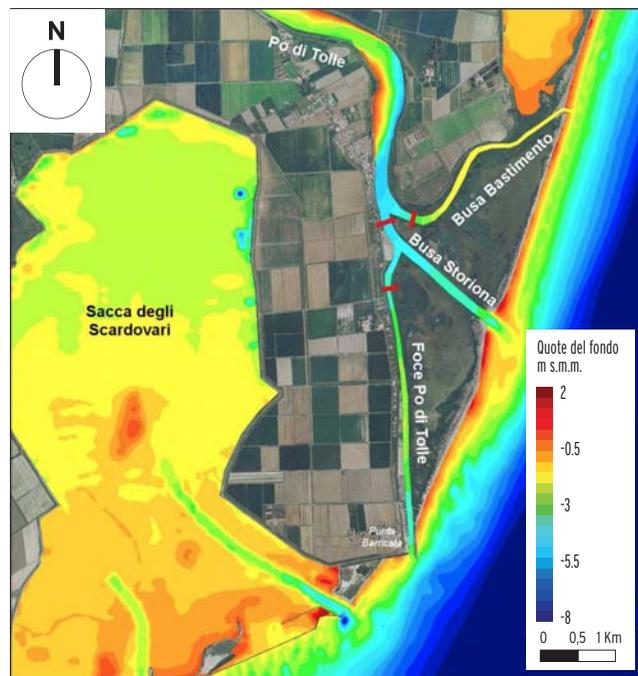


Figura 32: misure di portata sui tre rami in cui il Po di Tolle si suddivide prima della foce, effettuate a cura del Consorzio di Bonifica Delta del Po il 28 novembre 2007.

Bastimento (m ³ /s)	Po di Tolle monte (m ³ /s)	Po di Tolle valle (m ³ /s)	Storiona calc. (m ³ /s)	Bastimento %	Po di Tolle valle %	Storiona %
28.2	352.8	56.1	296.7	7.4	14.7	77.9
33.5	300.1	48.2	251.9	10.1	14.4	75.5
23.5	303.1	51.9	251.3	7.2	15.9	76.9
35.0	323.7	57.2	266.5	9.8	16.0	74.3
24.1	374.5	67.9	306.6	6.1	17.0	76.9
28.0	417.3	71.6	345.7	6.3	16.1	77.6
25.1	457.4	95.6	361.8	5.2	19.8	75.0
24.2	512.7	103.8	408.9	4.5	19.3	76.2
21.0	514.6	108.8	405.8	3.9	20.3	75.8
			Valori medi	6.7	17.1	76.2

quello degli altri due rami. È probabile quindi che, negli ultimi anni, si sia verificata una riduzione degli apporti solidi sui litorali adiacenti alla vecchia foce di Porto Barricata del Po di Tolle, che sono poi quelli della Sacca di Scardovari. Si tratta di un aspetto da valutare con attenzione, alla luce degli intensi processi erosivi che sembrano essersi manifestati a carico del cordone litoraneo che individua fisicamente la Sacca la delimita rispetto al mare.

Partendo da queste premesse, per esaminare la ripartizione attuale delle portate liquide e solide alla foce del Po di Tolle è stata simulata con il modello matematico allestito la piena che si è verificata nel periodo che va dal 16 novembre al 25 dicembre 2002, caratterizzata da due picchi ravvicinati e da una portata massima al colmo stimata a Pontelagoscuro in circa 7000 m³/s (Figura 33), che avrebbe un tempo di ritorno di circa 5 anni [11].

Poiché il dominio di calcolo del modello è limitato alla sola parte terminale del Po, a valle dell'incile del Po di Maistra (Figura 31), è stata preliminarmente ef-

fettuata una simulazione con il modello che descrive l'intero Delta per valutare l'andamento delle portate nella sezione di monte del reticolo di calcolo. La stessa Figura 33 riporta il confronto tra l'andamento delle portate stimate a Pontelagoscuro e quello calcolato nella sezione suddetta, per la quale la portata al colmo vale circa 4500 m³/s. La differenza con la portata di Pontelagoscuro sta nelle sottrazioni di portata dovute ai rami deltizi situati a monte e non riprodotti dallo schema (Po di Goro, Po di Gnocca, Po di Maistra). Sui nodi del contorno aperto in mare sono stati assegnati i livelli di marea registrati dal mareografo di Porto Caleri nel periodo simulato. È stato considerato anche il vento, registrato alla stazione di Porto Tolle e si è considerata la mobilità del fondo.

Per quanto riguarda i valori dei parametri che controllano i fenomeni di trasporto dei sedimenti, essi sono stati determinati mediante relazioni proposte dalla letteratura tecnica, non essendo disponibili i dati sperimentali necessari per una loro specifica individuazione. Relativamente alla granulometria dei

sedimenti presenti sul fondo, è stato considerato un diametro rappresentativo d50 del materiale pari a 0.1 mm, tipico delle sabbie fini.

È opportuno, sottolineare che la modellazione a fondo mobile si deve intendere principalmente rivolta ad inquadrare i fenomeni in senso qualitativo, potendo essa consentire l'individuazione delle aree soggette ad erosione e/o deposito, ma non essendo esente da incertezze per quanto riguarda la quantificazione effettiva e puntuale delle variazioni delle quote dei fondali. Per essere più correttamente inquadrati anche dal punto di vista quantitativo i processi di erosione e/o di deposito segnalati dal calcolo necessiterebbero di verifiche e di controlli sperimentali attualmente non disponibili. Con riferimento al trasporto dei sedimenti, le condizioni al contorno introdotte consistono nell'assegnazione degli scambi di portata solida sui nodi della frontiera del dominio. L'assunzione si traduce nell'individuazione di un certo numero di nodi in cui si è supposto che il trasporto solido sia in equilibrio locale, ovvero non ci sia né deposito né erosione. Nel caso specifico tali nodi sono stati

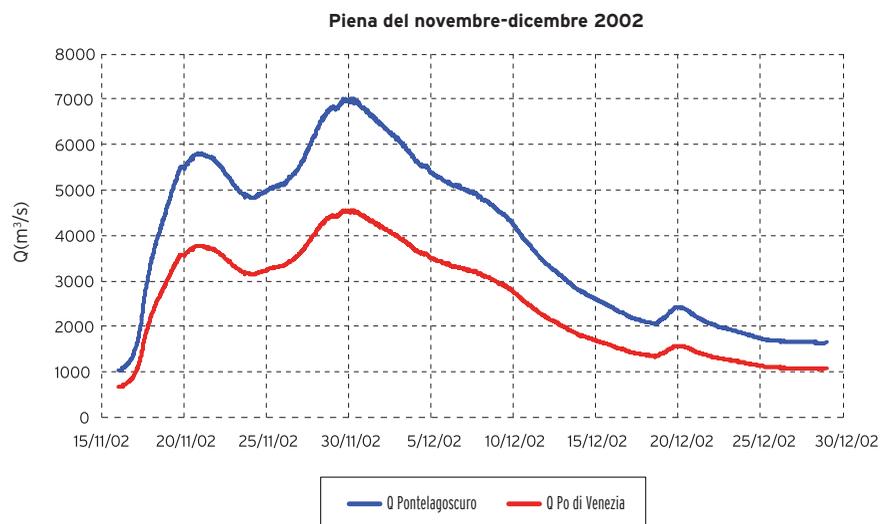
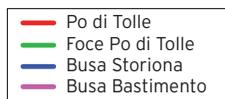
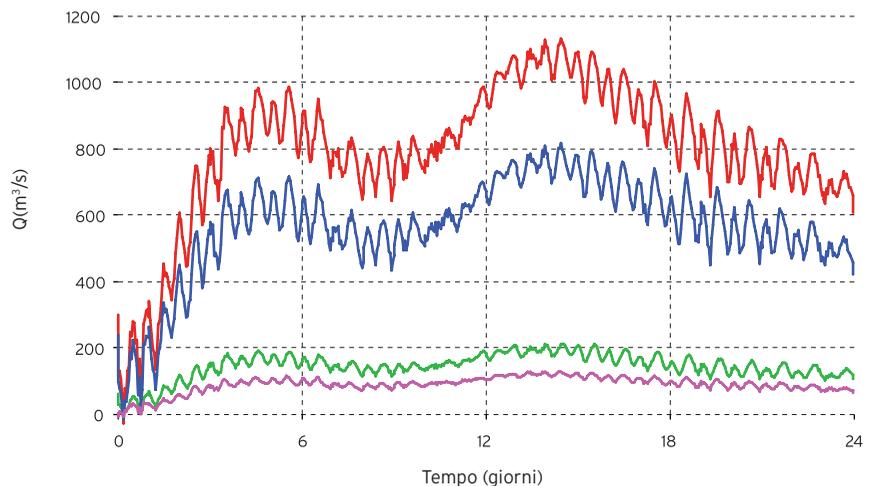


Figura 33: andamento delle portate del Po a Pontelagoscuro per l'evento di piena considerato.

Figura 34:
simulazione della
piena del novembre
2002. Andamento
delle portate liquide
nel nel Po di Tolle
e nei tre rami in
cui quest'ultimo si
suddivide alla sua
foce.



Piena del novembre 2002 (16 nov - 10 dic)
Andamento delle portate calcolate con il modello bidimensionale



individuati sulla frontiera del dominio, laddove sono immesse le portate liquide e assegnati i livelli a mare.

I risultati della simulazione sono illustrati nelle Figure 34 e 35. Nella Figura 34 sono rappresentate le portate fluenti nei diversi rami del Po di Tolle. Si osserva che, secondo il calcolo, la portata massima al colmo che fluisce lungo il Po di Tolle è pari a poco più di 1000 m³/s, a fronte dei 4500 m³/s che transitano al colmo sul Po di Venezia. Si nota, inoltre, come l'andamento della portata fluente sia fortemente influenzato dalla marea. Nelle sezioni dei rami in cui il Po di Tolle si suddivide verso la foce, secondo il calcolo circa 750 m³/s (71%) seguono la direttrice della Busa Storiona, circa 200 m³/s (19%) sfociano attraverso la vecchia foce del Po di Tolle e circa 100 m³/s (10%) fluiscono attraverso la Busa del Bastimento.

Il modello si dimostra da una parte in buon accordo con i dati sperimentali, riproducendo in modo soddisfacente la ripartizione percentuale delle portate fra i tre rami del Po di Tolle, dall'altra con-

ferma che, anche per le situazioni di piena, le portate fluenti attraverso la Busa Storiona sono di gran lunga prevalenti rispetto a quelle che competono agli altri due rami e in particolare al ramo che porta alla vecchia foce.

Nella Figura 35 sono sintetizzati i risultati della simulazione in termini di "portate solide", cioè di portate di materiale trasportato in sospensione dalla corrente. Le sezioni alle quali il diagramma si riferisce sono materializzate sui tre rami del Po di Tolle poco prima del loro sbocco in mare. Nel primo caso (Figura 35 in alto), è valutata la portata solida nella situazione attuale. Si osserva che i valori calcolati si distribuiscono in modo analogo a quanto osservato per le portate liquide, ovvero evidenziano una netta prevalenza del contributo della Busa Storiona rispetto alle altre due foci.

Tuttavia, si nota che, data la non linearità del legame fra portata liquida e portata solida, le differenze fra i rami si amplificano notevolmente. I valori massimi della portata solida per la Busa Storiona

sono dell'ordine di 0.2 m³/s, mentre per gli altri due rami le portate stesse sono circa 10 volte inferiori. Si nota anche che la portata solida valutata per la Busa del Bastimento è superiore a quella valutata per la vecchia foce del Po di Tolle. Ciò dipende dai bassi fondali che caratterizzano il primo ramo, che danno origine a più intensi fenomeni erosivi da parte della corrente in piena.

Il grafico di Figura 35 in basso rappresenta il risultato di un secondo scenario preso in esame con il modello. Si è ipotizzata, infatti, la completa chiusura della fucedella Busa Storiona, in modo da obbligare l'intera portata del Po di Tolle a defluire lungo i suoi due rami più antichi. È da segnalare, peraltro, che questa situazione non è rappresentativa di quanto poteva essere prima della realizzazione della Busa Storiona alla fine degli anni '80, dato che anche allora sullo scanno dei "Bonelli" esistevano dei varchi attraverso i quali le portate del Po potevano uscire in mare.

Essa potrebbe invece rappresentare realisticamente il comportamento del

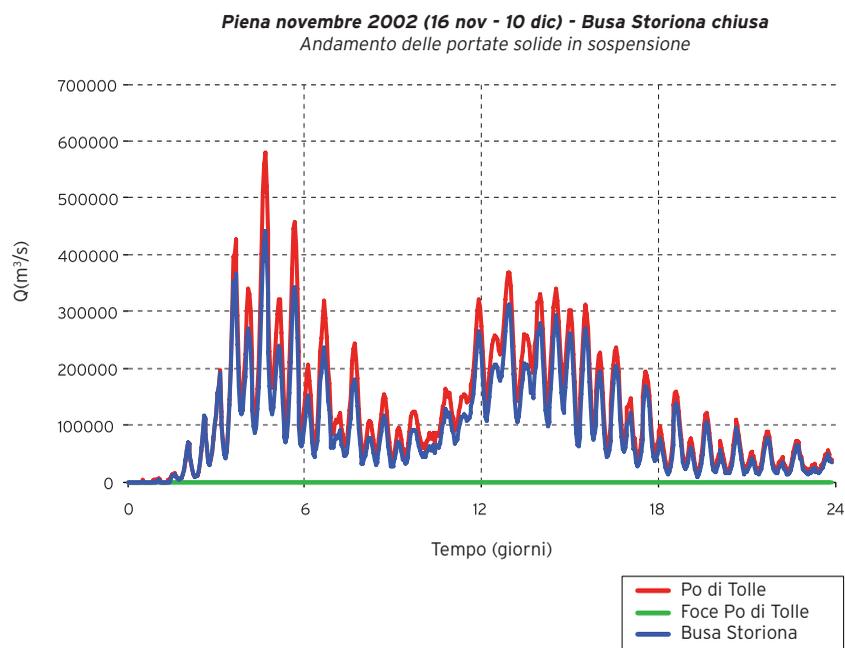
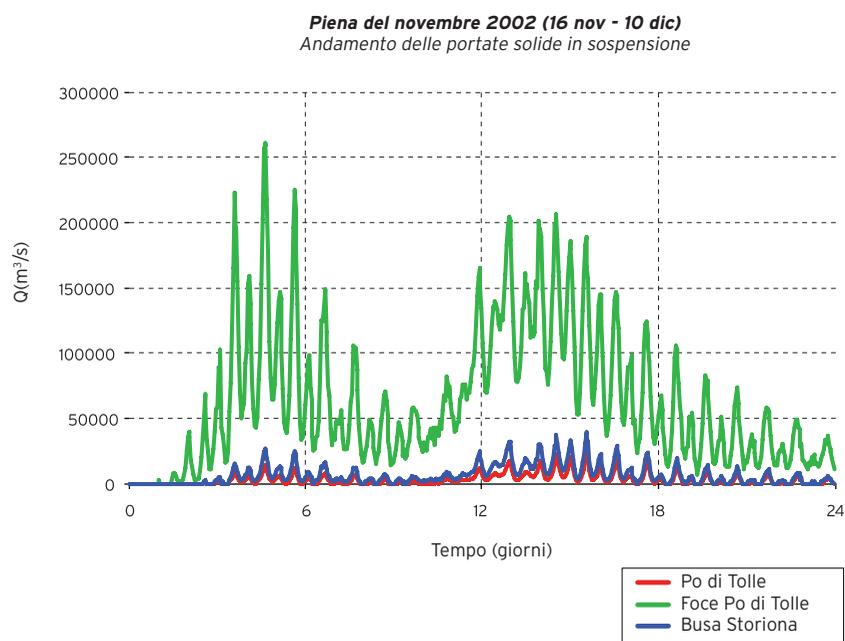


Figura 35: simulazione della piena del novembre 2002. Andamento delle portate solide nei rami del Po di Tolle nella situazione attuale (sopra) e nell'ipotesi di chiusura della Busa Storiona.

sistema prima degli anni '60, quando gli effetti della subsidenza e delle disastrose piene di quegli anni non si erano ancora manifestati nei loro effetti e i terreni oggi occupati dai Bonelli erano parti di terraferma.

I risultati del calcolo, in termini di

portate solide, mostrano in primo luogo che gli apporti solidi risultano sostanzialmente incrementati. Sia sul vecchio ramo del Po di Tolle che sulla Busa del Bastimento le portate solide massime arrivano a 0.3 m³/s e sono nel loro complesso, maggiori di quelle che competono all'insieme dei tre rami nella situazione attuale.

Ciò è da mettere in relazione con le maggiori velocità che, mediamente, si instaurano negli alvei, a causa della minore ampiezza delle sezioni liquide disponibili, e quindi dalla maggiore intensità del trasporto solido in sospensione. In secondo luogo si osserva che, a differenza del caso precedente, le portate solide che competono alla vecchia foce del Po di Tolle sono superiori a quelle della Busa del Bastimento. Questo risultato rende ulteriormente credibile l'ipotesi per cui, prima dell'apertura e del potenziamento della Busa Storiona, gli apporti solidi lungo il Po di Tolle, e quindi verso i litorali della Sacca di Scardovari, doversero essere apprezzabilmente maggiori di quelli attuali.

AZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA

Le onde generate al largo dal vento propagandosi sotto costa innescano processi erosivi e di sedimentazione che assumono grande rilevanza per la stabilità dei fondali e in definitiva dei cordoni litoranei che separano una laguna dal mare, garantendone l'unità fisiografica. Anche a causa di tali fenomeni, che si combinano nei loro effetti con quelli indotti dalle correnti che interessano le numerose foci lagunari e fluviali che si aprono sul mare, si determinano lungo la fronte del Delta condizioni di grande mobilità della linea di riva. Non sorprende conseguentemente assistere a

seguito delle mareggiate più intense a importanti modificazioni dell'assetto morfologico del litorale, con evoluzioni nel tempo non sempre positive per la sopravvivenza di una laguna.

È quanto sta capitando da alcuni decenni a questa parte agli scanni che separano la Sacca di Scardovari dal mare, che, contrariamente al passato (vedi configurazione della laguna del 1950), si presentano ora con una configurazione planimetrica concava verso il mare, che favorisce i processi erosivi sostenuti dal moto ondoso. Inquadrare i fenomeni in atto e valutare gli eventuali provvedimenti in grado di contrastarli, sono obiettivi irrinunciabili poiché la distruzione degli scanni porterebbe inevitabilmente alla trasformazione della laguna in un vero e proprio braccio di mare.

Modellazione matematica del sistema

Come per la propagazione delle onde di marea, anche per la propagazione del moto ondoso dal largo verso riva, la modellazione matematica dei fenomeni sotto appropriate condizioni, può aiutare a comprendere meglio i processi innescati e a individuare l'importanza relativa delle singole cause che concorrono a formarli.

Pur essendo evidente la necessità di supportare le analisi modellistiche con adeguate osservazioni sperimentali, al fine di dimostrare la capacità dei modelli implementati di simulare una realtà che è evidentemente complessa, può essere utile, se non altro per un primo inquadramento dei problemi, analizzare attraverso la simulazione numerica le cause delle modificazioni alle quali è esposto il litorale che separa la Sacca dal mare, quantomeno per trarre indicazioni sui

provvedimenti da adottare per tentare di contrastare i fenomeni in atto.

Dati utilizzati

Per stabilire le caratteristiche del moto ondoso nel paraggio di mare antistante la Sacca di Scardovari si è fatto riferimento alle indagini e alle elaborazioni contenute nel rapporto tecnico "Studi idraulico-marittimi nelle lagune deltidie - Sacca di Scardovari" [10], [11].

Nello studio le caratteristiche del clima ondoso nel punto antistante la Sacca di Scardovari (punto S, di Figura 36) è stato ottenuto attraverso un serie di simulazioni numeriche condotte con il codice di calcolo SWAN a partire dai dati relativi al punto CNR più vicino, per il quale sono disponibili le caratteristiche del moto ondoso ricostruite mediante il modello WAM (WAve Model) [10], [11].

Utilizzando le corrispondenze fra i dati del punto CNR e quelli ricostruiti per il punto S è stato possibile associare a ciascun evento nel punto S una frequenza di accadimento e, quindi, ricostruire per questo punto le rose delle registrazioni e quelle delle energie e delle altezze massime del moto ondoso (Figura 37). Dall'analisi della rosa delle registrazioni e, soprattutto, di quella delle energie, si osserva la presenza di due picchi in corrispondenza di mareggiate di Bora (60° N) e di Scirocco (145° N).

Per quanto riguarda, invece, la rosa delle altezze massime, risulta che le massime altezze d'onda, dell'ordine di circa 5 m, sono presenti sia nel settore di Bora sia in quello di Scirocco. A partire dai dati di moto ondoso relativi al punto S, è stato possibile ricostruire le curve di durata per i settori di Bora e di Scirocco (Figura 38).

Risulta che l'altezza d'onda di 2 m è superata mediamente 4 giorni all'anno, nel caso di mareggiate provenienti dal settore 90°-200° N (Scirocco), e 10 giorni all'anno, nel caso di mareggiate provenienti dal settore 0°-90° N (Bora).

Reticolo di calcolo e condizioni al contorno

Il reticolo di calcolo del modello matematico utilizzato per le simulazioni è di fatto il medesimo impiegato per l'analisi della circolazione idrodinamica nella Sacca. Ad esso sono state solo aggiunte delle fasce laterali per ampliare il dominio verso Nord e verso Sud, in modo da porre le condizioni al contorno sufficientemente lontano dalle zone di interesse per non influenzare i risultati delle simulazioni.

Le simulazioni sono state condotte in condizioni di moto vario. Per la parte idrodinamica le condizioni al contorno sul bordo libero in mare consistono nell'assegnazione dell'andamento del livello di marea. Nello specifico una marea sinusoidale semi-diurna oscillante tra le quote ± 0.4 m s.l.m.

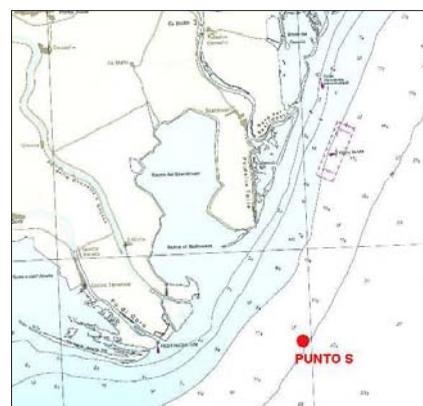


Figura 36: ubicazione del punto S.

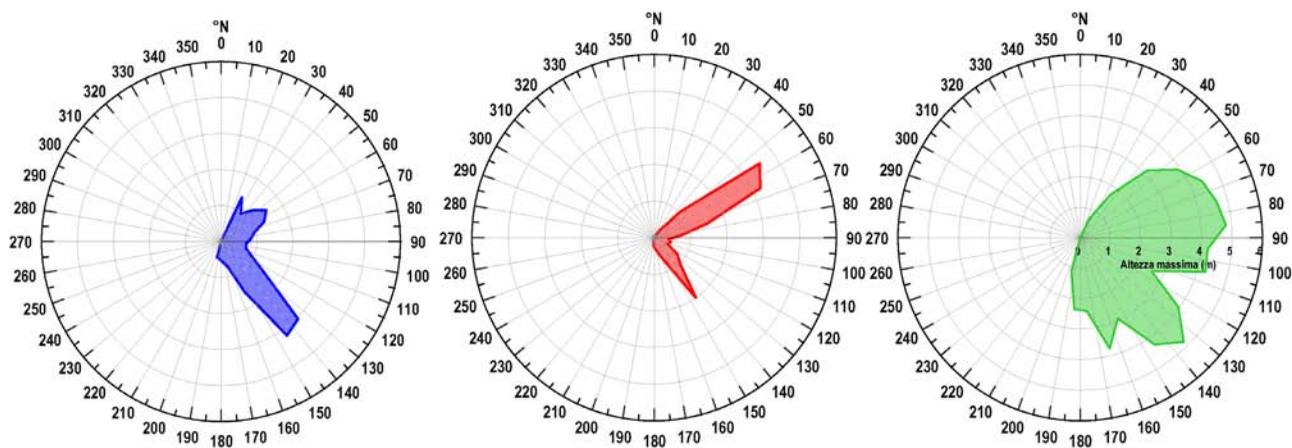


Figura 37: rose delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde) nel punto S (tratte dallo studio [10],[11]).

Per quanto riguarda il moto ondoso, sulla base della distribuzione dell'energia e delle registrazioni al largo (Figura 37), sono state considerate due direzioni (60° N e 145° N), rappresentative dei due settori principali di provenienza, e per ciascuno di questi le altezze significative relative alla durata di 1 giorno e di 30 giorni. Le caratteristiche di queste onde sono riportate nella Tabella 3.

Le simulazioni sono state estese per una durata di 3 giorni. Nel corso del primo e del terzo giorno l'unica forzante è costituita dalla marea, mentre nel secondo giorno è applicata come ulteriore forzante esterna anche l'azione del moto ondoso.

In questo modo le simulazioni a fondo mobile consentono di evidenziare sia gli effetti del trasporto solido dovuto alle sole correnti di marea sia quello legato alla sovrapposizione delle correnti indotte dal moto ondoso.

Risultati delle simulazioni

Le simulazioni condotte consentono un'interessante analisi legati alla propagazione delle mareggiate sotto costa, quantificando l'azione del moto ondoso lungo il litorale e l'intensità del trasporto solido indotto, individuando i tratti maggiormente sollecitati ed eventualmente sottoporre a protezione per garantire la tenuta del cordone litoraneo che separa la Sacca dal mare.

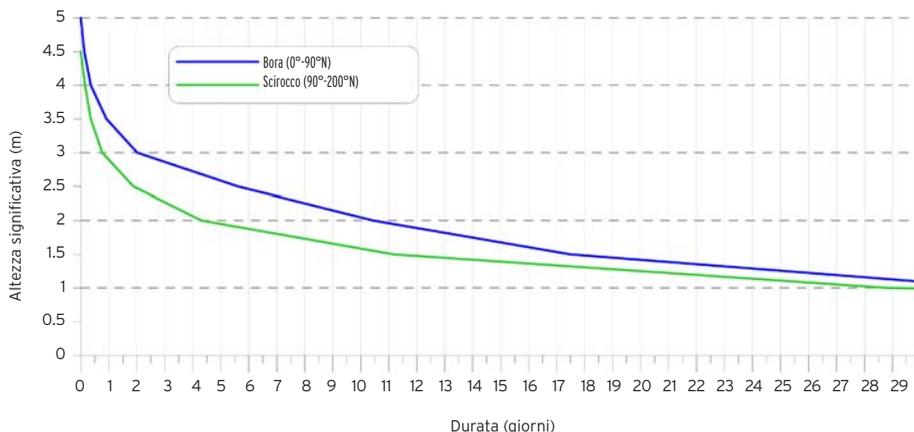


Figura 38: curve di durata nel punto S per i settori di Bora e Scirocco (tratte dallo studio [10], [11]).

Propagazione del moto ondoso

La distribuzione delle altezze d'onda della più gravosa delle mareggiate di Bora considerate (1 giorno/anno) negli istanti in cui la marea è massima e minima è rappresentata a curve di livello nella Figura 39. Secondo il calcolo l'altezza d'onda, pari a oltre 3 m al largo, progressivamente si smorza nella sua propagazione verso riva per effetto dei fenomeni dissipativi (resistenze al fondo, frangimento, whitecapping).

È interessante osservare come lungo il litorale a nord della foce del Po di Tolle (scanno Bonelli) l'onda arrivi con altezze considerevoli fino a poca distanza da riva (la curva relativa all'onda di 2 m di altezza si dispone a circa 500÷700 m dalla costa) per poi smorzarsi rapidamente nella fascia più prossima alla riva stessii.

Sul litorale davanti alla Sacca di Scardovari, verosimilmente a causa dei fondali meno profondi, l'onda si smorza in modo molto più progressivo. Conseguentemente, negli specchi d'acqua antistanti lo scanno che delimita la Sacca (Scanno del Palo), il modello segnala onde di altezza relativamente contenuta. L'escursione di marea comporta differenze non trascurabili sulle altezze

d'onda, dato che, in fase di alta marea, le onde si propagano su fondali maggiori e sono soggette ad effetti dissipativi minori. Davanti al litorale di Scardovari le due curve relative all'onda di altezza pari a 3 m in condizioni di alta e bassa marea distano fra di loro circa 200 m. Questa distanza aumenta leggermente per le curve relative ad altezze d'onda inferiori.

La Figura 40 illustra l'andamento delle altezze d'onda calcolate con il modello considerando la propagazione dell'onda di Scirocco avente durata di 1 giorno/anno per le due situazioni di alta e bassa marea. Secondo il calcolo, una mareggiata di Scirocco avente la stessa probabilità di accadimento dell'onda di Bora precedentemente considerata, determina davanti al litorale di Scardovari altezze d'onda apprezzabilmente più ridotte.

Anche in questo caso il risultato del calcolo mostra come le diverse condizioni di marea influenzino sensibilmente la posizione delle curve di livello rappresentative dell'altezza d'onda. In caso di alta marea, a parità di altre condizioni, le altezze d'onda sotto costa sono sensibilmente più elevate rispetto a quelle che si riscontrano in condizioni di bassa marea. È interessante confrontare per

una serie di transetti disposti ortogonalmente alla costa di Scardovari (Figura 41) i risultati ottenuti dal calcolo relativamente ai profili dell'altezza d'onda.

Per i transetti n. 8 (in corrispondenza della cosiddetta "Spiaggia delle Conchiglie"), n. 5 (davanti allo Scanno) e n. 3 (in corrispondenza della Bocca Sud) i profili mostrano l'attenuazione verso riva dell'altezza dell'onda di Bora e di Scirocco, di durata 1 giorno/anno, per le situazioni di alta e bassa marea, conseguente alla propagazione dell'onda stessa (Figura 42 e Figura 43).

Con riferimento a un attacco ondoso di Bora (Figura 42) in condizioni di alta marea (linee blu), lungo il transetto 8 davanti alla Spiaggia delle Conchiglie l'onda di altezza pari a 2 m si trova a circa 1000 m dalla costa. Davanti allo scanno (transetto 5), invece, la stessa altezza d'onda si ritrova a una distanza molto maggiore (circa 2500 m) dalla riva.

Del tutto analogo quanto si verifica nel caso del transetto 3, che si estende all'interno della Bocca Sud della Sacca. Si osserva che nel caso dei transetti 3 e 5 le modeste profondità dei fondali inducono un progressivo smorzamento dell'altezza dell'onda, mentre nel caso del transetto 8, i maggiori fondali favo-

	H (m)	T (s)	Dir. (°N)
Bora (1 giorno/anno)	3.46	7.05	60
Bora (30 giorni/anno)	1.09	4.06	60
Scirocco (1 giorno/anno)	2.89	7.53	145
Scirocco (30 giorni/anno)	0.99	5.61	145

Tabella 3: caratteristiche delle onde utilizzate nelle simulazioni.



Figura 39: mappa delle altezze d'onda nel caso di una mareggiata di Bora con onda al largo della durata di 1 g/anno in condizioni di alta e bassa marea ($H_s=3.46$ m; $T=7.05$ s; $Dir=60^\circ$). La rappresentazione ha un passo per le altezze d'onda di 0.5 m.



Figura 40: mappa delle altezze d'onda nel caso di una mareggiata di Scirocco con onda al largo della durata di 1 g/anno in condizioni di alta e bassa marea ($H_s=2.89$ m; $T=7.53$ s; $Dir=145^\circ$). La rappresentazione ha un passo per le altezze d'onda di 0.5 m.



Figura 41: posizione dei transecti materializzati davanti alla costa di Scardovari.

riscono la propagazione di onde di altezza più elevata fino a breve distanza dalla costa.

I risultati ottenuti consentono inoltre di quantificare l'effetto dei livelli di marea sulla propagazione del moto ondoso, al quale si è già fatto riferimento. Mentre al largo tale effetto è poco rilevante, il variare delle condizioni di marea comporta sottocosta differenze sull'altezza d'onda pari anche a 30-40 cm. Tali effetti sono ovviamente più evidenti per i transecti 3 e 5, a causa dei loro fondali più ridotti. Gli stessi profili calcolati con il modello nel caso dell'attacco ondoso di Scirocco di durata pari a 1 giorno/anno sono illustrati in Figura 43. In ragione dei maggiori fondali del mare antistante, l'attacco ondoso lungo il transetto 8 si propaga verso riva con altezze d'onda

sensibilmente superiori a quelle degli altri due transecti. Si nota, anche, che gli effetti dissipativi lungo il transetto 3 (Bocca Sud) sono molto più accentuati rispetto al caso precedente, dato che il transetto in questione si dispone in una fascia di mare più protetta rispetto al mare di Scirocco.

Nella Figura 44 sono illustrate le altezze d'onda per un attacco ondoso di Bora, confrontando i risultati ottenuti per mareggiate di durata 1g/anno e 30 gg/anno, nell'istante in cui il livello di marea è pari al livello medio del mare. L'altezza del moto ondoso, e quindi l'energia, è sostanzialmente diversa nei due casi. Le differenze, che sono macroscopiche lungo il litorale su cui si aprono le foci del Po di Tolle (laguna Bonelli) e lungo la spiaggia delle conchiglie, si ri-

ducono di molto davanti allo scanno che delimita attualmente la Sacca di Scardovari.

I risultati del calcolo confermano come l'intensità del moto ondoso davanti allo scanno della Sacca non raggiunga livelli molto più elevati di quelli che competono alle mareggiate che si verificano con maggiore frequenza. Si tratta di un effetto dissipativo che è chiaramente circoscritto al solo braccio di mare che è direttamente antistante lo scanno. Spostandosi infatti verso la punta presente alla foce del Po di Gnocca (Punta del Polesine), l'area antistante, nel caso della mareggiata di 1 giorno/anno, è esposta all'azione di onde che mantengono altezze elevate fino a ridosso della riva. Relativamente alle due onde di Scirocco, le altezze derivanti dal cal-

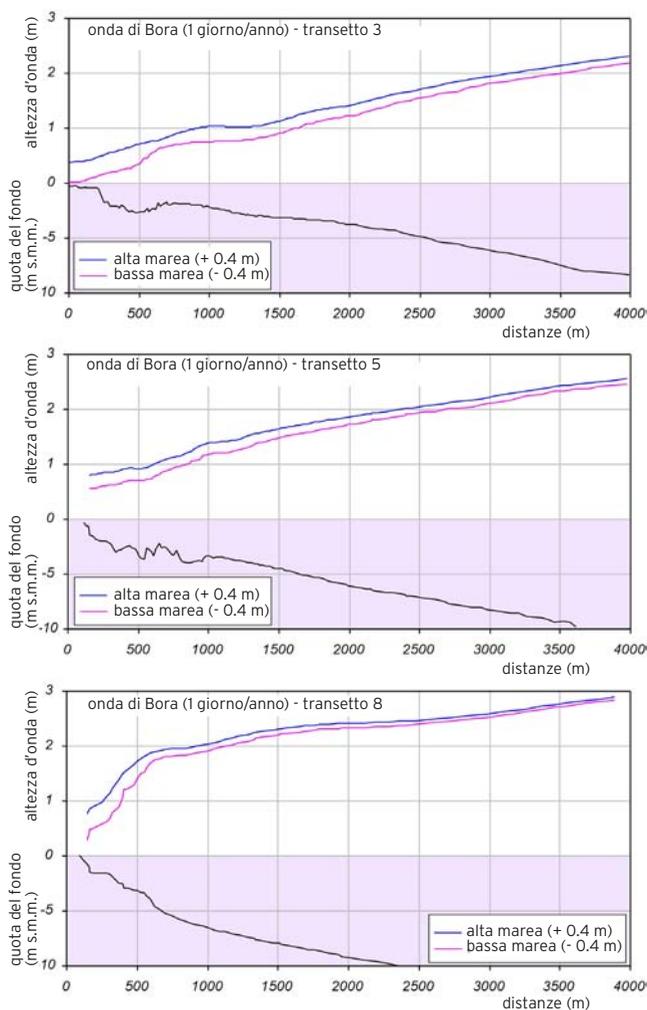


Figura 42: transetti ortogonali alla costa (tr3/spiaggia conchiglie, tr5/scanno e tr8/ bocca sud) per l'onda di Bora con frequenza 1q/anno con alta marea e bassa marea.

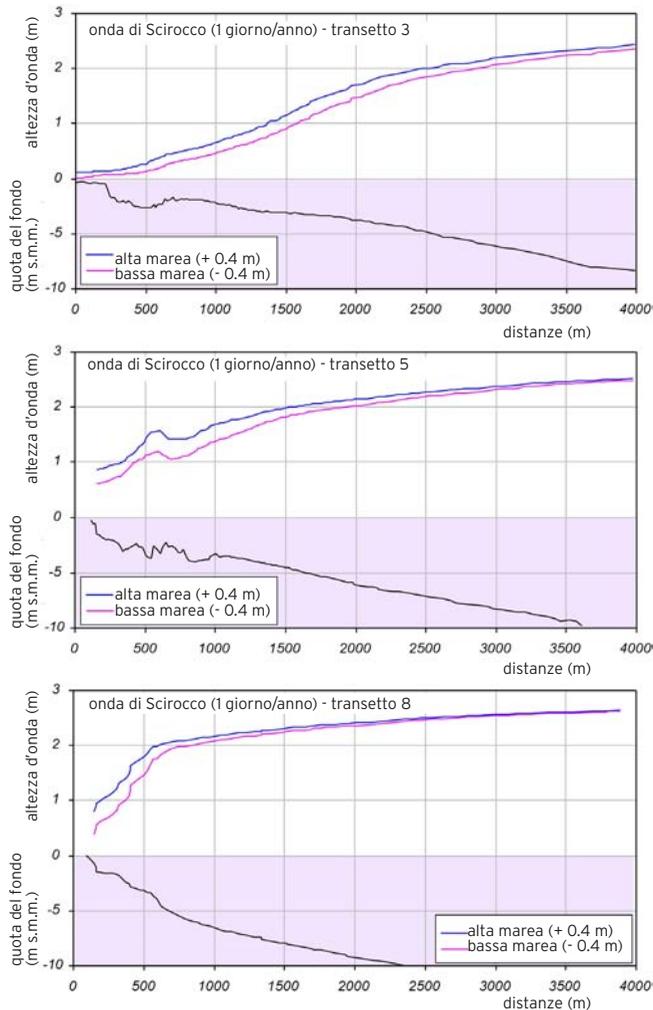


Figura 43: transetti ortogonali alla costa (tr3/spiaggia conchiglie, tr5/scanno e tr8/ bocca sud) per l'onda di Scirocco con frequenza 1q/anno con alta marea e bassa marea.

colo sono illustrate nella Figura 45. In questo caso il risultato per la mareggiata di durata 30 giorni /anno non è particolarmente significativo, perché l'altezza d'onda è già molto modesta al largo (0.99 m, si veda la Tabella 3). Per tale motivo nella mappa è rappresentata,

per questo stato di mare, solo la curva di livello pari a 0.5 m.

Sempre con riferimento alla mareggiata di durata 30 gg/anno si riscontra, da ultimo, che le altezze d'onda nel braccio di mare antistante la Sacca sono

tendenzialmente più elevate rispetto al caso della mareggiata di Bora. Il risultato va messo in relazione con le differenti direzioni di provenienza dell'attacco ondososo e, quindi, con gli effetti di rifrazione associati. In sostanza l'onda di Scirocco incide più frontalmente il litorale di Scar-



Figura 44: mappa delle altezze d'onda nel caso di una mareggiata di Bora con onda al largo della durata di 1 g/anno e 30 qg/anno in condizioni di livello medio del mare.



Figura 45: mappa delle altezze d'onda nel caso di una mareggiata di Scirocco con onda al largo della durata di 1 g/anno e 30 qg/anno in condizioni di livello medio del mare.

dovari e conseguentemente nella sua propagazione verso riva si attenua in misura minore. Nelle Figure 46 e 47 sono rappresentati i profili dell'altezza d'onda per i casi esaminati. I grafici supportano ulteriormente le considerazioni esposte.

Effetti del moto ondoso sul trasporto solido litoraneo

Con riferimento al trasporto solido litoraneo indotto dal moto ondoso, le simulazioni numeriche forniscono risultati anche riguardo al trasporto solido in sospensione dovuto al moto ondoso e alle relative correnti indotte.

Le mappe di Figura 48 e Figura 49 rappresentano con una scala di colori la distribuzione della concentrazione dei sedimenti trasportati in sospensione nel caso della mareggiata di Bora con durata di 1 giorno/anno, distinguendo le situazioni di alta marea (livello pari a +0.4

m s.l.m.) e di bassa marea (livello pari a -0.4 m s.l.m.).

Dal momento che la concentrazione dei sedimenti in sospensione è direttamente correlata all'azione di risospensione dei sedimenti dovuta alle correnti e alle onde, essa può considerarsi un indicatore efficace delle zone in cui è maggiormente intensa l'azione erosiva del mare.

Nelle stesse figure, con vettori di lunghezza unitaria è rappresentata la direzione del trasporto solido, in modo da identificare i percorsi seguiti dai sedimenti in sospensione. In base ai risultati ottenuti si possono formulare alcune interessanti considerazioni seguenti. In primo luogo si osserva che le mareggiate di Bora inducono un trasporto litoraneo lungo costa diretto da NE a SW. L'intensità del trasporto solido è molto elevata lungo tutto il litorale a Nord del

Po di Tolle, davanti alla laguna Bonelli. Il punto di massima concentrazione, che potenzialmente corrisponde a quello in cui si sviluppano i massimi effetti erosivi, si colloca a ridosso del lato occidentale della foce del Po di Tolle. Valori elevati della concentrazione di sedimenti in sospensione si riscontrano anche davanti alla Spiaggia delle Conchiglie e lungo il litorale a Sud della foce del Po di Gnocca.

Molto meno elevate sono invece le concentrazioni di sedimenti in sospensione nel braccio di mare che più direttamente fronteggia lo Scanno del Palo, ovvero il litorale che separa la Sacca dal mare. Qui le concentrazioni sono generalmente molto modeste (inferiori a 100 mg/l) e assumono valori rilevanti solo in alcuni tratti di litorale, limitatamente alla fascia posta immediatamente a ridosso della linea di costa.

Il confronto tra le mappe di Figura 48 e di Figura 49 evidenzia che l'effetto delle diverse condizioni di marea sul trasporto solido litoraneo non è trascurabile. Si nota infatti che, in condizioni di alta marea (+0.4 m s.l.m.), l'intensità del trasporto solido sotto costa è sensibilmente superiore a quello calcolato in condizioni di bassa marea (-0.4 m s.l.m.).

Le mappe di Figura 50 e Figura 51 riportano analoghe rappresentazioni dei risultati per la mareggiata di durata 1 giorno/anno proveniente però dal settore di Scirocco. In questo caso la direzione del trasporto litoraneo si inverte rispetto al caso precedente: il trasporto solido, infatti, è orientato da SW a NE. Confrontando le mappe con quelle relative alla mareggiata di Bora, si osserva che quantitativamente, in questo secondo caso, l'intensità del trasporto solido risulta generalmente inferiore.

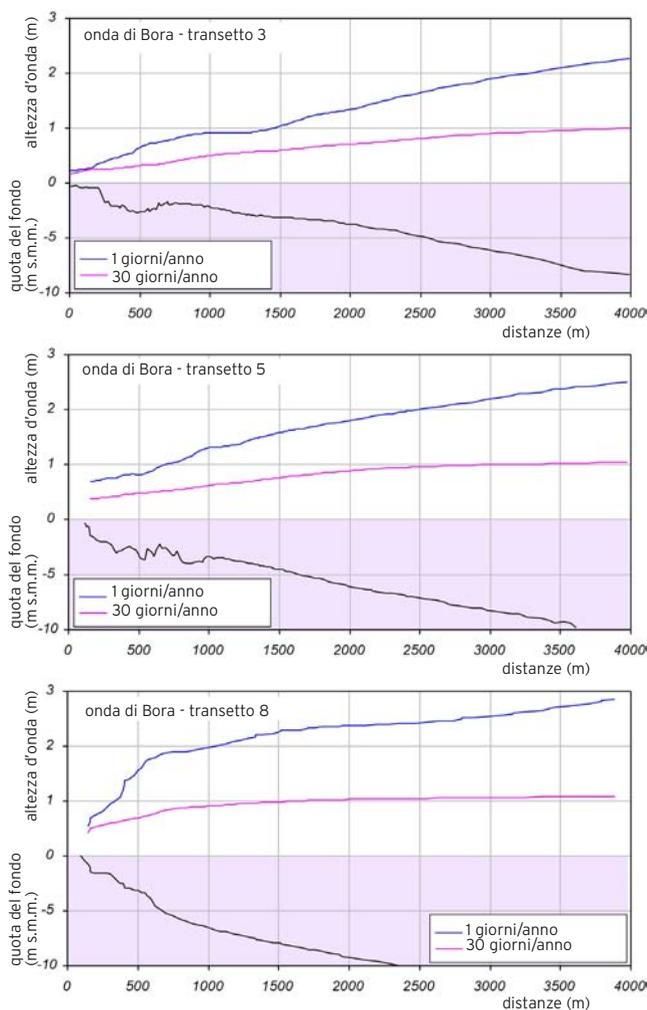


Figura 46: transetti ortogonali alla costa (tr3/spiaggia conchiglie, tr5/scanno e trB!bocca sud) per l'onda di Bora con frequenze 1g/anno e 30 gg/anno e livello pari al livello medio del mare.

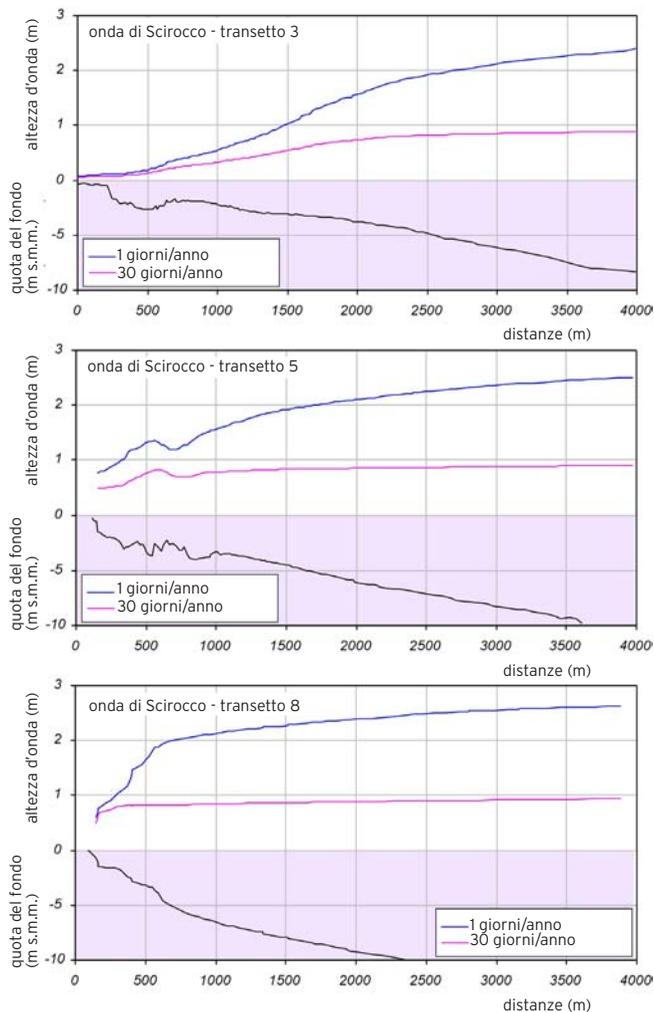


Figura 47: transetti ortogonali alla costa (tr3 tr3/spiaggia conchiglie, tr5/scanno e trB!bocca sud) per l'onda di Scirocco con frequenze 1giorno e 30 gg/anno e livello pari allivello medio del mare.

Qualitativamente, peraltro, la distribuzione delle aree in cui la concentrazione dei sedimenti in sospensione è massima non si modifica sostanzialmente, a indicare che le zone maggiormente vulnerabili dal punto di vista dell'erosione restano di fatto le medesime.

In ogni caso è da segnalare che, in forza della diversa direzione del trasporto, resta da una parte meno sollecitato il tratto di litorale posto a nord della foce del Po di Tolle, dall'altra si incrementa, anche se non di molto, l'intensità del trasporto nella zona della foce del Po

di Gnocca e negli specchi d'acqua antistanti lo Scanno del Palo che delimita la Sacca. Sempre nel caso dello Scirocco, infine, la simulazione modellistica indica che in condizioni di bassa marea il trasporto solido sotto costa tende a ridurre apprezzabilmente la sua intensità, come

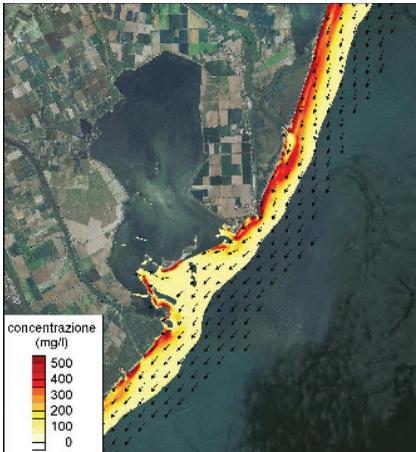


Figura 48: distribuzione della concentrazione dei sedimenti trasportati in sospensione nel caso della mareggiata di Bora con durata di 1 giorno/anno in condizioni di alta marea. I vettori indicano la direzione del trasporto solido.

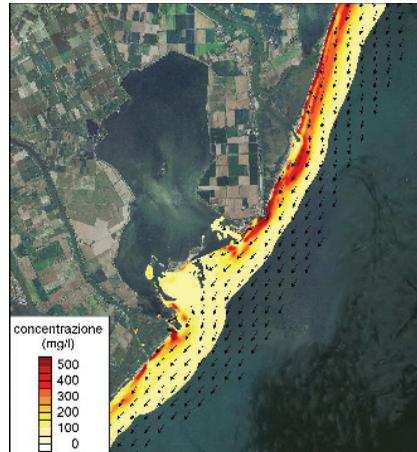


Figura 49: distribuzione della concentrazione dei sedimenti trasportati in sospensione nel caso della mareggiata di Bora con durata di 1 giorno/anno in condizioni di bassa marea. I vettori indicano la direzione del trasporto solido.

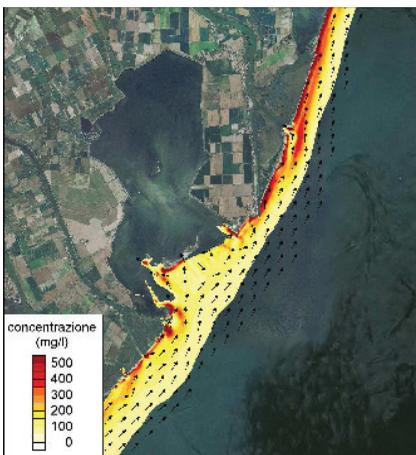


Figura 50: distribuzione della concentrazione dei sedimenti trasportati in sospensione nel caso della mareggiata di Scirocco con durata di 1 giorno/anno in condizioni di alta marea. I vettori indicano la direzione del trasporto solido.

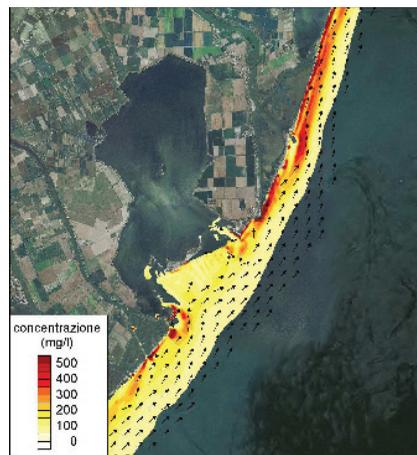


Figura 51: distribuzione della concentrazione dei sedimenti trasportati in sospensione nel caso della mareggiata di Bora con durata di 1 giorno/anno in condizioni di bassa marea. I vettori indicano la direzione del trasporto solido.

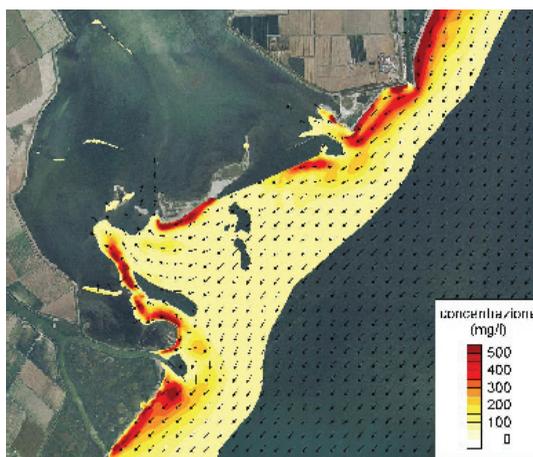
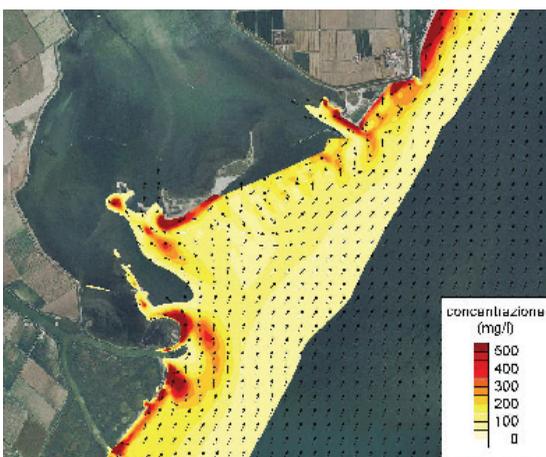


Figura 52: particolari delle mappe della concentrazione dei sedimenti in sospensione nel caso della mareggiata di Bora e Scirocco con durata di 1 giorno/anno in condizioni di alta marea. I vettori indicano la direzione del trasporto solido.

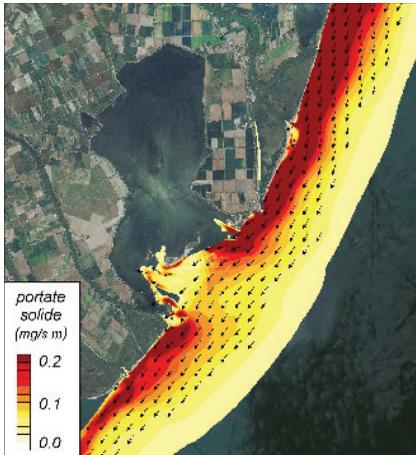


Figura 53: distribuzione della portata solida in sospensione nel caso della mareggiata di Bora con durata di 1 giorno/anno in condizioni di alta marea. I vettori indicano la direzione del trasporto.

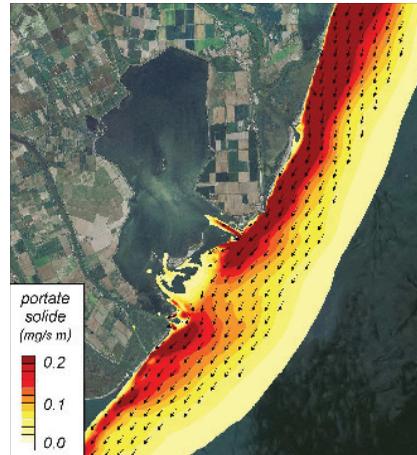


Figura 54: distribuzione della portata solida in sospensione nel caso della mareggiata di Bora con durata di 1 giorno/anno in condizioni di bassa marea. I vettori indicano la direzione del trasporto.

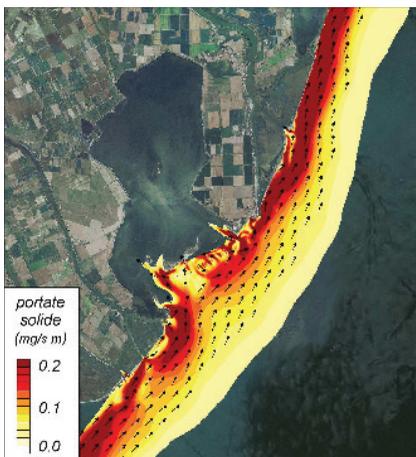


Figura 55: distribuzione della portata solida in sospensione nel caso della mareggiata di Scirocco con durata di 1 giorno/anno in condizioni di alta marea. I vettori indicano la direzione del trasporto.

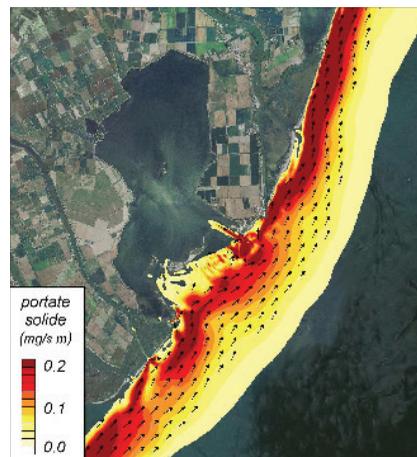


Figura 56: distribuzione della portata solida in sospensione nel caso della mareggiata di Scirocco con durata di 1 giorno/anno in condizioni di bassa marea. I vettori indicano la direzione del trasporto.

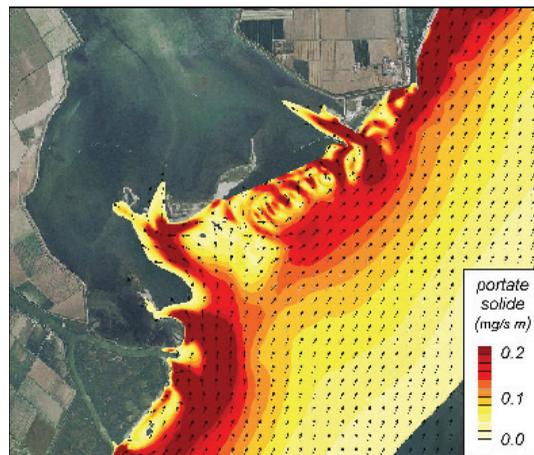
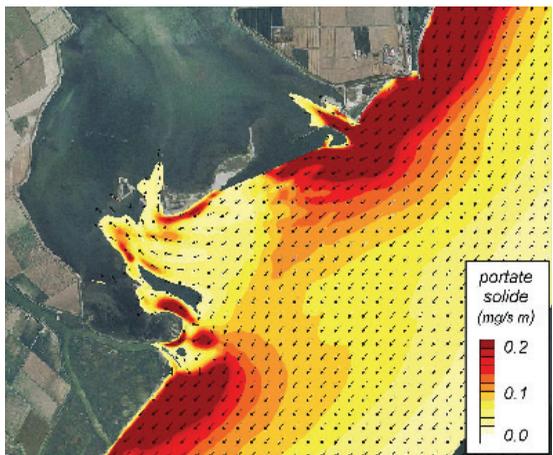


Figura 57: particolari delle mappe della portata solida in sospensione nel caso della mareggiata di Bora e Scirocco con durata di 1 giorno/anno in condizioni di alta marea. I vettori indicano la direzione del trasporto.

già segnalato per i venti di Bora.

Le mappe di Figura 52 illustrano con un maggior dettaglio, limitatamente al litorale antistante la Sacca, i risultati rappresentati nelle immagini precedenti per i casi delle mareggiate di Bora e di Scirocco di durata pari a 1 giorno/anno. Da esse è possibile trarre qualche ulteriore spunto di analisi. Si nota come sia nel caso di mareggiate di Bora sia in quello di mareggiate di Scirocco entrambe le bocche della Sacca siano interessate da un flusso di sedimenti in sospensione diretto verso l'interno.

Nel caso mareggiata di Bora (Figura 52 a sinistra), per quanto riguarda la Bocca Nord, si rileva in particolare come il trasporto solido in sospensione sia particolarmente intenso davanti alla Spiaggia delle Conchiglie e segua un percorso che tende in buona parte a immettersi nella Sacca attraverso la bocca. Sempre nel caso di mareggiata di Bora, anche nell'intorno della Bocca Sud è evidenziata una chiara tendenza dei sedimenti in sospensione a entrare in laguna.

Il modello evidenzia chiaramente, d'altra parte, che i punti maggiormente sollecitati sono da una parte l'estremità meridionale dello Scanno del Palo, a partire dal limite della difesa in scogliera realizzata in questi anni dal Consorzio, dall'altra tutto il cordone sabbioso che delimita la Bocca Sud sul suo lato meridionale. In presenza di onda di Scirocco (Figura 52 a destra), le condizioni si modificano soprattutto per quest'ultimo tratto di litorale, il quale, per effetto della diversa orientazione dell'attacco ondososo, risulta essere poco sollecitato.

Significativamente diversa sono anche le direzioni del trasporto. Davanti

alla difesa in scogliera che protegge lo Scanno del Palo la distribuzione delle correnti non risulta infatti orientata in modo coerente, ma tende a descrivere percorsi con circolazione vorticoso. Condizioni analoghe si verificano nell'intorno della Bocca Nord e di fronte alla Spiaggia delle Conchiglie, dove, rispetto al caso della mareggiata di Bora, l'intensità del trasporto è notevolmente ridotta. Nelle Figure 53-57 sono sintetizzati i risultati ottenuti per la portata solida in sospensione, che è sostanzialmente determinata dal prodotto della concentrazione dei sedimenti per la portata liquida, fornendo indicazioni fascia attiva del trasporto litoraneo.

Nel caso di mareggiate di Bora (Figure 53-54), tale fascia attiva si estende per circa 3.5 km (fino approssimativamente alla batimetrica -15) davanti alla foce della Busa Storiona e si amplia fino a oltre 5 km davanti alla Bocca Sud. La fascia interessata da portate solide rilevanti (indicate nelle con gradazioni di colore dall'arancio al rosso) è, tuttavia, molto più ristretta (circa 1.6 km davanti alla Busa Storiona, fino a fondali di -8÷-9 m s.l.m.). È interessante rilevare anche che le portate solide sono alquanto modeste (e praticamente trascurabili in caso di bassa marea) davanti allo Scanno di Scardovari e nella zona della Bocca Sud.

Diverso, in termini di portata solida, è il risultato relativo alla mareggiata di Scirocco (Figura 55-56). Per queste condizioni, la fascia attiva del trasporto litoraneo si restringe leggermente rispetto al caso precedente. Il fenomeno è legato alla minore intensità del moto ondososo al largo. Per la mareggiata di Scirocco, inoltre, risultano sensibilmente maggiori le portate solide che transitano negli specchi d'acqua antistanti lo scan-

no della Sacca, anche se la direzione del trasporto, come è stato evidenziato in precedenza, non risulta ben definita, ma sembra indicare piuttosto l'instaurarsi di fenomeni di circolazione vorticoso.

Da ultimo nella Figura 57 sono rappresentati con maggior dettaglio i campi della portata solida nell'intorno della Sacca di Scardovari per le mareggiate di Bora e di Scirocco in fase di alta marea. Si notano più chiaramente aspetti che sono già stati sottolineati. In particolare, nel caso dell'onda di Bora (Figura 57 in alto), emerge come le massime portate solide, che si sviluppano in adiacenza al litorale nella zona della foce del Po di Tolle e della Bocca Nord e nella zona della foce del Po di Gnocca, transitino molto al largo della Bocca Sud, interessando solo in misura minima gli specchi d'acqua che fronteggiano la Bocca stessa e la parte più meridionale dello Scanno del Palo.

Questa situazione si modifica nel caso dell'onda di Scirocco (Figura 57 in basso), per la quale tuttavia, come si è ricordato, le direzioni del trasporto non sono ben definite e sembrano indicare l'instaurarsi di fenomeni locali di circolazione. Per le mareggiate di Bora e Scirocco aventi durata di 1 giorno/anno, l'andamento nel tempo delle portate solide che attraversano alcuni transetti (Figura 41) è illustrato in Figura 58.

Le portate solide sono significative solo nelle 24 ore centrali della simulazione le sole durante le quali si esplica l'azione del moto ondososo. Secondo il calcolo le portate solide complessive sono maggiori nel caso della mareggiata di Bora rispetto a quella di Scirocco, variando, in media, rispettivamente tra 0.15 e 0.20 m³/s e tra 0.1 e 0.15 m³/s. In generale le portate solide non differiscono molto fra un transetto e l'altro.

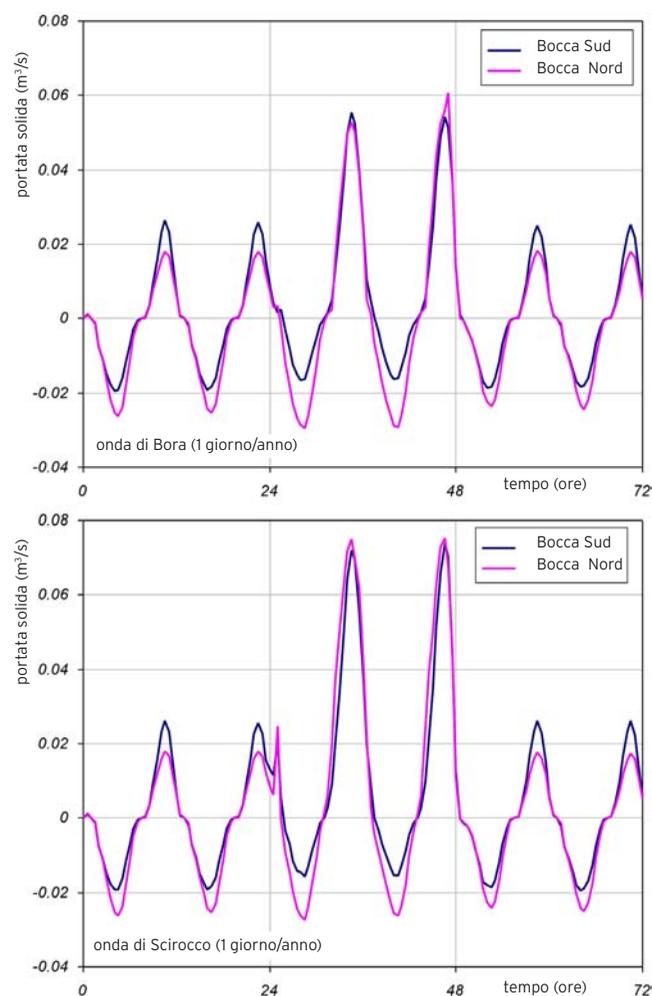
Risultano leggermente inferiori le portate solide che competono ai transetti centrali (transetti 3÷7) per i quali si evidenziano anche delle oscillazioni di valore. Il fenomeno sembra essere legato all'oscillazione dei livelli di marea, ed è più evidente per questi transetti perché, che, essendo caratterizzati dai più bassi fondali, sono maggiormente influenzati dalle variazioni di quota idrometrica indotte dalla marea.

Quanto all'andamento delle portate solide che transitano attraverso le due bocche lagunari, nel caso di mareggiate di Bora (Figura 59 in alto), nella fase iniziale e finale della simulazione, quando l'unica forzante è costituita dall'oscillazione della marea, si realizza una certa asimmetria di comportamento fra le bocche stesse. In sostanza attraverso la Bocca Sud prevalgono le portate solide entranti, mentre attraverso la Bocca Nord prevalgono le portate solide uscenti.

Nella fase in cui si esplica l'azione del moto ondoso (24÷48 ore) per entrambe le bocche le portate solide entranti crescono notevolmente (di circa 2.5 volte), mentre le portate solide uscenti si modificano di poco. Risultati analoghi si ottengono per la mareggiata di Scirocco (Figura 59 in basso), per la quale l'entità delle massime portate solide entranti risulta significativamente superiore a quella valutata per il caso di Bora.

CIRCOLAZIONE DELLE CORRENTI IN PRESENZA DI STRATIFICAZIONE

Poiché l'onere computazionale necessario per l'applicazione del modello 3D multistrato è di gran lunga maggiore di quello richiesto dal modello bidimensionale, la schematizzazione tridi-



mensionale della Sacca si appoggia su di una griglia di calcolo un po' diversa, che permette una rappresentazione dei fondali della Sacca analoga a quella utilizzata dal modello bidimensionale, ma di dettaglio inferiore (Figura 60). Per quanto concerne il numero di strati, dopo alcuni tentativi preliminari, la colonna d'acqua è descritta suddividendola sulla verticale in 10 strati.

Essendo il modello predisposto per considerare strati di spessore variabile, i 10 strati sono stati definiti con spessori variabili fra 25÷50 cm per gli strati superficiali e circa 1 m per gli strati più pro-

Figura 59: andamento delle portate solide scambiate attraverso le due bocche della Sacca di Scardovari (portate positive se entranti) per effetto della marea e delle mareggiate di bora e scirocco di 1 g/anno.

Figura 60: reticolo di calcolo del modello 3D multistrato e schema della suddivisione della colonna d'acqua in 10 strati.



fondi. In tal modo, anche nelle zone in cui i tiranti d'acqua sono modesti il calcolo è condotto considerando un numero di strati comunque sufficiente per descrivere con buon dettaglio gli eventuali gradienti di densità lungo la verticale.

Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno per le simulazioni con il modello 3D sono costituite, per i nodi del contorno aperto, dall'andamento nel tempo del livello idrometrico, dall'andamento nel tempo dei flussi entranti o uscenti relativamente a ciascuno strato e dalla distribuzione della densità per ciascuno strato. Sono inoltre specificate le condizioni relative alle diverse grandezze per i rami del Delta descritti dallo schema implementato.

La definizione di un così grande numero di parametri, di gran lunga maggiore rispetto al caso bidimensionale, pone generalmente qualche difficoltà sia nella fase di reperimento dei dati

necessari sia con riferimento all'assegnazione di tali dati nella forma appropriata al modello. Ad esempio, relativamente alla salinità l'assegnazione delle condizioni al contorno richiederebbe di conoscere la distribuzione orizzontale e verticale della salinità in mare, nonché le sue variazioni nel tempo. Si tratta di dati generalmente non disponibili o disponibili solo in forma grossolana, ricavati da simulazioni di modelli a grande scala del Mare Adriatico, poco accurati quindi in relazione alle problematiche locali delle lagune del Delta.

Tanto più che nel caso della Sacca di Scardovari la distribuzione della salinità in mare si evolve secondo dinamiche particolarmente complesse per l'interazione tra la circolazione media in Adriatico, gli effetti della circolazione locale indotta dal vento e dal moto ondoso e quelli delle portate fluviali convogliate al mare dai rami del Po di Tolle, del Po di Gnocca e del Po di Goro.

Al riguardo si può ragionevolmente

ritenere che gli effetti stagionali e quelli della circolazione media in Adriatico siano di minore entità rispetto a quelli legati alle piene del fiume e ai fenomeni meteo-marini locali. Ai fini delle analisi relative alla dinamica del contatto tra acque dolci e salate e delle relative correnti di densità, di una certa rilevanza potrebbero essere gli effetti che conseguono alle immissioni delle portate scaricate nella Sacca dalle due idrovore Paltanara e Bonello (Figura 61), le quali drenano bacini di cospicue dimensioni.

Anche se le portate massime scaricate dalle idrovore, pari ad alcuni m^3/s , non sono di entità confrontabile con le portate che la Sacca scambia con il mare, l'immissione di portate di acqua dolce per periodi prolungati dagli impianti idrovori può assumere tuttavia un ruolo rilevante per gli specchi d'acqua nell'intorno dell'immissione, soprattutto nel caso dell'idrovora Bonello, che si colloca in una parte del bacino in cui la circolazione delle correnti di marea è particolarmente debole.



Figura 61: mappa con l'ubicazione delle stazioni di misura di salinità e di vento e degli impianti idrovori che sversano in laguna.

Le problematiche connesse con l'intrusione e la diffusione delle acque dolci di origine fluviale nella Sacca sono di particolare rilevanza principalmente in relazione con gli impatti che si generano sulle attività della pesca e della miticoltura. Per tali ragioni già da alcuni anni il Consorzio di Bonifica Delta del Po assieme ad ARPAV ha messo in atto un sistema di monitoraggio costituito da una serie di boe che misurano con continuità i principali parametri chimico-fisici delle acque nelle lagune del Delta. Nella

Sacca di Scardovari sono attualmente installate due di queste boe (Figura 61), la prima in prossimità della Bocca Nord (Scardo mare) e la seconda in prossimità del margine più interno della laguna (Scardo int.).

La marea

Una delle principali forzanti il sistema costituito dalla Sacca di Scardovari e dal tratto di mare antistante gli scanni e le foci dei rami del Po di Goro e del Po di Gnocca è costituito dai livelli di marea. L'ampiezza delle oscillazioni di marea ha un'importante influenza sui processi di scambio mare-laguna e in particolare sulla distribuzione temporale e spaziale della salinità lungo la costa e all'interno della laguna stessa. Per questo motivo, nelle simulazioni condotte, anziché considerare, com'è usuale, una marea di riferimento periodica di ampiezza costante, si è fatto riferimento ad una marea astronomica tipica di questo tratto di costa adriatica, estesa per un mese lunare (28 giorni). L'andamento della marea utilizzata è illustrato in Figura 62. Il periodo delle oscillazioni è di circa 12 ore, mentre le ampiezze che, per la maggiore delle due fasi giornaliere, varia fra poco più di 1.0 m nei periodi di sизigia e circa 50 cm nei periodi di quadratura.

Il vento

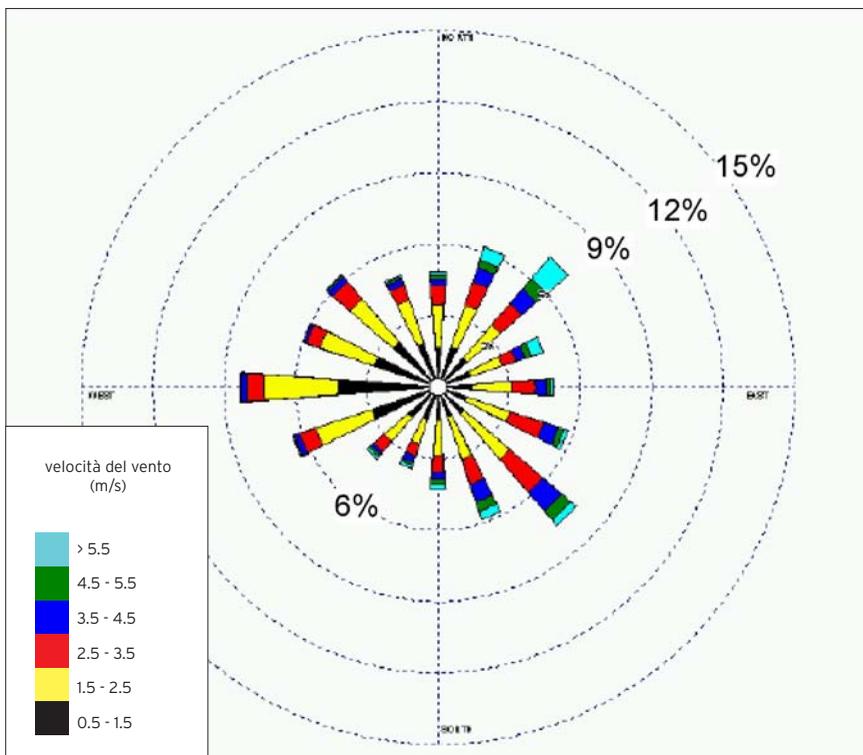
I dati di vento disponibili sono quelli rilevati presso la stazione di Pradon, Porto Tolle, posizionata nella parte meridionale del Delta del Po e gestita da ARPAV - Centro Meteorologico di Teolo, che è dotata di anemometro a 10m dal suolo. L'intensità media del vento registrato durante il periodo considerato (anni 1998-2001) si attesta intorno ai 2 m/s con punte che sperano i 10 m/s per venti provenienti dal settore Est (Levan-

Figura 62: marea astronomica utilizzata nelle simulazioni.

te) e Nord-Est (Bora).

La Figura 63 rappresenta la rosa dei venti ottenuta dall'elaborazione dei dati del periodo considerato. Si osserva che i venti più frequenti (venti regnanti) sono quelli provenienti dal settore NE (Bora), SE (Scirocco) e W (Ponente). Quelli di gran lunga più intensi (venti dominanti) sono però i primi due, provenienti dal mare.

I grafici di Figura 64 rappresentano le rose dei venti per due campioni dei dati registrati, estratti rispettivamente per il periodo estivo e per il periodo invernale. Essi forniscono una distribuzione molto diversa da quella complessiva, per la quale si ha una prevalenza dei venti dal settore occidentale, con i venti più forti provenienti dal settore di Bora, durante i mesi invernali, e una prevalenza dei venti del settore di Scirocco (ma anche in questo caso con i venti più forti orientati a Bora) durante i mesi estivi.

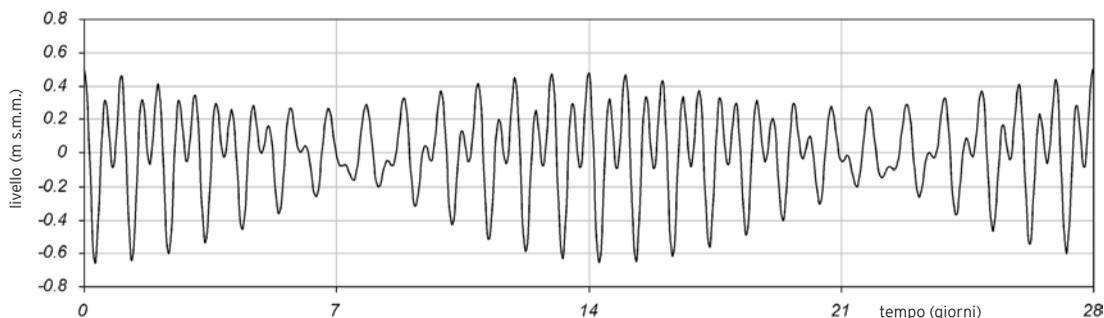


Oltre ai dati di Pradon-Porto Tolle è significativo prendere in esame le registrazioni della stazione anemometrica della centrale Enel di Polesine Camerini [10], [11]. Con riferimento ai dati in questione, sono disponibili le rose dei venti alla quota del camino (altezza 250 m) e al suolo (altezza 10 m). Di seguito è riportata un'elaborazione statistica dei dati, rappresentata dalla rosa delle velocità del vento al suolo in funzione della

direzione di provenienza. Per ciascuna direzione di provenienza la frequenza dei venti appartenenti a diverse classi di intensità è rappresentata con tratti di diverso spessore, come chiaramente evidenziato nella scala grafica.

L'elaborazione, riportata in Figura 64, si basa sulle registrazioni effettuate nel periodo 1 gennaio 1993 - 31 marzo 2005. Si può osservare che la velocità

Figura 63: rosa dei venti: Stazione di Pradon, Porto Tolle, per il periodo 1998-2001 (fonte: ARPAV).



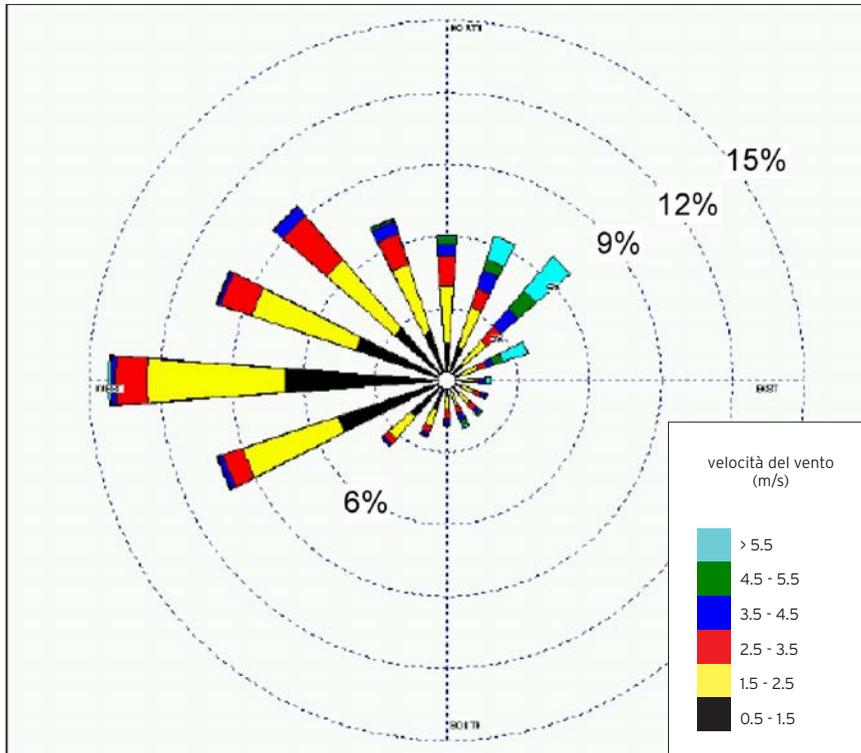
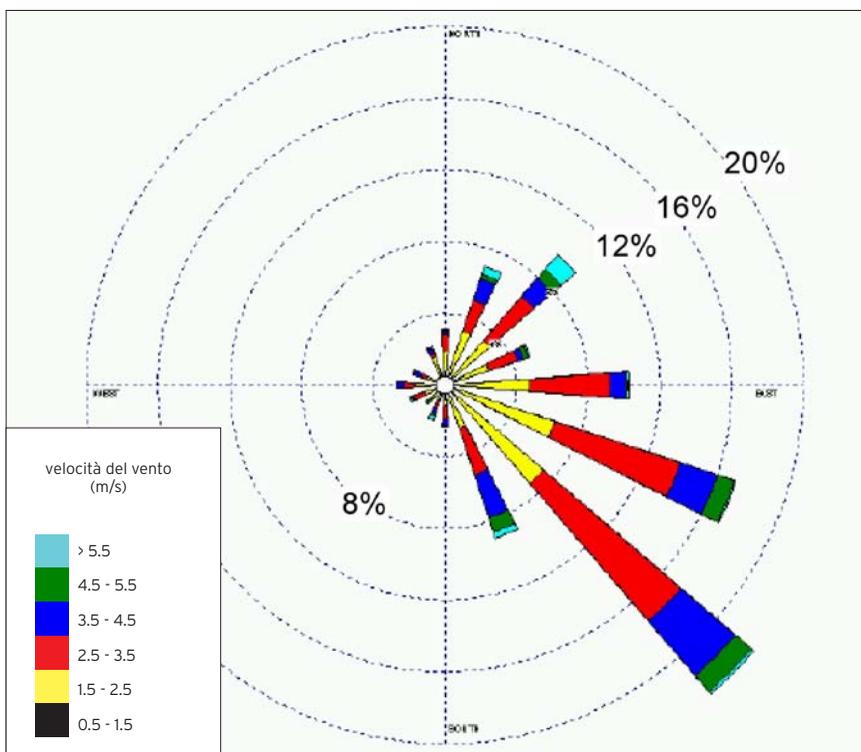


Figura 64: rosa dei venti: Stazione di Pradon, Porto Tolle, per il periodo invernale e per il periodo estivo (tra le ore 14 e ore 16) degli anni 1998-2001 (fonte: ARPAV).

del vento registrata risulta sempre inferiore ai 12 m/s e che gli eventi caratterizzati da intensità maggiore provengono dai settori di Bora (45° N), Levante (90° N) e Scirocco (115° N). Anche questi dati confermano che nell'area sono i venti di Bora e di Scirocco quelli caratterizzati da maggiore frequenza. Fra questi, quelli che mediamente soffiano con intensità maggiore sono ancora i venti di Bora. Lungo la gronda della Sacca sono presenti due impianti idrovori che sversano in laguna (idrovora Bonelli e idrovora Paltanara).



La Figura 65 illustra le portate medie sollevate dalle due idrovore durante l'anno 2008. La portata media annua scaricata è di circa 0.68 m³/s, con valori massimi che nel mese di giugno superano di poco 1.76 m³/s. Si tratta di portate d'acqua dolce molto modeste se confrontate con le portate che, per effetto delle oscillazioni della sola marea, la laguna scambia con il mare (circa 500 m³/s nella sezione che divide la Sacca di Bottonera da quella di Scardovari).

Per tale ragione queste immissioni non possono produrre effetti significativi sulla salinità media delle acque della Sacca. Le immissioni delle due idrovore, quindi, possono essere al più considerate come contributi di un qualche rilievo solo in relazione alla salinità delle acque nell'intorno degli scarichi degli impianti e nei periodi di loro prolungata attività.

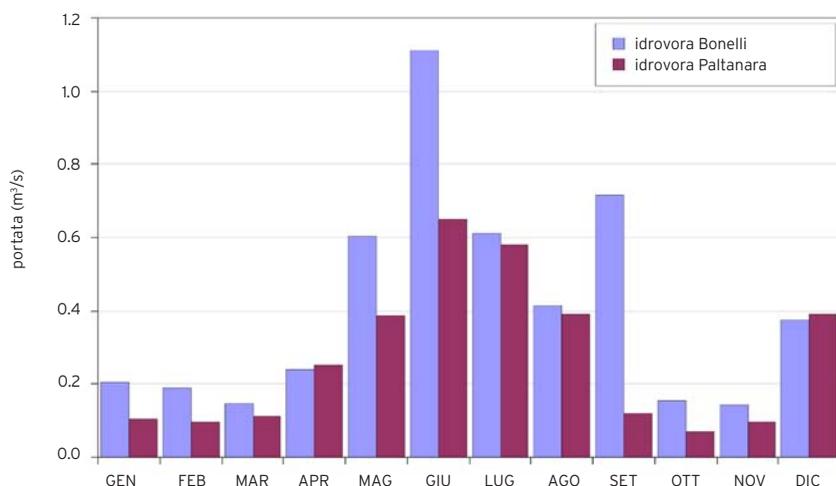


Figura 65: valori medi mensili della portata scaricata dall'idrovora Paltanara e dall'idrovora Bonelli nella Sacca di Scardovari (dati relativi all'anno 2008).

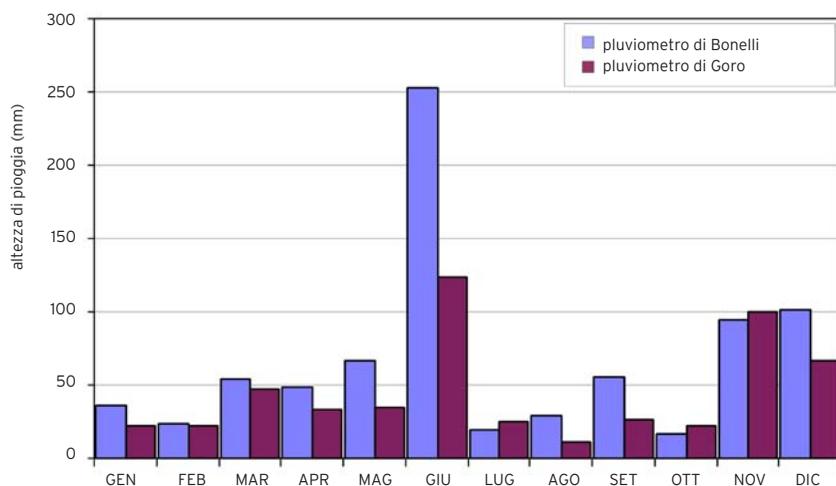


Figura 66: andamento nel tempo dell'altezza di pioggia misurata nel 2008 ai pluviografi di Bonelli e di Goro.

La piovosità

Gli effetti della pioggia diretta al suolo nell'area della Sacca non sono rilevanti ai fini dei problemi esaminati. Sulla base dei dati pluviometrici disponibili ai pluviografi di Bonelli e di Goro (Figura 66), l'apporto meteorico diretto sulla Sacca è nel suo complesso quantitativamente assimilabile, come ordine di grandezza, a quello delle idrovore, ma con effetti molto meno importanti essendo distribuito sull'intero specchio liquido. Considerando una superficie lagunare di circa 29 km², l'afflusso medio mensile di 67 mm registrato al pluviografo di Bonelli (quello di Goro, per il 2008, registra un afflusso medio mensile di 44 mm) corrisponde ad una portata costante di 0.7 m³/s con punte di 2.8 m³/s durante il mese di giugno. Per la porzione interna della laguna (la Sacca di Scardovari vera e propria), caratterizzata da una superficie di circa 16.5 km², i valori di portata media annua e di portata di picco durante il mese di giugno si riducono a 0.4 m³/s e 1.6 m³/s rispettivamente. Si tratta di portate d'acqua dolce molto modeste, confrontabili, come si è detto, con quelle immesse nel bacino lagunare dai due impianti idrovori di Paltanara e di Bonelli.

La salinità

Lungo tutta la fascia costiera deltizia, la salinità risulta essere relativamente bassa, rispetto a quella caratteristica dell'Adriatico, a causa delle portate d'acqua dolce scaricate dal Po e dall'Adige. In Figura 67 è riportata, a titolo di esempio, una mappa della salinità calcolata con un modello di circolazione dell'Adriatico (modello AdriaRoms disponibile presso ARPA Emilia Romagna, www.arpa.emr.it/sim/?mare&idlivello=72).

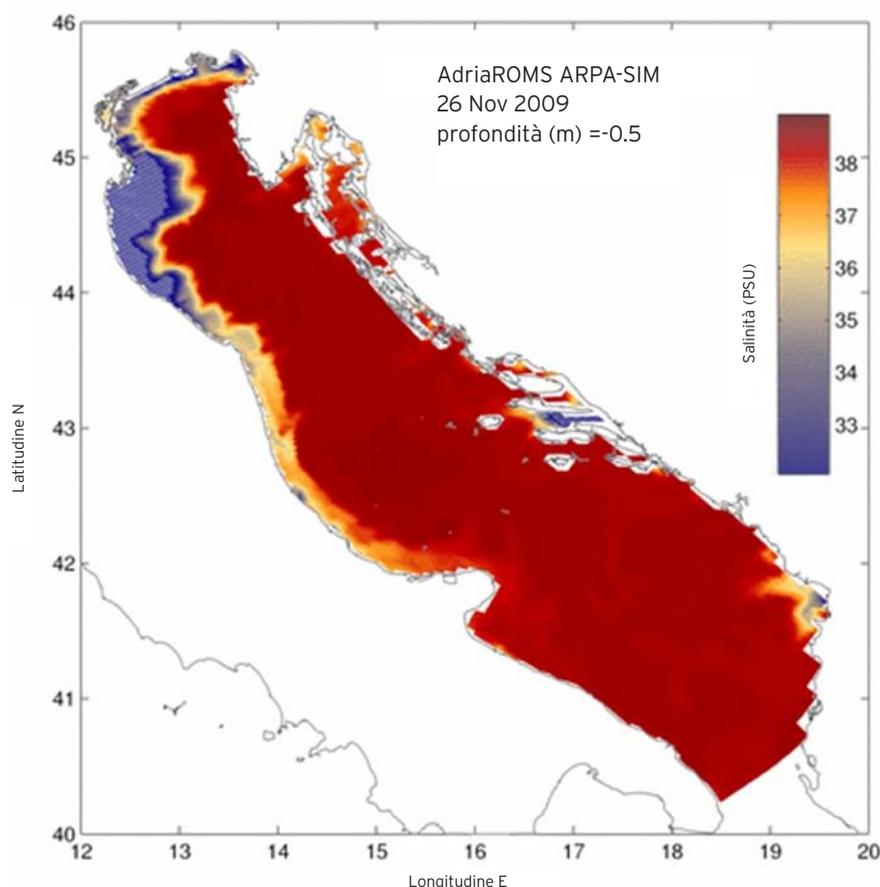
Essa mostra come un "plume" di ac-

que a ridotto tenore salino si estenda su di un'ampia fascia davanti alla costa del-tizia. Le dimensioni e i valori di salinità di questo "plume" sono fortemente varia-bili durante l'arco dell'anno, in relazione al regime delle portate convogliate dai due suddetti fiumi e al sistema della cir-colazione litoranea, che assume caratteri particolarmente complessi, soprattutto nel mare antistante le Sacche di Scardo-vari e di Goro in concomitanza con eventi meteorologici e meteo marini intensi [17].

Accanto a queste indicazioni, relati-ve al tratto di mare antistante la laguna sono disponibili alcune serie di rilievi di salinità all'interno della laguna. il Consor-zio di Bonifica Delta del Po, insieme ad Arpav, gestisce, come si è ricordato, due boe che misurano in continuo la salinità, la temperatura, il pH e l'ossigeno disciol-to. Un esempio dell'andamento nel tempo della salinità rilevata, relativamente agli anni 2007 e 2008 è riportato in Figura 68.

Gli andamenti osservati evidenziano da una parte le forti variazioni stagionali cui è soggetta la salinità sia nella parte più esterna che in quella interna della laguna. Si tratta di variazioni da mette-re in relazione alle variazioni stagionali della salinità lungo la costa del delta del Po già evidenziate. Al tempo stesso si osservano oscillazioni del contenuto sa-lino, a maggiore frequenza, determinate sostanzialmente dall'azione della marea, la cui ampiezza è invece variabile con la distanza dalle bocche: ampiezze dell'or-dine di 10 ppt si registrano nella stazione prossima alla bocca Nord, mentre ampiezze sensibilmente inferiori, dell'or-dine di 1-2 ppt, sono registrate alla boa interna.

Ulteriori indicazioni quantitative, car-atterizzate da una breve estensione



temporale ma da una distribuzione spa-ziale sensibilmente estesa, provengono dai risultati di due campagne di misu-ra realizzate dal Consorzio a supporto dell'intervento di apertura della Bocca Nord negli anni 1996 e 1997.

Le due campagne di misura, realizza-te prima e subito dopo il completamen-to dei lavori per la apertura della Bocca Nord, hanno consentito di rilevare, me-diante una serie di misure correntome-triche e mareografiche, alcuni aspetti importanti dell'idrodinamica lagunare grazie all'impiego di particolari sonde multiparametriche in grado di acquisire profili verticali ad alta risoluzione di tem-peratura, salinità, ossigeno disciolto e clorofilla.

Queste indagini hanno permesso per

Figura 67: esempio di mappa della salinità media alla profondità di 0.5 m dalla superficie calcolata con in modello AdriaRoms di circolazione in Adriatico (Arpa Emilia Romagna).

la prima volta di ottenere una mappatura della distribuzione della salinità nella Sacca, evidenziando le notevoli variazioni spaziali e temporali che possono aver luogo nel bacino, anche in condizioni meteo marine ordinarie, e l'entità dei fenomeni di stratificazione sia in direzione orizzontale sia in senso verticale.

Le mappe di Figura 69-70 forniscono una sintesi dei risultati ottenuti. Esse evidenziano innanzitutto le forti differenze nella distribuzione della salinità che si riscontrano nella Sacca non solo fra una campagna di misura e l'altra, ma anche nel corso della stessa campagna a distanza di poche ore, in relazione alle diverse condizioni di marea e all'evoluzione della distribuzione della salinità nel braccio di mare antistante il litorale. In secondo luogo esse forniscono indicazioni significative sulla stratificazione della colonna d'acqua.

I risultati confermano in definitiva la maggiore intensità dello scambio mare-

laguna nella zona più prossima alla bocca, che si manifesta con forti variazioni di salinità nell'arco di un ciclo mareale. In tale zona si riscontrano condizioni di forte stratificazione, più intensa durante le fasi di flusso e meno pronunciata durante le fasi di riflusso per il mescolamento verticale che si sviluppa all'interno del bacino lagunare.

Nella zona più interna della laguna, invece, la salinità è soggetta a modeste variazioni a scala mareale e non si osservano fenomeni evidenti di stratificazione. Si riscontra una leggera differenza di salinità fra il lato orientale, più salato e il lato occidentale, caratterizzato da minore salinità anche a causa delle immissioni di acque dolci da parte delle idrovore e della diversa salinità che si registra nel tratto di mare antistante la bocca Nord e la bocca Sud.

Esame della situazione attuale

Prima di procedere all'analisi del com-

portamento idrodinamico della laguna di Scardovari mediante il modello 3D multistrato, si sono condotte una serie di verifiche preliminari per valutarne la congruenza con i risultati forniti dal modello bidimensionale. Un esempio, forse il più stringente, è il confronto nel tempo fra gli andamenti delle portate fluenti attraverso le due bocche della Sacca, per una marea sinusoidale di riferimento (Figura 71).

Mediante il modello 3D multistrato si possono individuare le principali caratteristiche del comportamento della Sacca di Scardovari quando il sistema è forzato da eventi di diversa natura, quali possono essere considerati eventi di piena o di magra pronunciata nel Po, in presenza di venti di Bora e di Scirocco. Determinate le condizioni iniziali, sono state definite con una simulazione preliminare della durata di 28 giorni, che mette a regime il sistema, applicando sul contorno aperto la marea di Figura 62 e assumendo una salinità costante pari a 35‰.

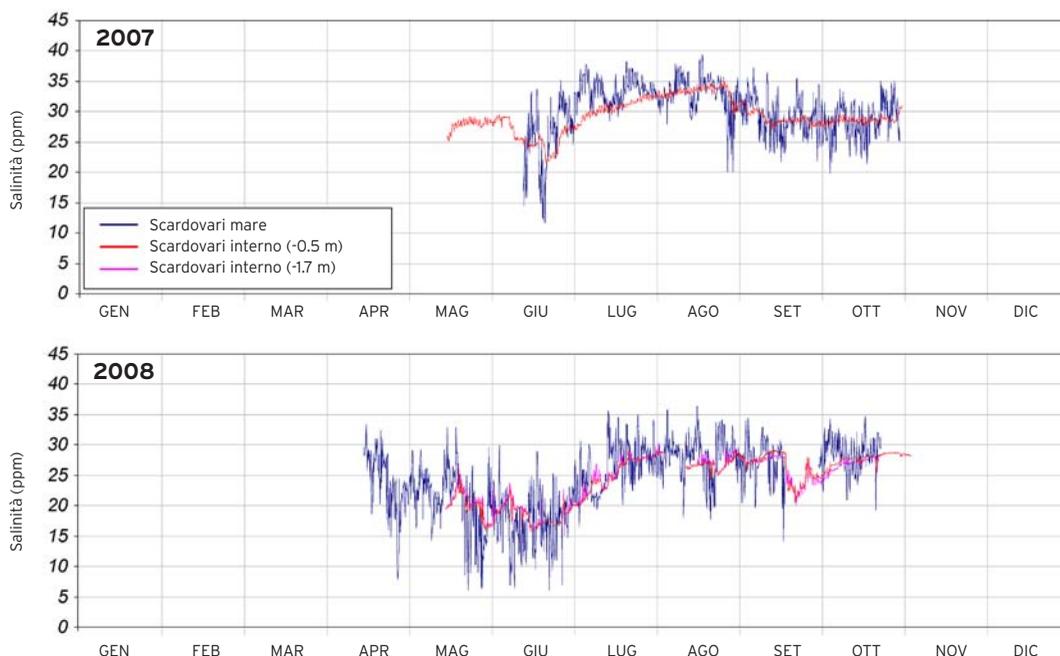


Figura 68: andamento nel tempo della salinità misurata durante gli anni 2007 (sopra) e 2008 (sotto) nelle due stazioni fisse la cui ubicazione è indicata in Figura 61.

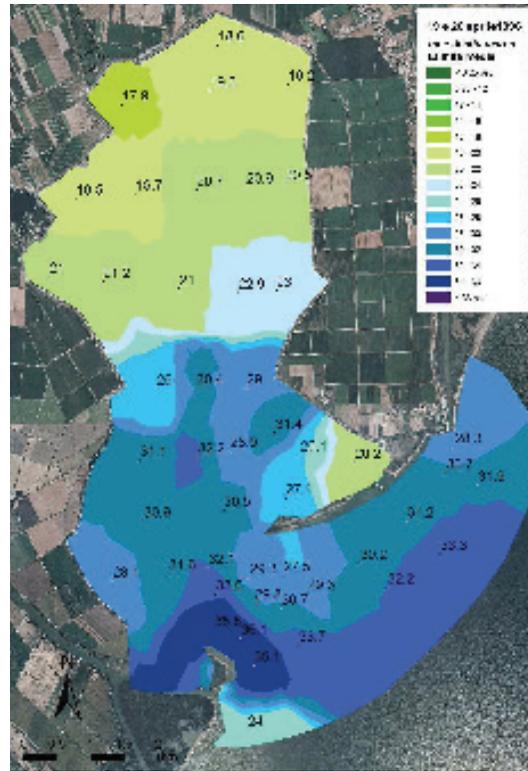
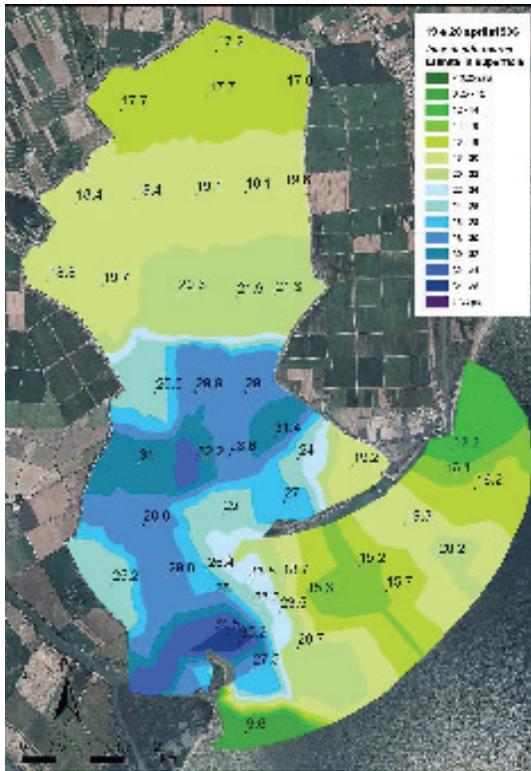


Figura 69: campagna di misura dei parametri chimico-fisici nella Sacca di Scardovari effettuata il 27-27 aprile 1996 prima dell'apertura della Bocca Nord. Mappe della salinità media rilevata nelle fasi di alta e bassa marea in superficie (tra 0 e 0,5 m dalla superficie) e su tutta la colonna d'acqua.

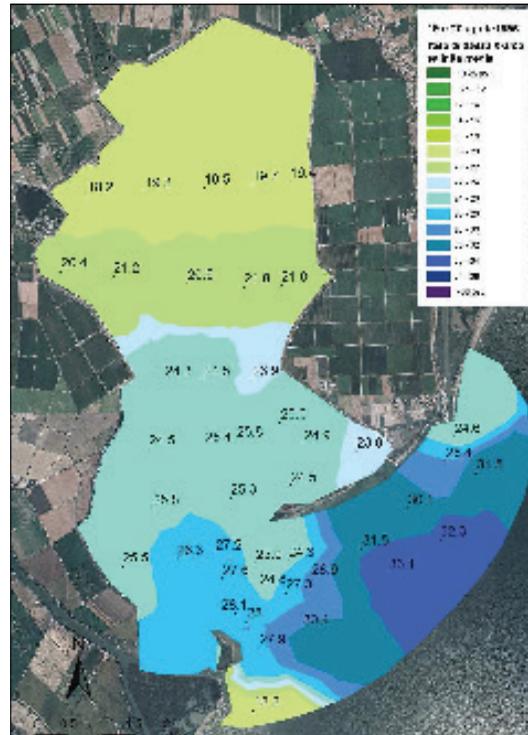
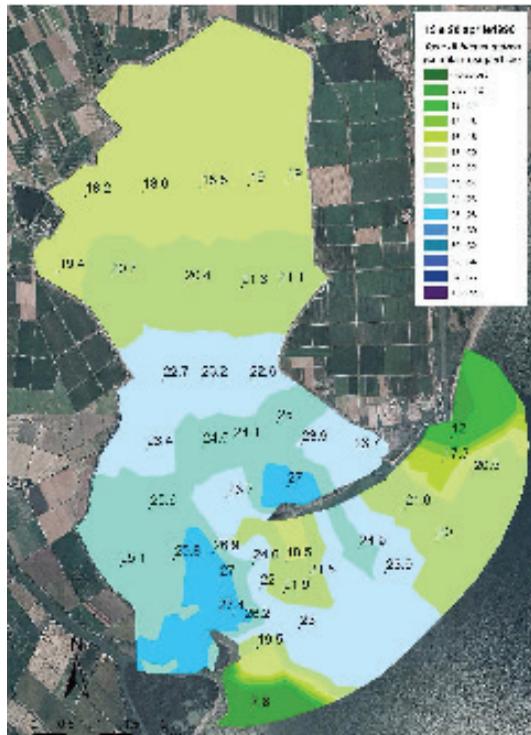
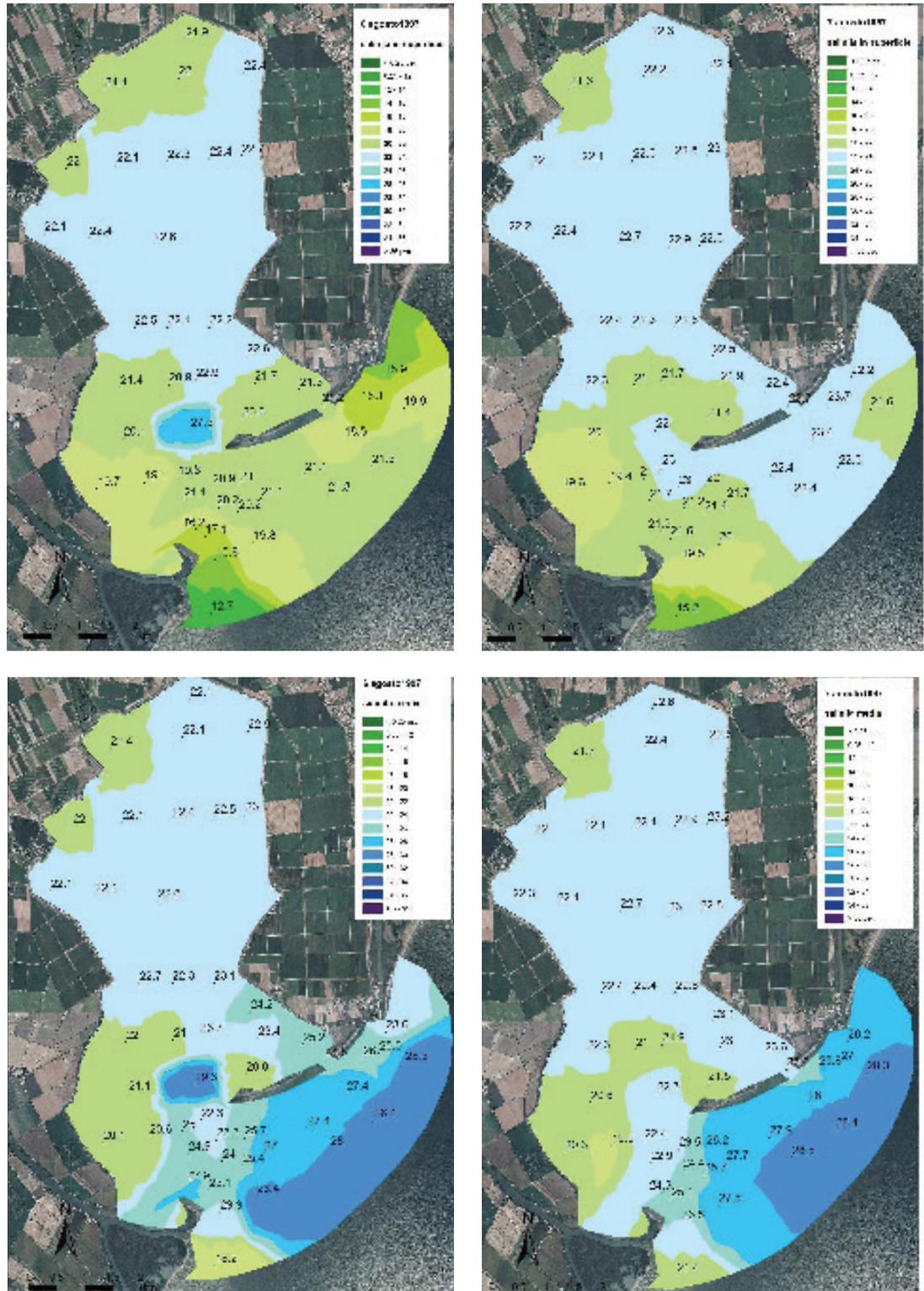


Figura 70: campagna di misura dei parametri chimico-fisici nella Sacca di Scardovari effettuata il 6-7 agosto 1997 dopo l'apertura della Bocca Nord. Mappe della salinità media rilevata nell'arco della giornata in superficie (tra 0 e 0,5 m dalla superficie) e su tutta la colonna d'acqua.



In ingresso ai rami del Po coinvolti, sono state assegnate portate costanti pari a 200 m³/s (Po di Tolle), 170 m³/s (Po di Gnocca) e 110 m³/s (Po di Goro). Si tratta di portate rappresentative di condizioni medie del regime del Po [11], che si verificano quando a Pontelagoscuro fluiscono circa 1000 m³/s, valore che secondo le registrazioni disponibili risulta superato nel 50% dei casi [11].

Alle idrovore Paltanara e Bonelli, sono state attribuite portate corrispondenti ai valori medi annuali pari rispettivamente a 0.27 m³/s e a 0.41 m³/s. Esaminando i risultati ottenuti in quattro diversi punti interni della laguna a profondità diverse e lungo due distinti profili longitudinali in alcuni istanti caratteristici del calcolo (Figura 72) è possibile un breve commento sul comportamento della laguna relativamente alla distribuzione della salinità. Per il punto più interno fra quelli considerati e per tre diverse profondità le oscillazioni nel tempo della salinità sono piccole, appena percettibili (Figura 73).

Una maggiore variazione di salinità si riscontra per il punto centrale con

un'ampiezza delle oscillazioni di circa 2÷3 ppt. Per entrambi i punti inoltre si riscontra una distribuzione della salinità sostanzialmente costante lungo la verticale, a indicare che la colonna liquida è sostanzialmente mescolata. Per i due punti posti in corrispondenza delle bocche lagunari, si riscontra, invece, una variazione della salinità durante il ciclo di marea relativamente elevata, con ampiezze che in superficie oscillano fra il 5‰ e il 10‰. La colonna liquida mostra, inoltre, consistenti fenomeni di stratificazione, con salinità sensibilmente più bassa in superficie, soprattutto durante le fasi di flusso.

È da segnalare che, per effetto della stratificazione, l'ampiezza delle variazioni del contenuto salino dello strato posto immediatamente al di sotto dello strato superficiale (mediamente 50 cm al di sotto della superficie libera), è sensibilmente inferiore alle ampiezze di oscillazione della salinità sia dello strato sia degli strati più profondi. Le caratteristiche di stratificazione sono più evidenti se si esamina la distribuzione di salinità lungo i due profili longitudinali considerati in due diversi istanti del ciclo marea-

le (Figura 74-75).

In particolare per il profilo che interessa la Bocca Nord (Figura 74), alla fine della fase di flusso si osserva una decisa stratificazione che si estende per poche centinaia di metri all'interno della laguna, a partire dal tratto di mare antistante la bocca stessa. Durante la fase finale del periodo di riflusso, invece, la stratificazione è meno pronunciata ed è limitata al solo tratto di mare. Molto diverso il comportamento della parte più interna della laguna dove, durante l'intero ciclo di marea, la salinità subisce modeste variazioni e risulta sensibilmente uniforme in direzione verticale. Condizioni analoghe si riscontrano lungo il profilo che taglia la Bocca Sud (Figura 75).

Lungo questo profilo, tuttavia, la salinità superficiale risulta inferiore a quella del profilo precedentemente considerato e la stratificazione, sensibilmente più pronunciata, si spinge all'interno della laguna fino quasi a raggiungere lo scarico dell'idrovora Paltanara. Anche in questo caso la stratificazione è ben evidente durante la fase di flusso, mentre nella fase di riflusso la laguna è caratterizzata

Figura 71: confronto tra le portate alle bocche calcolate mediante i modelli 2D e 3D multistrato per una marea sinusoidale di ampiezza 0.5 m.

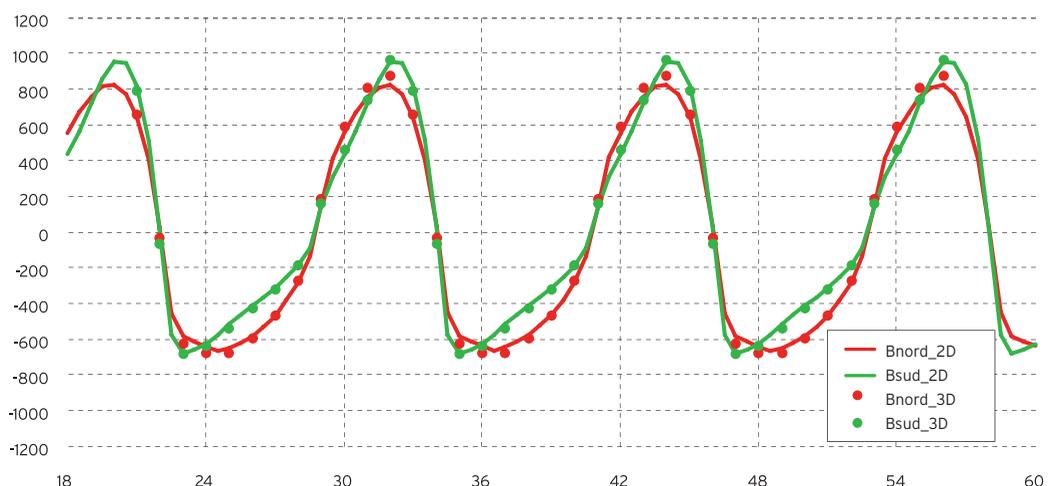
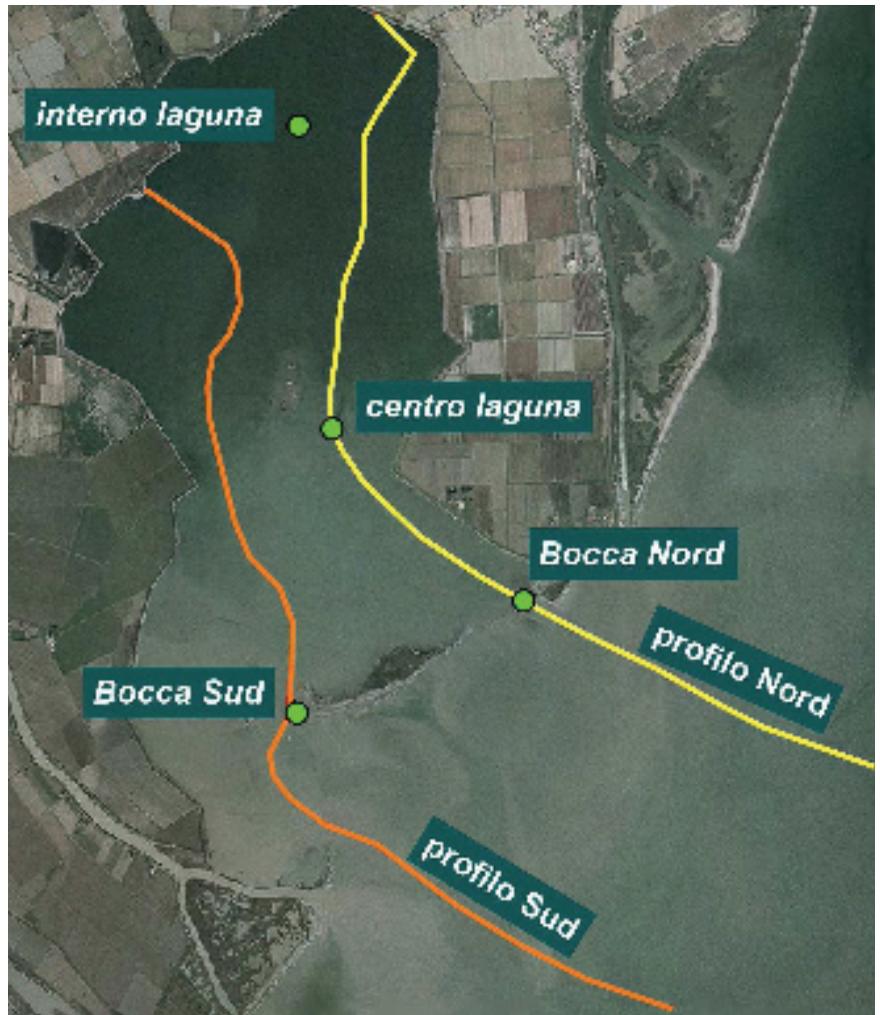


Figura 72: ubicazione dei quattro punti all'interno della laguna per i quali sono estratti gli andamenti nel tempo della salinità e ubicazione dei due profili longitudinali attraverso le bocche lagunari.



da una distribuzione sensibilmente uniforme della salinità. Complessivamente la salinità all'interno della laguna è leggermente inferiore lungo il profilo che passa per la Bocca Sud rispetto ai valori che si realizzano lungo il profilo che interessa la Bocca Nord.

Una valutazione quantitativa di questo particolare comportamento in prossimità delle bocche lagunari, ovvero della presenza di una marcata stratificazione durante le fasi di flusso e di una distribuzione sostanzialmente uniforme della salinità lungo la verticale durante le fasi di riflusso, è illustrato nella Figura 76.

I primi due grafici della figura illustrano l'andamento nel tempo della salinità in corrispondenza delle due bocche relativamente allo strato superficiale e a uno strato profondo. Il terzo grafico riporta invece la differenza tra la salinità superficiale e quella profonda, distinguendo fra le fasi di flusso e di riflusso. È evidente la maggiore differenza di salinità, e quindi la significativa stratificazione, che caratterizza le fasi di flusso con valori che, durante i periodi di sizigie, raggiungono il 15%.

Durante le fasi di riflusso, invece, se si eccettuano i picchi di breve durata

prossimi all'inversione di marea, le differenze di salinità fra strato superficiale e strato profondo sono di appena il 2-3%. Dal complesso dei risultati ottenuti, si ha la conferma che la parte di laguna più prossima alle bocche della laguna è molto attiva ed è caratterizzata da un intenso scambio con il mare. Durante le fasi di flusso la corrente si presenta sensibilmente stratificata con le acque più dolci che tendono a penetrare in superficie all'interno del bacino lagunare, soprattutto attraverso la Bocca Sud.

Una volta entrate le lagune, queste acque sono soggette a fenomeni di di-

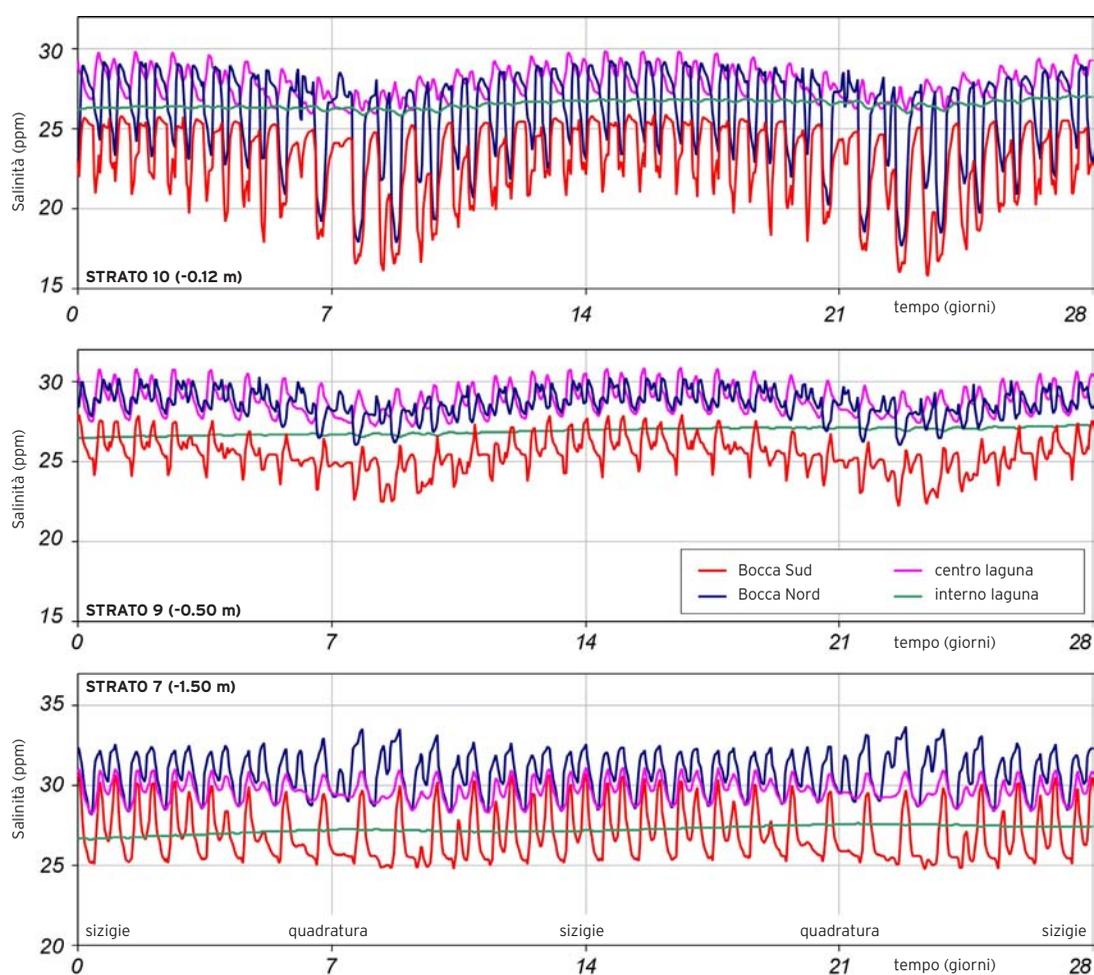


Figura 73: andamento della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72) relativi agli strati: 10 (primi 25 cm), 9 (50 cm dalla superficie), e strato 7 (1.5 m dalla superficie).

spersione sia in senso verticale sia in direzione laterale. Si innescano come conseguenza attivi processi di mescolamento che rendono sensibilmente omogeneo il contenuto salino delle acque.

Ne deriva che nelle fasi di riflusso le acque interne, rimescolate, non presentano caratteristiche di stratificazione uscendo attraverso le bocche lagunari. Nella parte più interna della laguna il contenuto salino, a scala mareale, si mantiene sostanzialmente costante sia per il fatto che questa parte della Sacca è alimentata da acque già rimescolate provenienti dalle zone più prossime alle

bocche sia perché le portate che interessano l'area settentrionale sono sensibilmente inferiori rispetto a quelle che fluiscono attraverso la parte più meridionale del bacino lagunare.

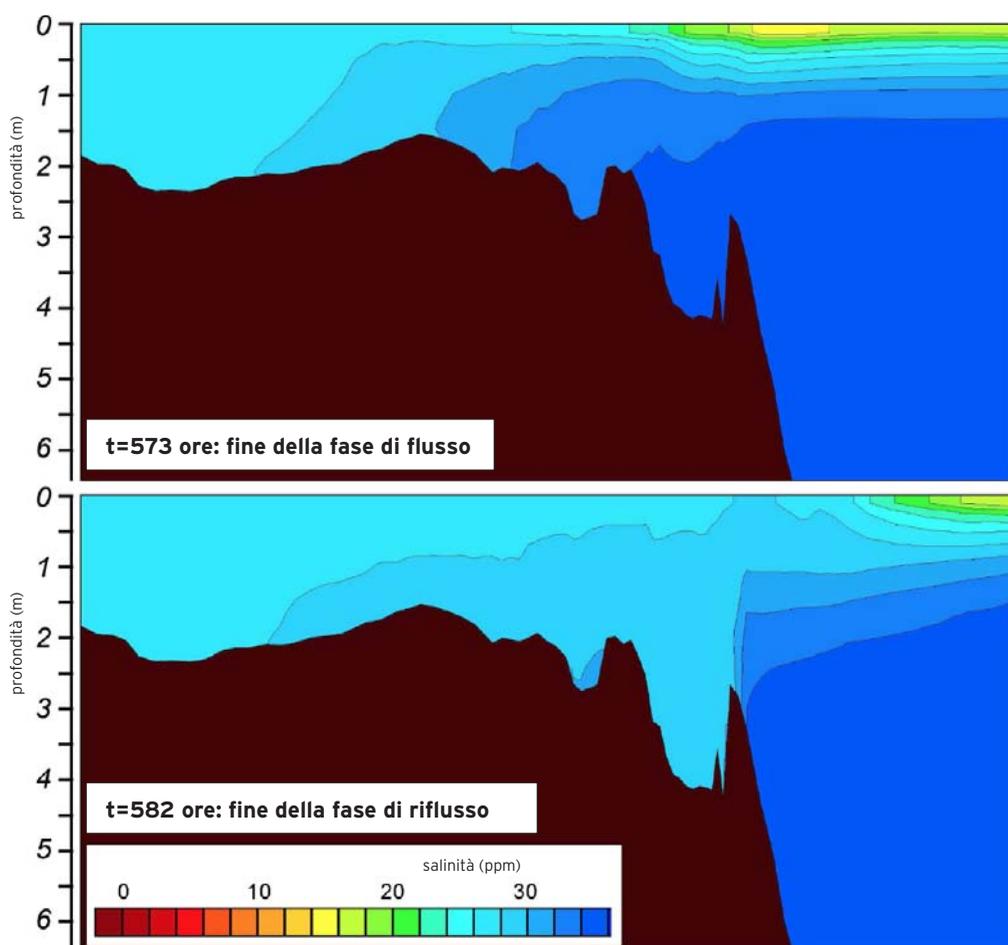
In condizioni normali, la parte occidentale della Sacca è caratterizzata da un contenuto salino leggermente inferiore a quello della parte orientale. Tale circostanza è giustificata da una parte dalla notevole vicinanza alla bocca Sud della foce del ramo orientale del Po di Gnocca, dall'altra dalla presenza delle immissioni di portata delle idrovore Paltanara e Bonelli ubicate lungo il bordo occiden-

te della laguna. Queste considerazioni, relative al comportamento idrodinamico della laguna in condizioni meteo-climatiche e idrologiche medie, sono sinteticamente illustrate nelle mappe di Figura 77, che illustrano, per lo strato superficiale e per uno strato profondo (strato 7), la distribuzione dei valori minimi e massimi del contenuto salino.

Effetti di una piena del Po

A partire dalle condizioni medie di regime precedentemente illustrate sono state innanzitutto simulate le conseguenze di una piena del Po, immettendo

Figura 74: distribuzione della salinità lungo il profilo per la Bocca Nord (vedi Figura 72) alla fine della fase di flusso e di quella di riflusso.



in corrispondenza delle sezioni di monte dei rami del Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro degli idrogrammi di piena sintetici pari rispettivamente a 1000 m³/s, 850 m³/s e 550 m³/s (Figura 78), che corrispondono grossomodo a valori di circa cinque volte superiori alla portata media. Questi idrogrammi di piena sono stati introdotti nel sistema in due istanti differenti, durante il periodo simulato: la prima immissione ha inizio all'istante t=0, quando il bacino lagunare è interessato da una marea di sizigie (Figura 62); la seconda immissione è imposta all'istante t=21 giorni circa, quando il sistema ha ormai dimenticato il primo evento e il bacino lagunare è sollecitato da una

marea di quadratura (Figura 62).

Nella Figura 79 sono riportati gli andamenti nel tempo della salinità calcolata in quattro punti all'interno della laguna (Figura 72) a tre differenti profondità: in superficie, ad una profondità di poco inferiore (mediamente 50 cm al di sotto della superficie libera) e a una profondità di circa 1.5 m in prossimità del fondo. Nella parte più interna della laguna, l'evento di piena comporta una modesta riduzione della salinità, con variazioni massime nello strato superficiale che non superano il 2‰.

Al contrario, in prossimità delle boc-

che lagunari e, in particolare, in vicinanza della Bocca Sud si riscontrano forti riduzioni di salinità, sempre per lo strato superficiale, con punte massime di circa il 20‰ e un parallelo importante incremento dell'ampiezza delle oscillazioni di salinità stessa associate alla marea. Le variazioni di salinità sono influenzate dalle caratteristiche della marea. Durante le fasi di quadratura le acque dolci penetrano più agevolmente all'interno della laguna, determinando una maggiore riduzione di salinità rispetto ad un identico evento di piena che si sviluppi in presenza di maree di sizigie.

Nella Figura 80 sono riportate, in

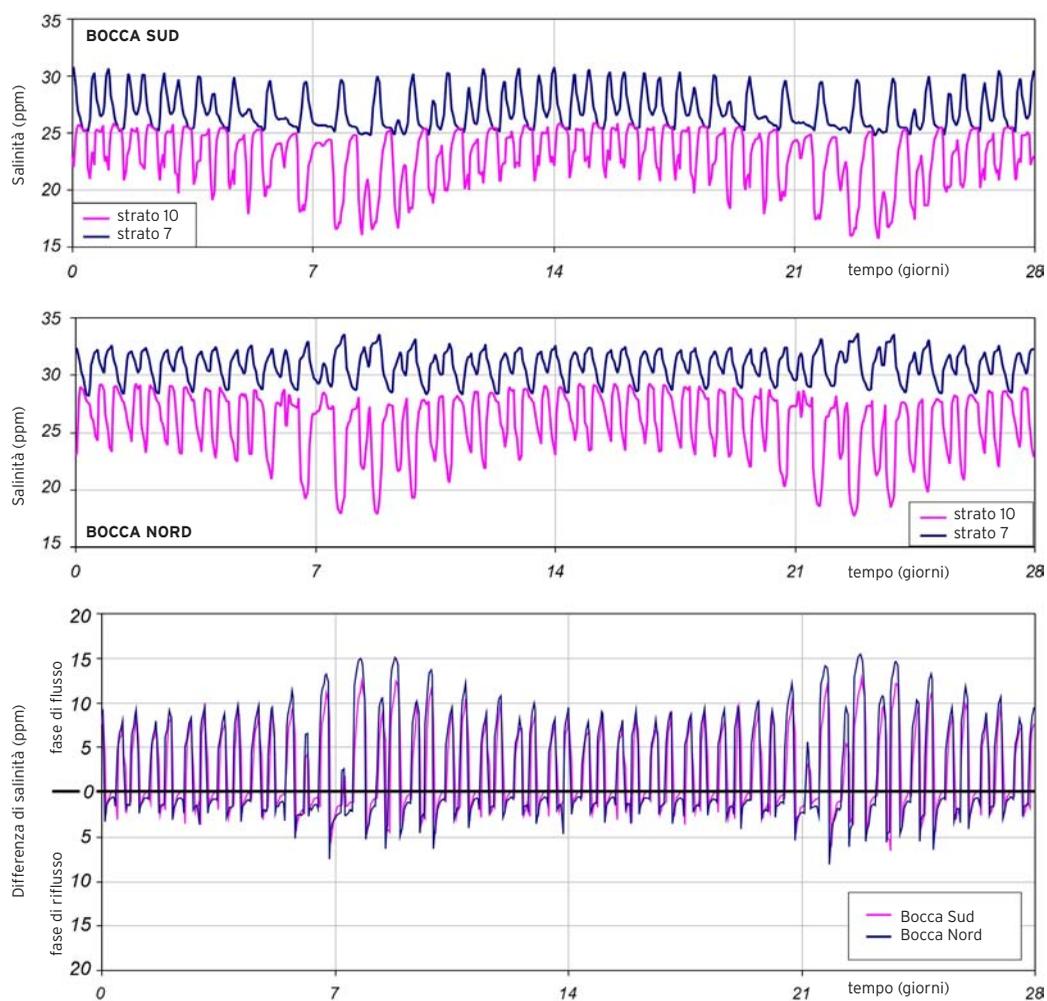


Figura 75: distribuzione della salinità lungo il profilo per la bocca Sud (vedi Figura 72) alla fine della fase di flusso e di quella di riflusso.

forma di mappe, le distribuzioni spaziali del contenuto salino durante il secondo evento di piena simulato, al termine delle fasi di flusso e di riflusso. Le mappe si riferiscono a concentrazioni saline calcolate per lo strato superficiale e per uno strato posto a profondità intermedia (profondità di circa 1.5 m).

Resta confermato che nella parte più interna della laguna le variazioni di salinità in occasione di una piena del Po sono relativamente modeste. Inoltre, in direzione verticale, la salinità si presenta distribuita in modo sensibilmente uniforme. Al contrario, nella parte meridionale della laguna e soprattutto in prossimità del-

la Bocca Sud, si registrano forti variazioni nel tempo della salinità e una marcata stratificazione, più accentuata al termine della fase di flusso. Le modeste variazioni di salinità riscontrabili nella parte più interna della laguna sono determinate dal fatto che l'evento di piena simulato è relativamente breve (2 giorni).

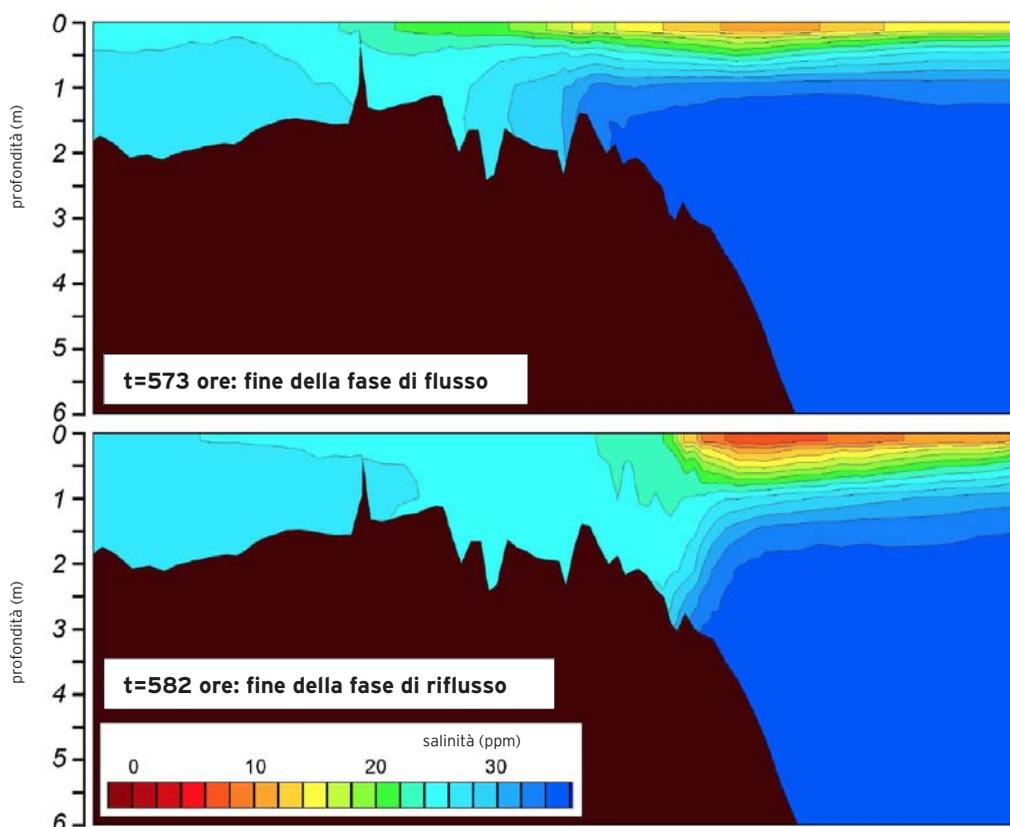
Ne deriva che le condizioni di ridotta salinità nel tratto di mare antistante le bocche non fanno a tempo a propagarsi in profondità all'interno della laguna. Queste ultime considerazioni, come si vedrà, sono confermate dai risultati del comportamento del bacino lagunare per condizioni di magra prolungata del Po.

Effetti di una magra prolungata del Po

A partire sempre dalle condizioni medie di regime sono stati simulati gli effetti di una magra prolungata del Po. In particolare in corrispondenza delle sezioni di monte dei tre rami del Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro sono state immesse portate ridotte e pari rispettivamente a 20 m³/s, 17 m³/s e 11 m³/s, corrispondenti grossomodo a un decimo della portata media dei rami stessi.

Nella Figura 81 sono riportati gli andamenti nel tempo della salinità calcolata negli stessi quattro punti all'interno della laguna già indicati per tre differenti

Figura 76: andamenti nel tempo della salinità in corrispondenza delle due bocche per lo strato superficiale (strato 10) e per uno strato profondo (strato 7) e andamento nel tempo della loro differenza distinta per le fasi flusso e di riflusso.



profondità: in superficie, a una profondità intermedia di circa 50 cm al di sotto della superficie libera e a una profondità di circa 1.5 m in vicinanza del fondo.

Si osserva, in generale, un incremento della salinità in tutta la laguna. Questo incremento risulta relativamente rapido (qualche giorno) per i due punti situati in prossimità delle bocche, mentre nella parte più interna della laguna la variazione di salinità è molto più lenta e prosegue per tutta la durata della simulazione (circa un mese). Le variazioni di salinità si distribuiscono in modo sensibilmente uniforme sia in senso planimetrico sia in direzione verticale, attraverso tutta la colonna liquida. Esse sono relativamente contenute, risultando dell'ordine del 2‰.

Effetti dei venti di Bora e di Levante

Sempre a partire dalle condizioni medie sono stati simulati gli effetti del vento sui processi di mescolamento all'interno della laguna e, soprattutto, sullo scambio tra la laguna e il mare. Nelle simulazioni sono stati considerati un vento di Bora (direzione 45°N) caratterizzato da una velocità costante di 12 m/s che soffia ininterrottamente per 24 ore e un vento di Levante (90°N) con velocità di 8 m/s e durata 24 ore. Sia il vento di Bora che quello di Levante sono stati imposti durante un periodo di sizigia e durante un periodo di quadratura, per evidenziare l'effetto dell'ampiezza delle oscillazioni di marea sul fenomeno.

Nella Figura 81 sono riportati gli andamenti nel tempo della salinità calco-

lata nei quattro punti all'interno della laguna già indicati e per tre differenti profondità: in superficie, a una profondità intermedia posta mediamente 50 cm al di sotto della superficie libera e a una profondità di circa 1.5 m in vicinanza del fondo. L'analisi dei risultati ottenuti evidenzia che in occasione sia degli eventi di Bora sia di quelli di Levante si determina all'interno della laguna una sensibile riduzione della salinità. Il vento di Levante è in generale più efficace nel sospingere le acque dolci entro la laguna, producendo, durante l'evento, riduzioni di salinità fino al 20‰. Ovviamente sono soprattutto gli strati più superficiali a risentire gli effetti del vento.

Più in profondità, in vicinanza del fondo, si osserva un comportamento dei flussi di acqua dolce diverso e differen-

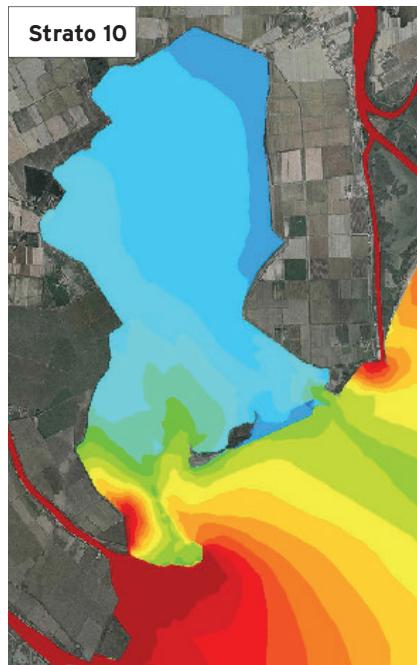
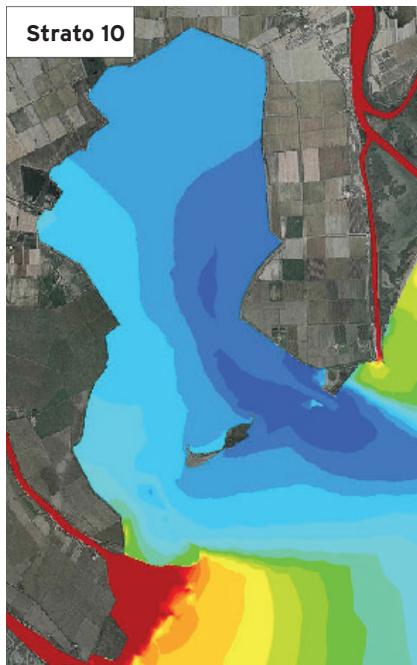


Figura 77:
distribuzione
spaziale dei valori
massimi (a sinistra)
e minimi (a destra)
del contenuto
salino per gli strati
superficiali (strato
10) e profondo
(strato 7).

te per le due bocche. In corrispondenza della Bocca Nord si rileva un modesto effetto del vento di Levante e un effetto ancora più ridotto in presenza di venti di Bora. In prossimità della Bocca Sud, invece, si rileva una consistente riduzione della salinità quando spirano i venti di Levante.

Durante le maree di quadratura la diminuzione di salinità raggiunge quasi il 10%. Trascurabile invece la riduzione di salinità in presenza di venti di Bora. Nel punto centrale della laguna solo lo strato superficiale risente in misura apprezzabile degli effetti indotti dal vento, con riduzioni di salinità che sono più accentuate ancora in occasione di un vento di Levante.

L'intensità del fenomeno è simile durante i periodi di sizigia e di quadratura. Nella posizione più interna della laguna, le simulazioni condotte indicano infine variazioni di salinità modeste, dell'ordine del 2‰, sia in superficie che in profondità. Tali variazioni assumono valori che sono indipendenti sia dal vento (Bora o Levante) sia dalle condizioni di marea (sizigia o quadratura).

La distribuzione spaziale di salinità all'interno della Sacca al termine delle fasi di flusso e di riflusso, relativamente allo strato superficiale e a uno strato profondo prossimo al fondo, è illustrata nelle Figure 82 e 83 rispettivamente per un vento di Bora e di Levante. Restano confermati, in sintesi, i risultati già discussi sugli andamenti temporali della salinità in alcuni punti all'interno della laguna.

Inoltre, durante un evento di Bora (Figura 82), per effetto della direzione caratteristica di provenienza di questo vento, le acque superficiali sono so-

spinte verso Sud-Ovest. In particolare, la Bocca Nord risulta prevalentemente alimentata dalle acque dolci provenienti dal ramo orientale del Po di Tolle, mentre attraverso la Bocca Sud entrano acque con maggiore salinità, essendo le portate scaricate dal ramo del Po di Gnocca sospinte verso Sud-Ovest lungo la costa. L'osservazione trova riscontro anche nella Figura 81, relativamente allo strato più superficiale.

In occasione di venti di Levante (Figura 83), che soffiano quasi ortogonalmente alla costa, le acque dolci presenti nel tratto di mare antistante lo scanno sono sospinte verso le bocche e quindi all'interno della laguna, riducendo sensibilmente la salinità negli strati più superficiali. I risultati ottenuti indicano come la parte più interna della laguna risenta in misura trascurabile di queste forzanti, essendo modeste le variazioni di salinità che si determinano in occasione di eventi di Bora o di Levante, sia in superficie sia, soprattutto, in profondità.

Per una valutazione quantitativa più significativa dell'effetto del vento nella

parte più interna della laguna, cioè in quella parte che maggiormente soffre per un ricambio idrico spesso insufficiente, i risultati delle simulazioni in presenza di vento sono stati confrontati con quelli relativi al caso di assenza di vento. Sono stati in particolare posti a confronto gli andamenti nel tempo della salinità nello strato superficiale, che è quello più sensibile rispetto all'azione del vento, considerando quattro punti interni della parte settentrionale della laguna, (Figura 84).

I risultati del confronto sono illustrati in Figura 85. Si osserva che le variazioni di salinità prodotte dall'azione del vento in questa parte della laguna sono molto piccole. Fa eccezione forse la situazione con vento di Bora e marea di quadratura, in occasione della quale si registrano variazioni di salinità più consistenti, anche se caratterizzate da una breve durata.

In queste simulazioni, il vento è caratterizzato da intensità piuttosto elevate (velocità di 8 m/s per il vento di Levante e 12 m/s per il vento di Bora) e, conseguentemente, da frequenze probabili di

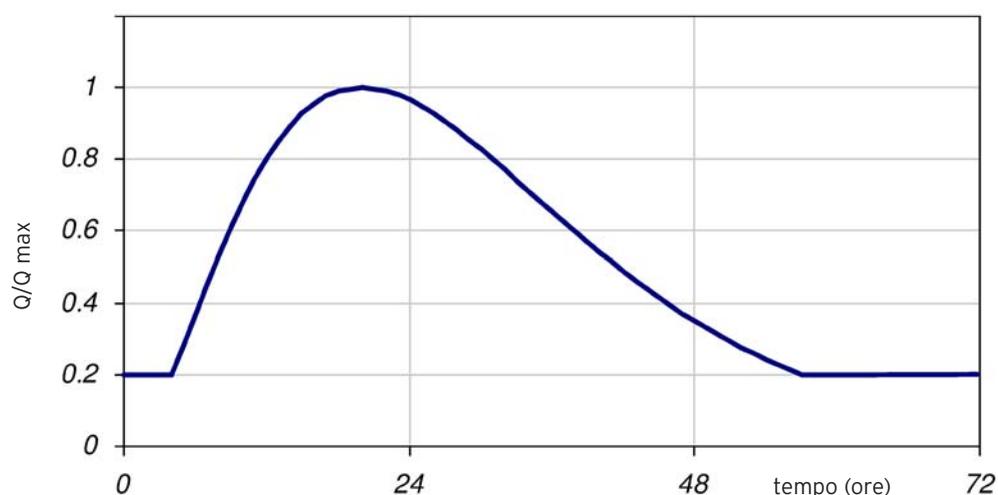


Figura 78:
Idrogramma di piena
sintetica in forma
adimensionale.

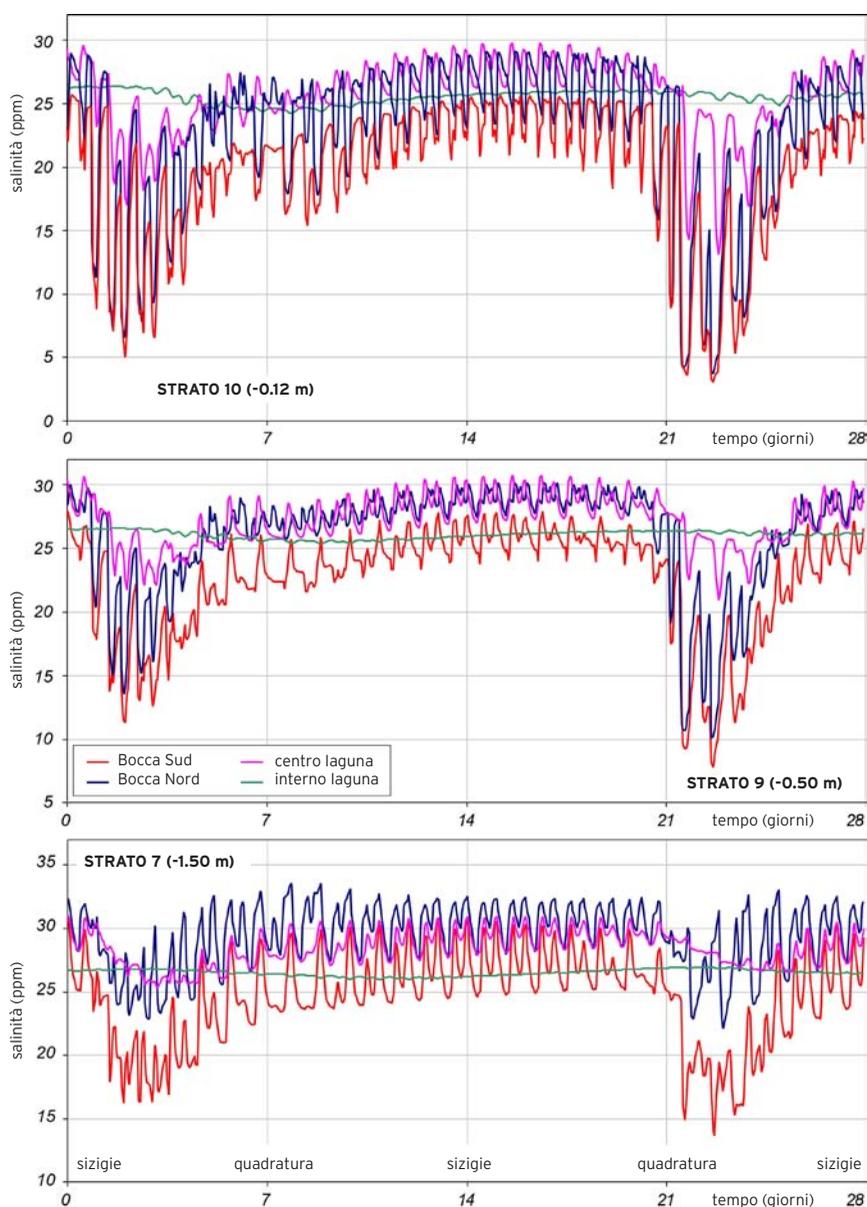


Figura 79: andamento della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72) relativi agli strati: 10 (primi 25 cm), 9 (50 cm dalla superficie), e strato 7(1.5 m dalla superficie) in occasione di due eventi di piena nel Po.

accadimento relativamente basse. Per queste ragioni si è voluto verificare il comportamento idrodinamico della laguna in occasione di venti più frequenti, in presenza di velocità sensibilmente inferiori a quelle prese in esame. In queste condizioni l'effetto del vento è sensibilmente più contenuto e di difficile evidenziazione.

Qualche indicazione può comunque trarsi dai risultati delle simulazioni che analizzano i processi di dispersione di una macchia di particelle esaminati con l'impiego di un modello di tipo lagrangiano dispersivo. Considerando una marea sinusoidale di ampiezza 1 m e periodo 12 ore, il calcolo è stato effettuato rilasciando 2 "macchie" ciascuna composta da 4000 particelle nelle stesse posizioni utilizzate per le stime precedentemente illustrate con riferimento all'utilizzazione del modello bidimensionale.

La Figura 86 mostra il confronto tra i risultati che si ottengono utilizzando la soluzione idrodinamica fornita dal modello bidimensionale (Figura 18) e quelli derivanti dall'impiego del modello 3D multistrato. Dal punto di vista qualitativo vi è un buon accordo tra i risultati forniti dai due diversi modelli. Si osserva, tuttavia, una maggiore dispersione quando si faccia riferimento all'idrodinamica calcolata con il modello 3D.

È però necessario tener presente, al riguardo, che il modello 3D utilizza una griglia di calcolo meno raffinata, che non si esclude possa introdurre sul processo fisico una qualche dispersione di tipo numerico. La Figura 87 sintetizza i risultati dello stesso calcolo (relativamente al solo caso di impiego del modello 3D) all'istante $t=96$ ore. La macchia, posizionata inizialmente nella parte più interna della laguna, subisce una dispersione

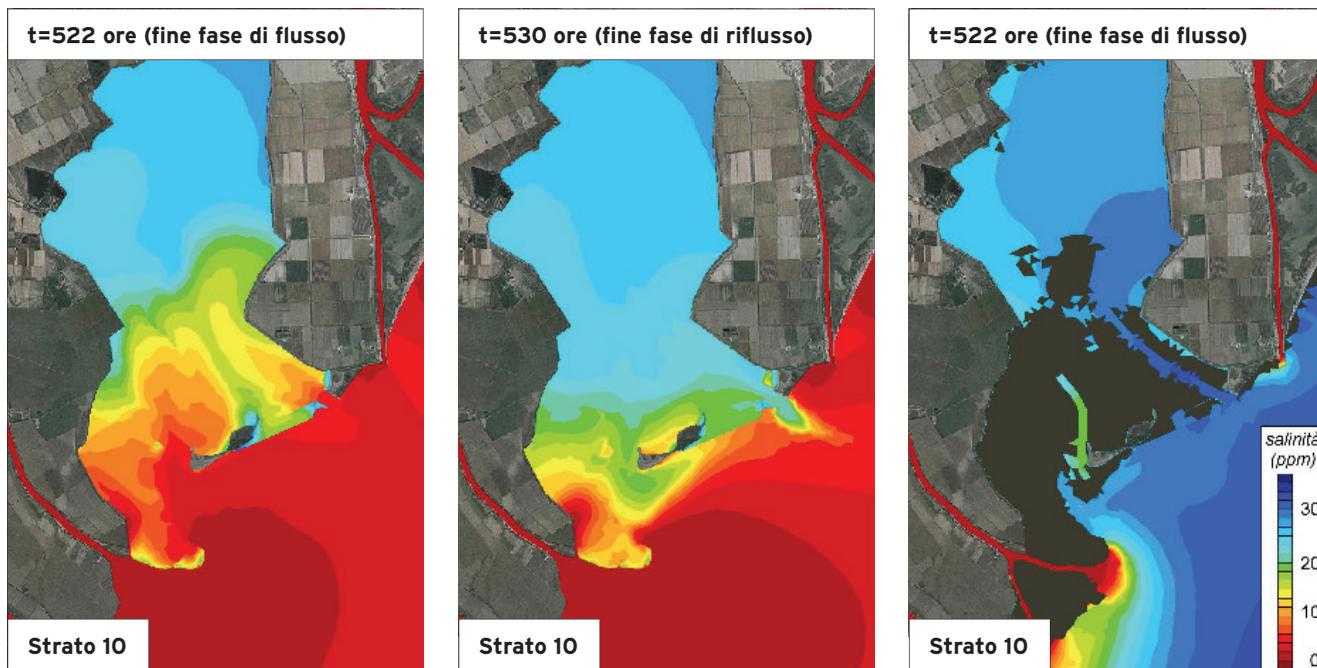


Figura 80: distribuzione spaziale del contenuto salino al termine delle fasi di flusso (a sinistra) e riflusso (a destra) per gli strati superficiale (strato 10) e profondo (strato 7) in occasione di un evento di piena.

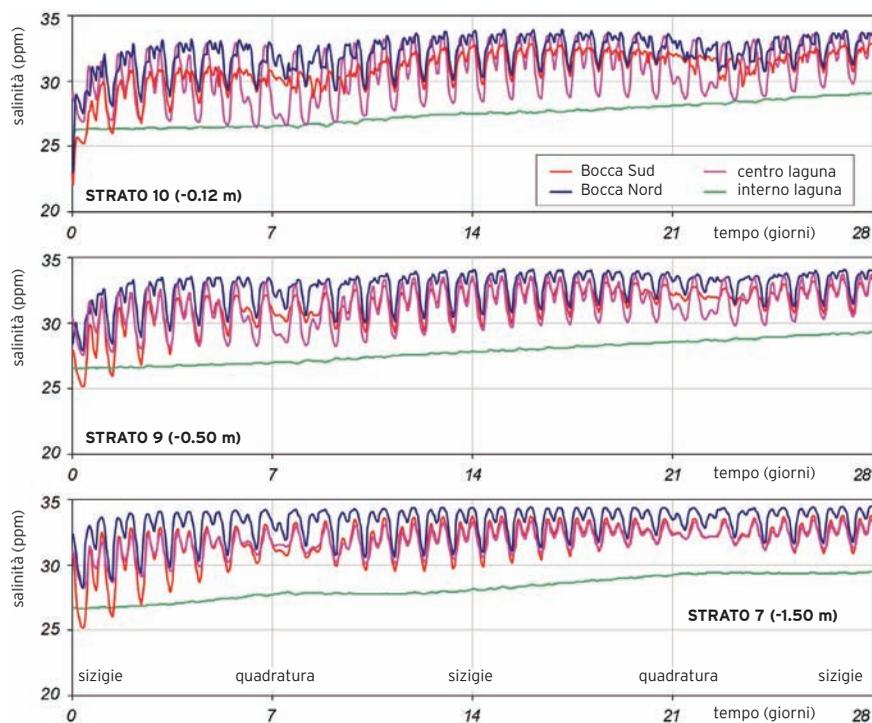


Figura 81: andamento della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72) relativi agli strati: 10 (primi 25 cm), 9 (50 cm dalla superficie), e strato 7 (1.5 m dalla superficie) in occasione di una marea prolungata nel Po.

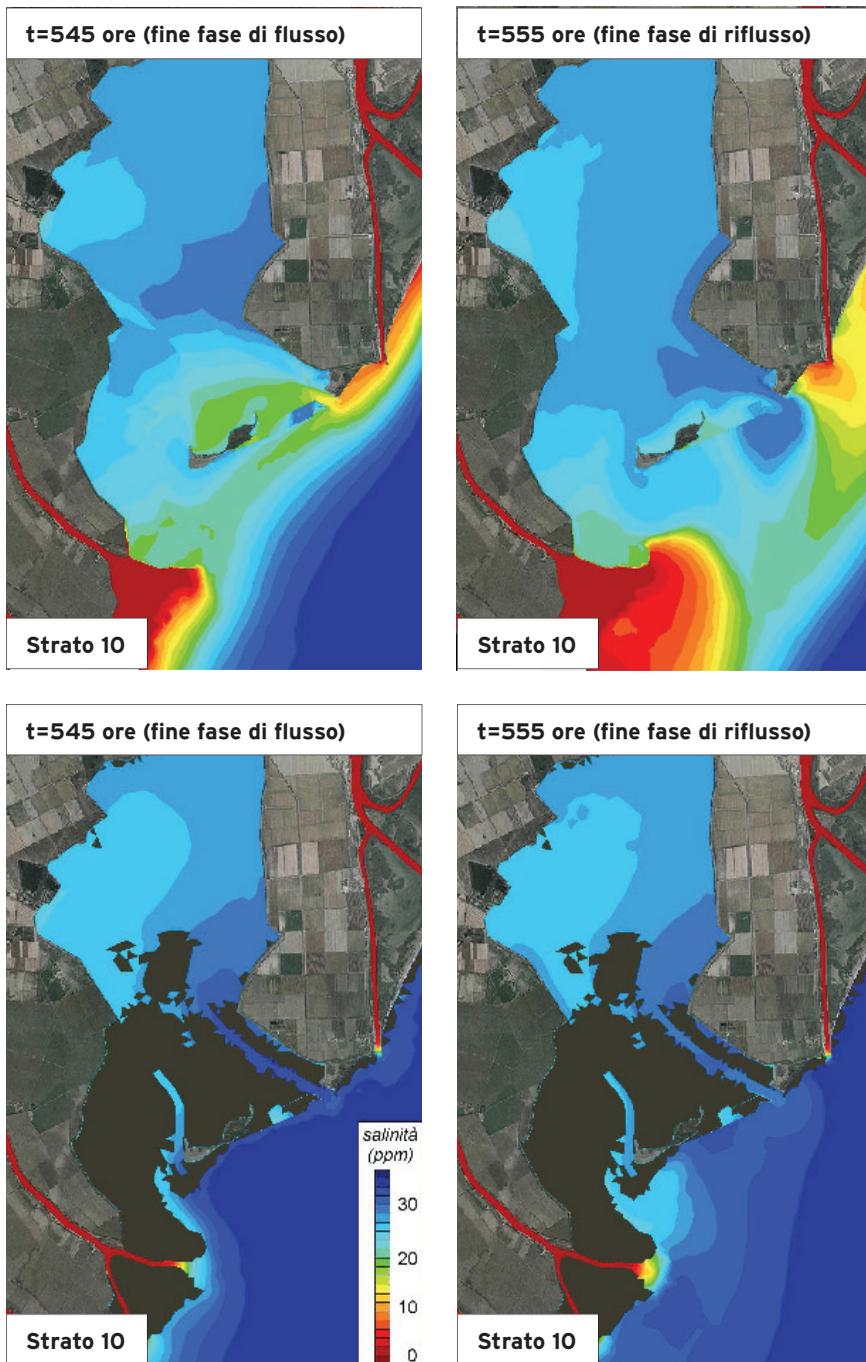


Figura 82: distribuzione spaziale del contenuto salino al termine delle fasi di flusso (a sinistra) e riflusso (a destra) per gli strati superficiale (strato 10) e profondo (strato 7) in occasione di un vento di Bora.

modesta, mantenendosi sensibilmente compatta.

È interessante rilevare che i processi dispersivi sono caratterizzati sostanzialmente dalla stessa intensità sia nello strato superficiale sia in quello a profondità maggiore (strato posizionato in vicinanza del fondo - colore rosso). Si osserva inoltre, come già evidenziato illustrando i risultati forniti dalla modellazione bidimensionale, che la macchia mantiene sostanzialmente immutata la sua posizione iniziale, a indicare in buona sostanza l'assenza di correnti residue intermareali di un qualche rilievo.

Al contrario, nella stessa Figura 87 si osserva un comportamento differenziato per lo strato superficiale (colore verde delle particelle) e per quello profondo (colore blu) relativamente alla diffusione della macchia ubicata inizialmente nella parte meridionale della laguna. Mentre le particelle che occupano lo strato profondo, per effetto delle modeste velocità, subiscono una ridotta dispersione e tendono a migrare lentamente verso la Bocca Sud, notevole è la dispersione subita dalle particelle che occupano lo strato superficiale.

È stata da ultimo analizzata l'influenza di un debole vento di Bora sui processi di mescolamento. A partire dalle condizioni forzanti utilizzate nella precedente simulazione è stato imposto un vento di Bora con direzione 45° N e velocità di 4 m/s che spirava uniformemente

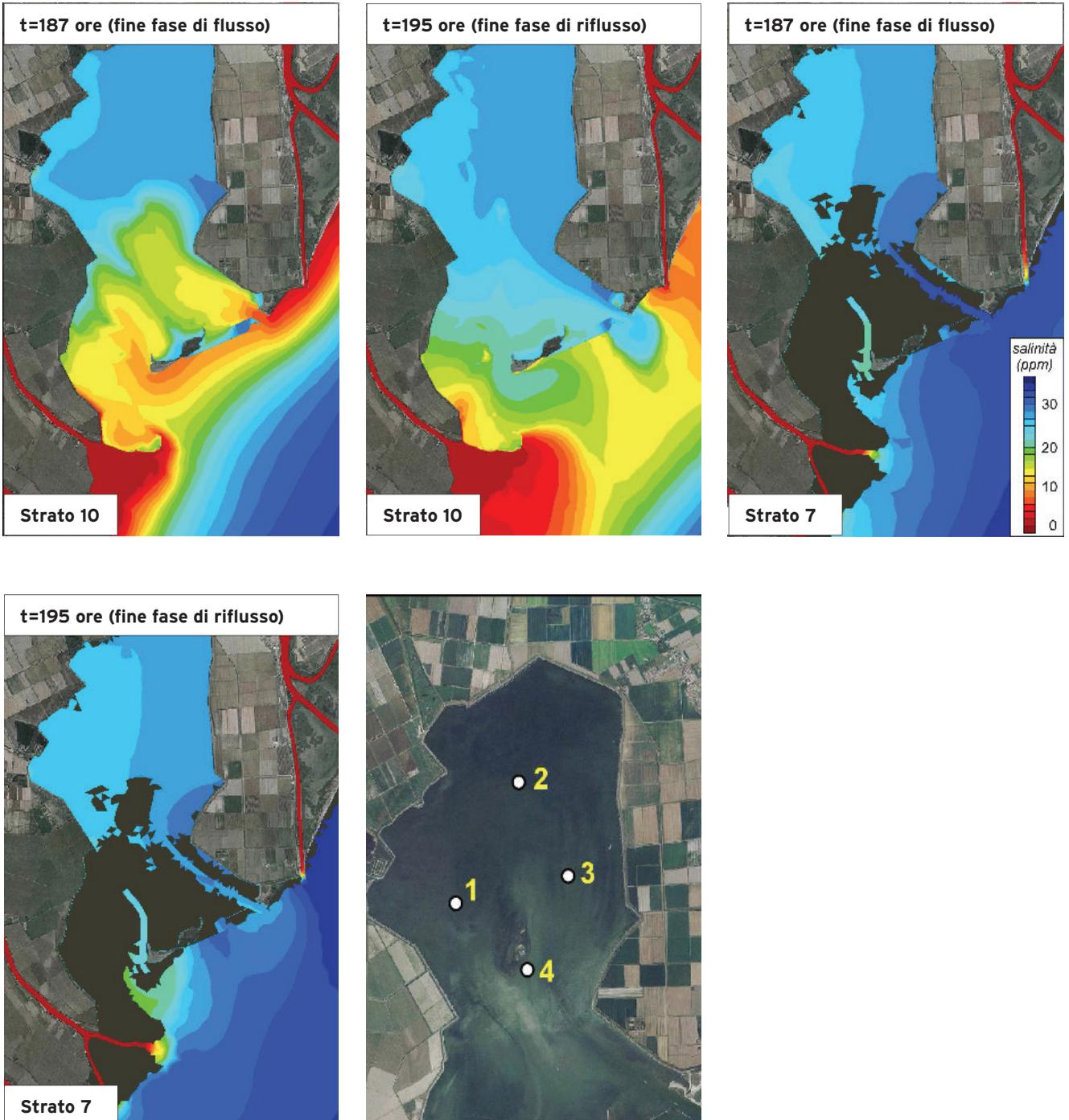


Figura 83: distribuzione spaziale del contenuto salino al termine delle fasi di flusso (a sinistra) e riflusso (a destra) per gli strati superficiale (strato 10) e profondo (strato 7) in occasione di un vento di Levante.

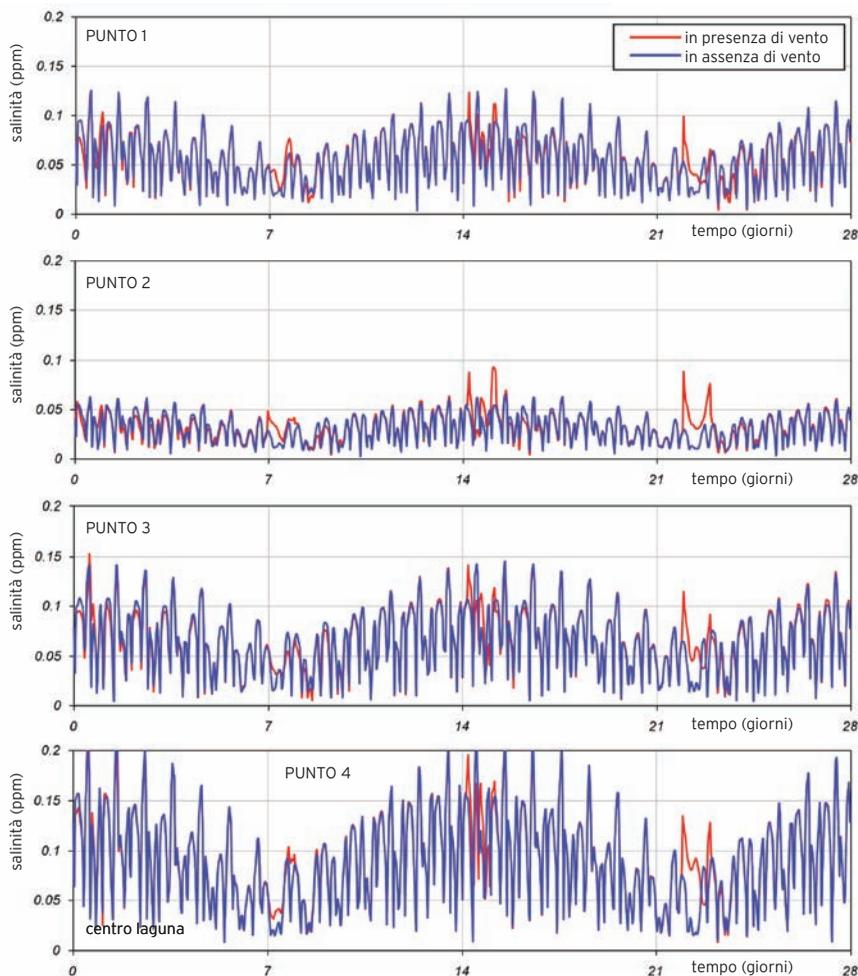
Figura 84: ubicazione dei quattro punti dislocati nella parte settentrionale della laguna in corrispondenza dei quali sono valutati gli effetti del vento.

Figura 85: andamento nel tempo della salinità in quattro punti posti nella parte settentrionale della laguna (vedi Figura 84): confronto tra le situazioni in presenza e in assenza di vento.

per 12 ore ogni giorno. Le Figure 88 e 89 illustrano, rispettivamente agli istanti $t=40$ ore e $t=96$ ore, i risultati del calcolo, considerando lo strato superficiale e uno strato più profondo in vicinanza del fondo. Nella parte meridionale della laguna, il vento di Bora spinge verso la Bocca Sud sia le particelle appartenenti allo strato superficiale che quelle appartenenti allo strato più profondo. Si osserva, in particolare, che in presenza di vento, la macchia si mantiene sensibilmente più compatta rispetto al caso in cui il vento è assente (Figure 86 e 87).

Nella parte più settentrionale della laguna, il processo dispersivo risulta sensibilmente più accentuato. In particolare si riscontra l'innesco di una circolazione trasversale in un piano verticale sostanzialmente parallelo alla costa. Le acque superficiali (macchia di colore arancio) vengono sospinte verso ovest, concordeamente con il vento, mentre nello strato in profondità, la macchia (colore rosso), catturata dalla corrente di ritorno, migra verso est. Si tratta, in ogni caso, di processi di mescolamento decisamente modesti.

Si è voluto da ultimo analizzare l'influenza di un vento di Bora caratterizzata da una maggiore intensità. A tal fine sono state ripetute le simulazioni precedenti incrementando la velocità del vento da 4 m/s a 10 m/s, velocità quest'ultima che è solo leggermente inferiore all'intensità utilizzata nelle simulazioni



precedentemente illustrate.

Nelle Figure 90 e 91 sono riportati i risultati del calcolo agli istanti $t=40$ ore e $t=96$ ore, rispettivamente. Dal punto di vista qualitativo, il comportamento delle macchie di particelle corrisponde a quello appena descritto (Figure 88 e 89), caratterizzato da una migrazione verso la Bocca Sud delle particelle rilasciate nella parte meridionale della laguna e da una migrazione verso ovest, nello strato superficiale, e verso est, in quello profondo, delle particelle rilasciate nella parte settentrionale.

L'entità degli spostamenti, però, è

sensibilmente maggiore. Si riscontra, in particolare, che già dopo 40 ore, le particelle immesse nella parte meridionale in corrispondenza dello strato superficiale (colore verde), passando attraverso la Bocca Sud, fuoriescono addirittura dal dominio di calcolo e per tale motivo non appaiono nelle immagini riportate. Le particelle appartenenti allo strato più profondo (colore blu) subiscono una dispersione molto accentuata e, contrariamente al caso precedente, tendono a fuoriuscire dalla laguna anche attraverso la Bocca Nord.

Le particelle immesse nella parte più settentrionale, come nel caso preceden-



Figura 86: situazione attuale. Simulazione del trasporto di particelle con il modello lagrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m.: confronto tra 20 (sopra) e 30 (sotto: particelle in verde e arancio per lo strato 10 e in rosso e blu per lo strato 7).



Figura 87: situazione attuale. Simulazione del trasporto di particelle con il modello lagrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m. (particelle in verde e arancio per lo strato 10 e in rosso e blu per lo strato 7).



Figura 88: situazione attuale. Simulazione del trasporto di particelle con il modello lagrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m. e un vento di Bora che spira per 12 ore ogni 24 ore alla velocità di 4 m/s. (particelle in verde e arancio per lo strato 10 e in rosso e blu per lo strato 7).



Figura 89: situazione attuale. Simulazione del trasporto di particelle con il modello lagrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m. e un vento di Bora che spira per 12 ore ogni 24 ore alla velocità di 4 m/s. (particelle in verde e arancio per lo strato 10 e in rosso e blu per lo strato 7).

te, sono trascinate approssimativamente in direzione Est-Ovest in verso opposto. Il risultato conferma l'innescarsi di una circolazione trasversale in un piano verticale, la cui traccia segue questa stessa direzione.

L'intensità del trasporto è comunque sensibilmente maggiore e, dopo 96 ore (Figura 91), le particelle sono sospinte contro i margini lagunari, addensandosi.

Emerge dal complesso dei risultati ottenuti il ruolo fondamentale che, per la parte più settentrionale della laguna (Sacca di Scardovari vera e propria) assumono i fenomeni dispersivi indotti dal vento. Sono soprattutto questi fenomeni a determinare il ricambio delle acque, che avviene comunque in tempi molto più lunghi di quelli che si riscontrano nella Sacca di Bottonera, dove le correnti di marea assumono velocità piuttosto sostenute e presentano gradienti di un qualche rilievo, favorendo processi che nel loro insieme consentono alle acque residenti di rinnovarsi più rapidamente.

Effetti di un ulteriore stralcio di interventi previsti per il risanamento della Sacca

Gli ulteriori interventi per il risanamento della Sacca di Scardovari previsti consistono nel prolungamento della fascia di barene che realizza la partizione della Sacca in senso longitudinale e nel dragaggio dei canali interni, estesi fino alla parte settentrionale della Sacca. Non è prevista, invece, la realizzazione del manufatto presidiato da paratoie mobili, che era incluso nella formulazione originale del progetto e che consente di indurre una circolazione "forzata" in tutta la laguna. Per la nuova situazione, l'andamento nel tempo della salinità in quattro punti della Sacca, disposti alle bocche e all'interno del bacino (vedi Figura 72), è illustrato nelle Figure 92 e 93 con riferimento allo strato superficiale della colonna d'acqua e a uno strato posto in profondità in prossimità del fondo.

In condizioni normali, in base al calcolo, sia nei due punti posti in corrispondenza delle bocche lagunari sia nei punti interni, le variazioni di salinità sono mi-

nime, quasi trascurabili ai fini pratici. I risultati modellistici indicano che il complesso degli interventi previsti non produce variazioni apprezzabili sull'andamento della salinità all'interno della laguna nemmeno considerando che nei rami del Po adiacenti alla Sacca transitorio portate maggiori di quelle ordinarie (Figure 94 e 95).

ALCUNE CONSIDERAZIONI FINALI

Le indagini condotte con l'ausilio di alcuni modelli matematici sul comportamento idraulico della Sacca di Scardovari evidenziano l'esistenza di problemi di diverso ordine sia con riferimento al regime delle correnti di marea e al ricambio delle acque nelle zone della laguna idraulicamente più decentrate rispetto alle bocche sia con riferimento alle interazioni fra le correnti indotte dal moto ondoso sottocosta e il flusso delle portate attraverso le foci lagunari e fluviali, che si aprono in questa particolare zona del Delta del Po. I risultati più significativi ottenuti portano a formulare le seguenti osservazioni conclusive:

Figura 90: situazione attuale. Simulazione del trasporto di particelle con il modello lagrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m. e un vento di Bora che spira per 12 ore ogni 24 ore alla velocità di 10 m/s. (particelle in verde e arancio per lo strato 10 e in rosso e blu per lo strato 7).



Figura 91: situazione attuale. Simulazione del trasporto di particelle con il modello lagrangiano per la marea sinusoidale semidiurna oscillante tra ± 0.5 m s.l.m. e un vento di Bora che spira per 12 ore ogni 24 ore alla velocità di 10 m/s. (particelle in verde e arancio per lo strato 10 e in rosso e blu per lo strato 7).



Il mancato completamento degli interventi previsti nell'ambito del progetto P.I.M. a suo tempo predisposto per il risanimento della Sacca, lascia di fatto irrisolti i problemi di ricambio delle acque nella sua parte più settentrionale (Sacca di Scardovari vera e propria). L'apertura della Bocca Nord e lo scavo dei canali interni finora realizzati non sono, infatti, sufficienti da soli per attivarvi apprezzabilmente né l'azione diretta delle correnti di marea né quella della circolazione secondaria indotta dalla non linearità del fenomeno propagatorio.

Il ricambio delle acque in questa parte della Sacca è conseguentemente affidato ai fenomeni dispersivi, soprattutto a quelli indotti dal vento. Tali fenomeni garantiscono, tuttavia, processi di rinnovamento delle acque molto lenti, non in grado di risolvere rapidamente le situazioni negative che si dovessero presentare per un anomalo decadimento della qualità delle acque, causato da incrementi eccessivi di temperatura o da uno sviluppo rapido di bloom algali, oppure da una riduzione importante della salinità delle acque che, come le indagini condotte hanno dimostrato, può essere determinata dall'introduzione attraverso le bocche di lenti di acqua dolce portata al mare attraverso le foci del Po di Tolle e del Po di Gnocca adiacenti alla Sacca.

I risultati della modellazione matematica condotta con uno schema 3D sulla diffusione all'interno della Sacca di acque dolci introdotte soprattutto attraverso le sue bocche confermano l'importante differenza di comportamento idrodinamico della Sacca di Bottonera, quella più prossima al mare, rispetto alla Sacca di Scardovari vera e propria. In quest'ultima le acque dolci, che vi penetrano per l'azione congiunta delle correnti di marea e del vento, tendono

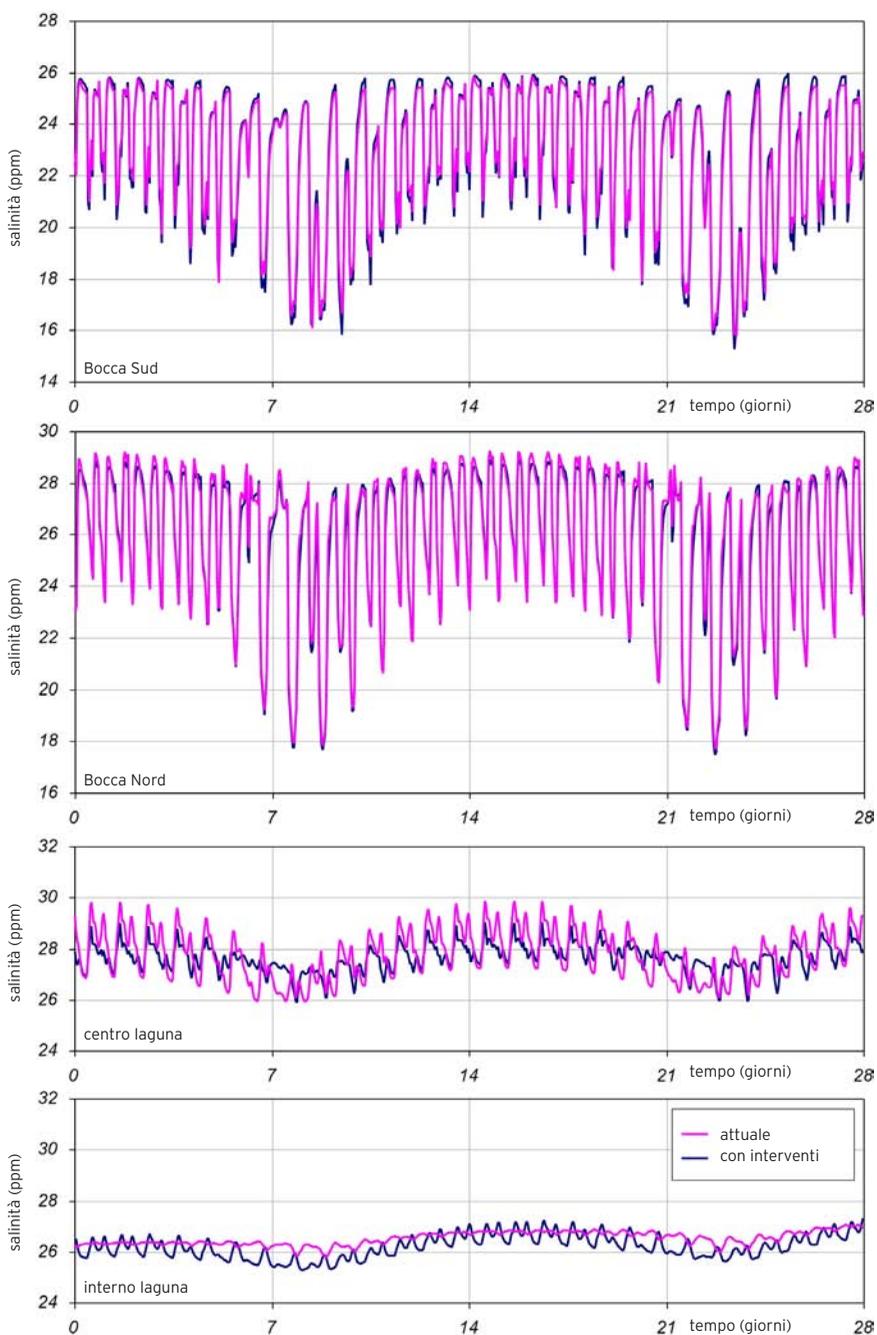


Figura 92: andamento nel tempo della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72): confronto tra la situazione attuale e

quella che prevista da un ulteriore strato/cio degli interventi previsti con riferimento allo strato superficiale (strato 10), in condizioni ordinarie.

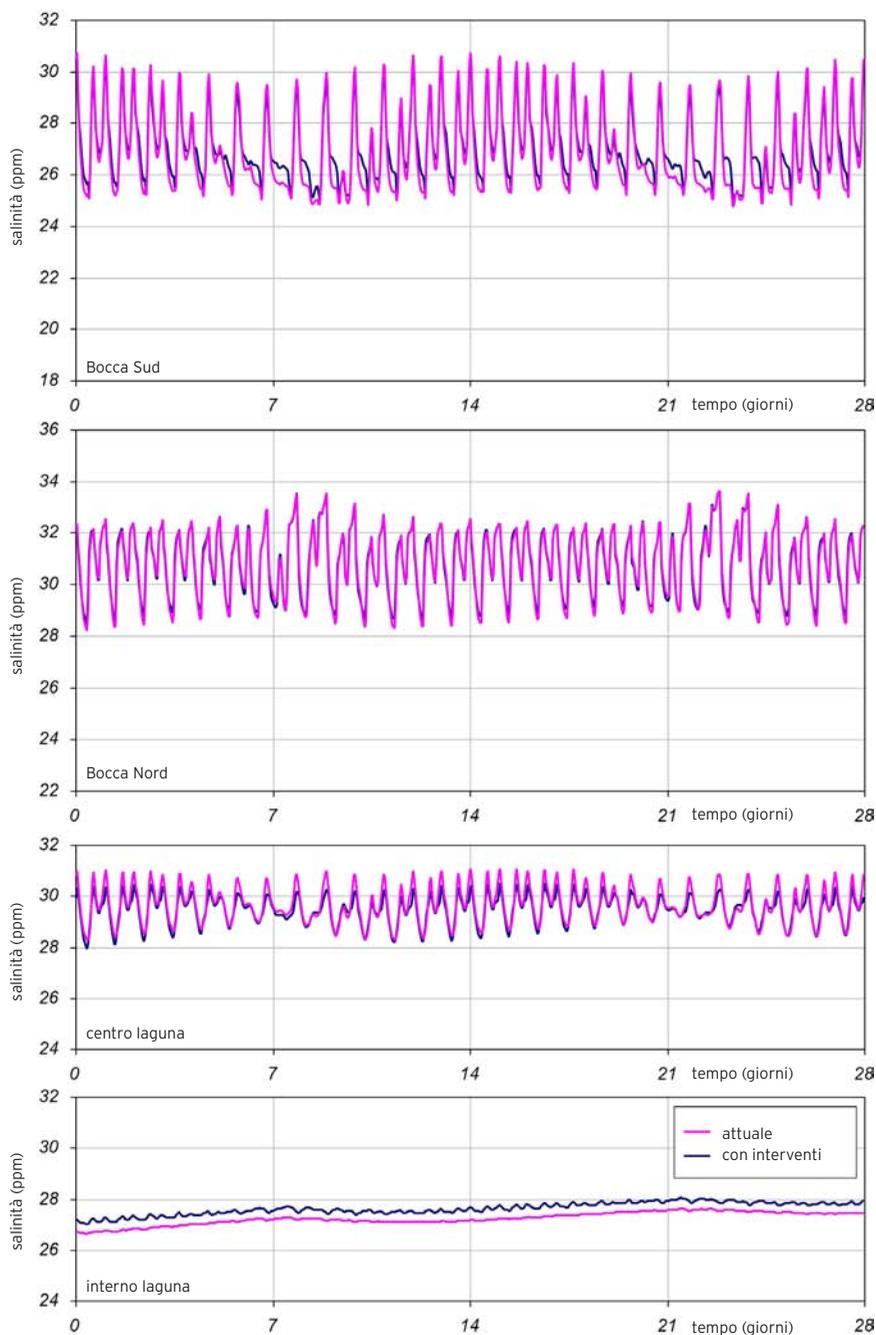


Figura 93: andamento nel tempo della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72): confronto tra la situazione attuale e quella che prevista da un ulteriore stralcio degli interventi previsti con riferimento ad uno strato profondo (strato 7), in condizioni ordinarie.

a disperdersi in direzione verticale e la colonna d'acqua si presenta con distribuzione verticale della salinità sostanzialmente uniforme e caratterizzata da valori alquanto inferiori rispetto a quelli che si riscontrano nell'adiacente Sacca di Bottonera.

Vi è quindi una differenziazione di comportamento delle due parti della laguna (Sacca di Bottonera e Sacca di Scardovari) che comporta fenomeni di stratificazione anche in senso orizzontale fra la parte più sofferente della Sacca e quella più prossima alle bocche, dove si osservano, invece, variazioni di salinità, in rapida evoluzione, sia in senso verticale che in senso orizzontale. Il comportamento molto diverso delle due parti della Sacca in rapporto alla distribuzione della salinità è un indice che conferma, a sua volta, il differente regime delle correnti di marea che vi si instaura, molto attive e favorevoli nella Sacca di Bottonera, di scarso significato nella Sacca di Scardovari vera e propria.

Nel quadro sopra delineato, il completamento degli interventi suggeriti dal progetto generale approvato nell'ambito dei P.I.M., con la realizzazione della striscia centrale di barene per dividere gli specchi d'acqua della parte più settentrionale della Sacca e lo scavo di una rete di canali più profondi, comporta solo qualche modesto beneficio in termini idrodinamici.

Se non si realizza contemporaneamente anche lo sbarramento previsto, che permette, attraverso opportune manovre in fase di flusso e di riflusso di marea, di sovrapporre alle naturali correnti di marea un'intensa circolazione secondaria, il ricambio delle acque nella parte più settentrionale della Sacca non è significativamente migliorato rispetto

alla condizione attuale.

Conseguentemente l'utilizzazione ai fini della molluschicoltura degli specchi d'acqua della Sacca di Scardovari vera e propria, ovviamente possibile, resta esposta ai rischi, da una parte, di un anomalo incremento di temperatura, dall'altra, dell'introduzione di un eccesso di acque dolci dal mare, quando il Po è in condizioni di piena sostenuta e persistente.

Da qualche tempo e in modo evidente il cordone litoraneo che separa la Sacca di Scardovari dal mare e permette di distinguere l'ambiente della laguna da quello del mare stesso è esposto a fenomeni erosivi di una qualche intensità. Le cause sono molteplici e sono innanzitutto riconducibili ai fenomeni di subsidenza indotti dall'estrazione di acque metanifere avvenuta a partire dagli anni '30 e poi particolarmente intensificata nell'immediato secondo dopoguerra. È alla subsidenza, infatti, che principalmente si può ricondurre con ogni probabilità l'arretramento e il cambiamento di curvatura che risulta dal confronto dei diversi rilievi disponibili per la linea di riva.

Effetti non positivi sono, tuttavia, derivati anche da altri interventi, come quelli eseguiti a partire dagli anni '80 sul ramo del Po di Tolle con l'apertura della Busa Storiona, che ha fortemente ridotto le portate liquide, e quindi solide, che un tempo pervenivano direttamente alla foce di Porto Barricata, posta immediatamente in adiacenza al litorale di Scardovari. Le misure sperimentali e stente, sia strutture di tipo innovativo per gli aspetti ambientali, che dovrebbero però essere attentamente sperimentate in via preliminare osservandone il comportamento sul campo.

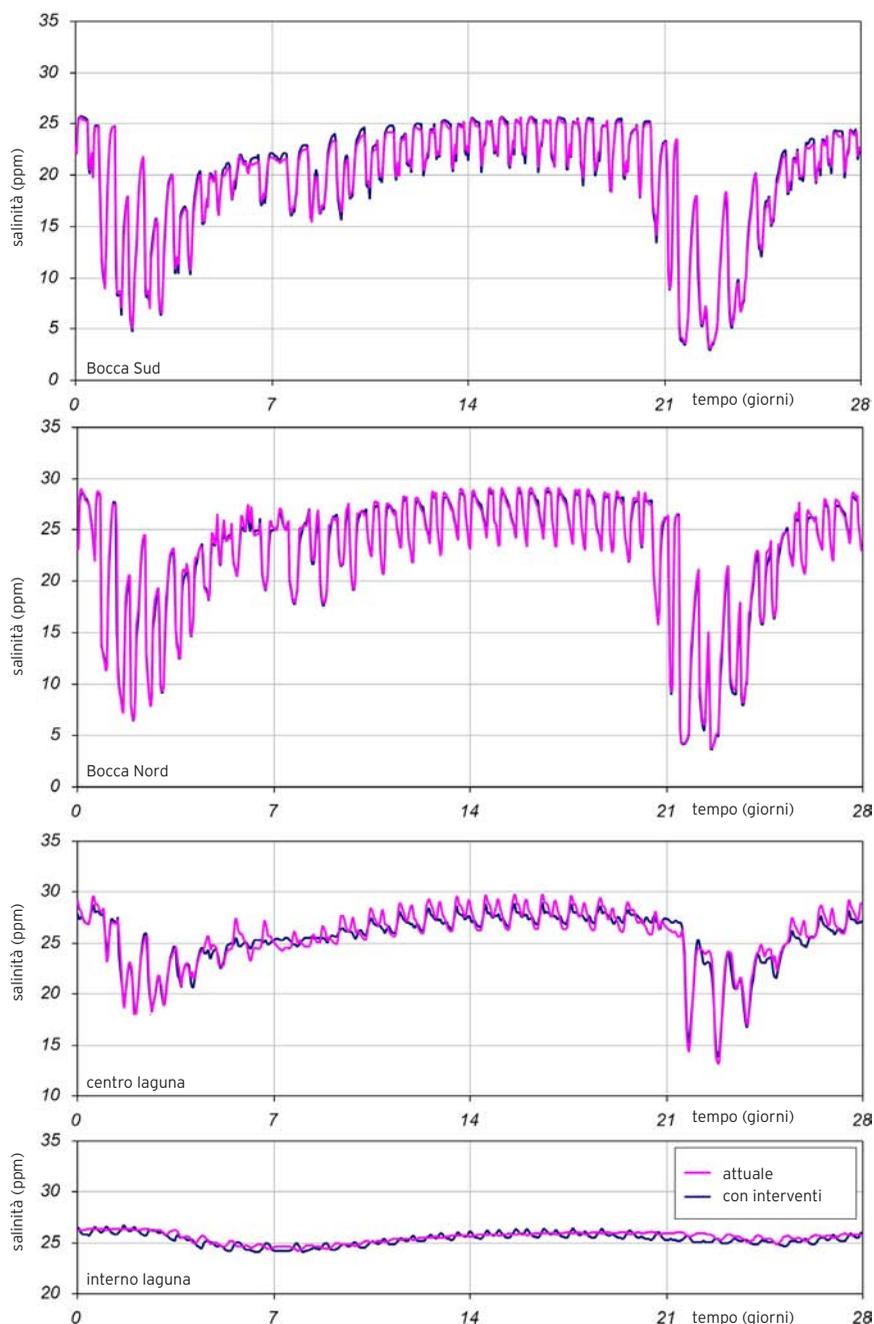
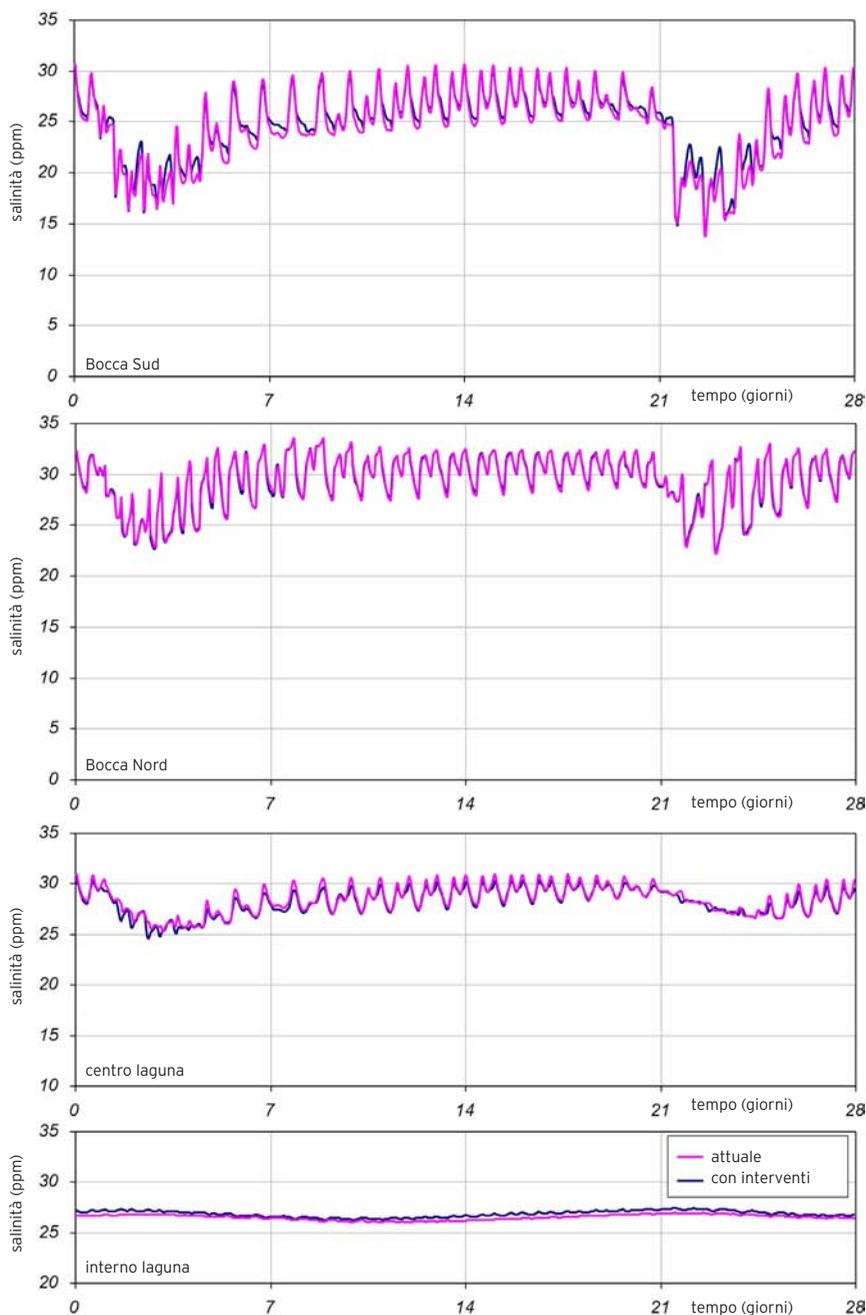


Figura 94: andamento nel tempo della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72): confronto tra la situazione attuale e quella che prevista

da un ulteriore stralcio degli interventi previsti con riferimento allo strato superficiale (strato 10), in occasione di una piena del Po.



In tal senso sarebbe auspicabile sperimentare alcune delle soluzioni innovative che sono da più parti proposte, ma sulla cui efficacia operativa permangono ancora incertezze, avendo esse fornito in qualche caso risultati positivi, in altri risultati piuttosto incerti.

Figura 95: andamento nel tempo della salinità in quattro punti all'interno della laguna (vedi Figura 72): confronto tra la situazione attuale e quella che prevista da un ulteriore stralcio degli interventi previsti con riferimento ad uno strato profondo (strato 7), in occasione di una piena del Po.

Bibliografia

- [1] Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen (1978), Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering, Am. Soc. of Civ. Eng., New York, 569-587.
- [2] Carniello, L., L. D'Alpaos, A. Defina (2004) Un modello di generazione e propagazione del moto ondoso in laguna di Venezia, XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol. I, 619-626, Ed. Biois sas, ISBN 88-7740-382-9, Trento, 7-10 settembre
- [3] Carniello, L., A. Defina, S. Fagherazzi, L. D'Alpaos (2005) A combined Wind Wave-Tidal Model for the Venice Lagoon, Italy, JGR-ES, vol. 110 pp. 1-15 ISSN: 0148-0227
- [4] D'Alpaos, L. and A. Defina (1993) Venice Lagoon hydrodynamics simulation by coupling 2D and 1D finite element models. Atti del VIII International Conference on Finite Elements in Fluids - New trends and applications. Barcellona 20-24 sett., 917-926
- [5] D'Alpaos L., Defina A., - "Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di una zona di barene solcate da una serie di canali minori". Istituto Veneto di SS.LL.AA., volume XII, Venezia 1995.
- [6] D'Alpaos L. and A. Defina, Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon, Computers & Geosciences, 33, pp. 476-496, doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009, 2007.
- [7] Defina A., - "Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas". Water Resources Research, Vol. 36, NO. 11, Pages 3251-3264, Nov. 2000.
- [8] Defina, A., "Numerical experiments on bar growth". Water Resources Research, Vol. 39, NO. 4, 1092, 2003.
- [9] Defina, A. Bonetto, I., (1998), Rappresentazione dei termini di accelerazione convettiva in un modello bidimensionale della propagazione di onde lunghe in acque basse, Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Vol. I, pp. 53-64.
- [10] Consorzio di Bonifica Delta del Po, "Studi Idraulico marittimi nelle lagune deltizie - Sacca di Scardovari". Rapporto tecnico interno, Sipim s.r.l., 2006.
- [11] Consorzio di Bonifica Delta del Po, "Studi Idraulico marittimi nelle lagune deltizie - Lagune di Barbamarco e Canarin". Rapporto tecnico interno, Sipim s.r.l., 2006.
- [12] Consorzio di Bonifica Delta del Po, "Realizzazione di misure idrodinamiche e analisi dati batimetrici in Sacca di Scardovari". Rapporto tecnico interno, Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l., 2009.
- [13] Komen, G.J., S. Hasselmann and K. Hasselmann (1984), On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, Journal of Physical Oceanography, 14, 1271-1285.
- [14] Longuet-Higgins M.S. and R.W. Stewart, Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to surf beat, Journal of Fluid Mechanics 13 (1962), pp. 481-504.
- [15] Phillips, O.M. (1957), On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2, 417.
- [16] Phillips, O.M. (1966), The Dynamics of the Upper Ocean. Cambridge University Press, New York.
- [17] "Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Past, Present and Future". Cushman-Roisin, B.; Gacic, M.; Poulain, P.-M.; Artegiani, A. (Eds.) 2002, 320 p., Springer Hardcover. ISBN: 978-1-4020-0225-0.
- [18] Smagorinsky J., (1963), General circulation experiments with primitive equations: 1. the basic experiment, Monthly Weather Review, 91, 99-104.
- [19] Smagorinsky J., (1993), Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities, in Large eddy simulation of complex engineering and geophysical flows, edited by B. Galperin and S. A. Orszag. Cambridge University Press
- [20] Stansby, P.K. (2003), A mixing-length model for shallow turbulent wakes, J. Fluid Mech., vol. 495, pp. 369-384, DOI: 10.1017/S0022112003006384

LE LAGUNE DEL DELTA DEL PO

A cura del Consorzio di Bonifica Delta del Po
Settembre 2014



CONSORZIO DI BONIFICA
DELTA DEL PO 

Editore:

Consorzio di Bonifica Delta del Po
via Pordenone, 6 - 45019 Taglio di Po (Rovigo)
Tel. 0426 349711 - Fax 0426 346137
consorzio@bonificadeltadelpo.it
www.bonificadeltadelpo.it
sil.detapo.it

**Commissione Tecnico-Scientifica e di sovrintendenza
dell'attività nelle lagune del Delta del Po**

Prof. Luigi D'Alpaos
Università di Padova
Prof. Francesco Donati
Libero docente di Economia e Politica Agraria
Prof. Pierfrancesco Ghetti
Università Ca' Foscari di Venezia
Prof. Pippo Gianoni
Università IUAV di Venezia
Prof. Remigio Rossi
Università di Ferrara
Ing. Lino Tosini
direttore Fondazione Ca' Vendramin
Ing. Giancarlo Mantovani
direttore Consorzio di Bonifica Delta del Po

Produzione del volume e progetto collana:

Consorzio di Bonifica Delta del Po (Taglio di Po)

Redazione:

Giancarlo Mantovani, Maria Saccon, Michela Casagrande

Progetto grafico e impaginazione:

Dasler comunicazione (Vittorio Veneto)

Coordinamento:

Tepco S.r.l. (Vittorio Veneto)

Traduzioni:

Stephen Trollip (The Language Centre, Vittorio Veneto)

Contributi grafici:

Bruno Matticchio (IPROS S.r.l., Padova)

© 2014 Consorzio di Bonifica Delta del Po.

Tutti i diritti riservati: nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, tramite stampa, fotocopia o qualsiasi altro mezzo, senza autorizzazione scritta dell'editore.

È stato fatto ogni sforzo per contattare i detentori dei diritti d'autore relativi al materiale incluso nella presente pubblicazione. Per i casi in cui non sia stato possibile, invitiamo a contattare l'editore.

