CLAUDIO DATEI*

ESAME COMPARATO DELLE CARATTERISTICHE DEI MODELLI MATEMATICI DELLA LAGUNA DI VENEZIA

I. PREMESSA

«Tra le iniziative del Comitato ministeriale per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia e dei suoi caratteri ambientali e monumentali, la cui attività s'è iniziata nel 1968, meritano speciale riconoscimento le indagini matematiche sull'idraulica lagunare, che hanno promosso un fervore di studi di cui già si conoscono proficui ed interessanti risultati».

Così s'apriva nel 1972, con la introduzione di Augusto Ghetti, la presentazione del volume V di *Rapporti e studi su Venezia* voluto dall'Istituto Veneto.

I venti anni che ci separano da quel non lontano 1972 hanno però segnato nel rapporto coi problemi di Venezia una vera e propria rivoluzione in molti settori culturali: e non solo nei settori specialistici - i mezzi ed i modelli, ad esempio - ma in altri ben più vasti e diffusi, quali l'interazione col retroterra, l'inquinamento, le attività portuali, l'eustatismo: a fronte dei quali, i problemi legati alle cosiddette acque alte ed al loro controllo, che avevano impegnato molti di noi dal 1966 al 1982, hanno finito con l'associarsi - per importanti che fossero e che siano - ad altri problemi ed aspetti e vincoli di tale forza da ricondizionare la trattazione dell'intero problema in una prospettiva affatto diversa da quella immaginata alla fine degli anni sessanta.

In queste mutate condizioni, al passo coi nuovi problemi, i modelli hanno dovuto evolversi per corrispondere al parimenti mutato fabbisogno di conoscenza, però non sempre e non solo al servizio dei problemi, quali fedeli - o quasi fedeli - servitori, ma fonte essi stessi, per la loro potenza, di nuove idee e prospettive da utilizzare, e di fatto utilizzate, nella progettazione degli interventi e delle opere.

Indicativamente, penso che possa ritenersi che il periodo che può definirsi la prima maniera d'intendere i problemi della laguna - il controllo delle acque alte - si sia concluso con quel primo progetto di fattibilità del 1981-1982: conclusione, finalmente, concettualmente corretta di imperfetti, e talvolta maldestri, precedenti tentativi di condurre a soluzione il problema quasi esclusivamente in chiave d'acque alte: accennando, anche se in modo generale, agli altri problemi stimati, prima d'allora,

**Professore f.r.di Costruzioni idrauliche all'Università di Padova, membro esperto del Comitato tecnico di Magistratura (Magistrato alle Acque).* *Il saggio qui riportato per gentile concessione dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti è stato pubblicato in* "Conterminazione lagunare. Storia, ingegneria, politica e diritto nella Laguna di Venezia". *Atti del Convegno di Studio nel bicentenario della conterminazione lagunare, Venezia 14-16 marzo 1991. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, 1992, pp. 271-291*

di secondaria importanza. Il voto reso nel maggio 1982 dall'assemblea del Consiglio superiore dei Lavori pubblici, sotto questa spinta, credo possa assumersi come il principio del nuovo modo d'intendere e trattare la questione della salvaguardia di Venezia e della sua laguna per i riferimenti specifici ch'esso contiene (e prescrive) ad un insieme di problemi in parte generali - l'inquinamento; il retroterra; l'attività portuale; gli scambi mare e laguna; le insulae - in parte specifici e propriamente tecnici e funzionali.

Il nuovo modo di trattare il problema trova nell'istituto della concessione lo strumento amministrativo per avviarlo a soluzione e nella costituzione del Consorzio Venezia Nuova le prime forme operative: e con il Consorzio, sotto l'alta sorveglianza del Magistrato alle Acque, le prime occasioni per affrontare con mezzi adeguati il tema nella sua nuova e corretta configurazione.

La storia dei modelli matematici è, in qualche modo, la storia di questa evoluzione: coi primi tentativi di dipanare problemi complessi con strumenti relativamente semplici per afferrarne l'essenza; per procedere poi, a misura che i passi si facevano più franchi, anche con il conforto delle prime misure, a trattare con i grandi modelli i fenomeni più complessi che l'osservazione e le nuove spinte culturali avevano posto in evidenza.

2. MODELLI MATEMATICI

2.1. Modello statico

Alla fine degli anni sessanta, dopo il grande evento del novembre 1966, il problema del controllo delle acque alte si pose all'attenzione del paese e del mondo in modo molto pressante. Non che il problema, naturalmente, non fosse avvertito o fosse poco noto, come prova anche la costituzione, proprio nel 1960, d'una apposita commissione di studio voluta dall'Istituto Veneto; tuttavia fu solo nel 1968 che si costituì, sotto la spinta dell'evento, un Comitato ministeriale per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia. Il quale, tra i suoi primi atti, promosse le prime e necessarie indagini intorno alla propagazione delle maree ed ai modi di controllarne l'ampiezza, affidando l'incarico di svolgerle all'Istituto di Idraulica dell'Università di Padova.

In quel tempo - come s'è detto - il più vistoso e principale problema apparve essere quello delle acque alte: e su quello il gruppo degli idraulici padovani, coordinati da Augusto Ghetti, concentrò, nell'immediato, la propria attenzione: ponendosi dapprima la questione su quale fosse o potesse essere il procedimento o i procedimenti più adatti per trattarlo.

Il metodo cosiddetto statico, che già in passato aveva interessato non pochi ricercatori di scuola veneta e bolognese - Bucchia (1876); Turazza (1912); Bonvicini (1934); Marzolo (1935); Supino (1954); Pezzoli (1956)-

fu stimato adatto per un primo approccio: tanto più che l'obiettivo che ci si pose fu quello di vedere fino a che punto le bocche di porto potessero essere ristrette per deprimere i massimi livelli di marea in Venezia.

Sulla liceità di questa prima impostazione è forse opportuno richiamare alcune semplici considerazioni.

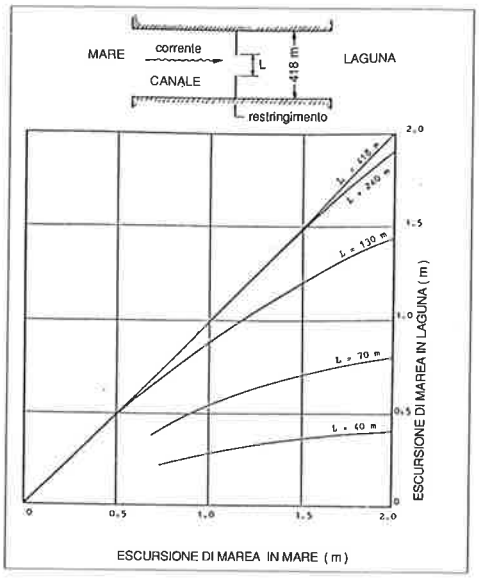
Il metodo statico si fonda sull'ipotesi che le perturbazioni di marea si propaghino con celerità infinita: talché, in ogni istante, lo specchio liquido sia orizzontale. L'assunzione, nell'ambito dei domini spaziali che sono propri della laguna veneta, è fondata sull'osservazione che, per la marea semidiurna (periodo circa di 45000 s), la celerità di propagazione delle piccole perturbazioni in laguna è dell'ordine di 3 m/s.

Ad essa corrisponde una lunghezza d'onda di circa 135 km: a fronte della quale i percorsi lagunari dalle bocche verso terra e dai canali verso le zone laterali, specie nell'intorno delle bocche, sono trascurabilmente piccoli, tanto da potersi lecitamente ammettere che in ogni punto e nello stesso istante si produca la stessa altezza: come se la celerità fosse, appunto, infinita.

I risultati che si ottennero mostrarono come fosse necessario introdurre restringimenti assai elevati per ridurre l'escursione di marea in laguna: tanto elevati da risultare improponibili in rapporto all'esercizio delle attività portuali, oltreché per gli elevati ed elevatissimi valori della velocità che ne sarebbero derivati. Le figure 1 e 2 illustrano, per la bocca di Malamocco, alcuni dei risultati di quella ricerca.

2.2. Modello propagatorio unidimensionale

Un modello statico non è in grado, naturalmente, di dare informazioni intorno alla distribuzione delle portate e delle quote idrometriche che nel



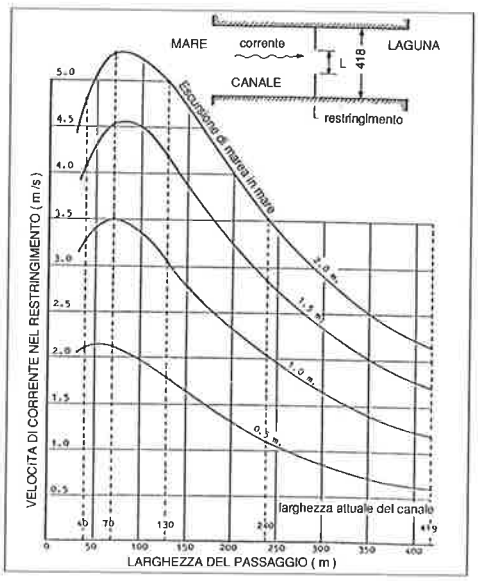


Fig. 1. Attenuazione del livello di marea in laguna per effetto di diversi gradi di restringimento della bocca (bacino di Malamocco)

Fig. 2. Aumento della velocità di corrente in corrispondenza del restringimento della bocca di Malamocco

processo propagatorio si hanno, al variare del tempo, nei punti della laguna di maggiore interesse.

Così, riscossi i risultati del modello statico per l'obiettivo proposto, fu impostato, sempre a Padova, nell'ambito delle ricerche commissionate dal ministero dei Lavori pubblici, un primo modello propagatorio unidimensionale: cioè a propagazione definita dalla direzione dei canali principali. Ai quali furono asservite le zone laterali a basso fondale, trattate, col procedimento statico, come invasi. Applicato, dapprima, al solo bacino di Malamocco, il modello fu poi esteso ad una più complessa rete di canali,70 circa, utilizzando i rilievi della carta in scala 1:5000 del 1970.

L'impostazione unidimensionale, più correttamente, quasi-unidimensionale, fu preceduta da alcune indagini teoriche per stimare, utilizzando schemi geometricamente semplici, la portata delle semplificazioni introdotte rispetto ad uno schema bidimensionale di propagazione, anche se la precedente osservazione sul rapporto tra la larghezza degli specchi laterali e la lunghezza d'onda della marea già a priori sembrava confortasse l'assunzione del comportamento statico degli specchi stessi. Ricerca, quest'ultima, le cui conclusioni diedero origine ad una vivacissima polemica fra le scuole idrauliche di Padova e di Bologna, di non poco interesse per alcuni chiarimenti che furono posti in luce: tanto da figurare, quell'incrociare di spade, in bella evidenza nel volume V di *Rapporti e studi su Venezia*: piano di ricerche avviato, come fu ricordato al principio, dall'Istituto Veneto già nel 1960.

I risultati del modello quasi-unidimensionale, nel confronto coi rilievi sperimentali e le misure fatte in laguna, furono soddisfacenti: a porre, così, in evidenza un comportamento «in grande» francamente unidimensionale della laguna stessa.

La versione più recente del modello unidimensionale, ampiamente utilizzato per lo studio sistematico dello scambio mare-laguna - aspetto, questo, di singolare importanza - estende anche alle zone laterali ai canali, ovviamente con intatta funzione di invaso, la funzione di trasporto: naturalmente nella direzione dei canali stessi ai quali esse sono asservite. Il modello è alle differenze finite secondo uno schema implicito, nel rispetto, oltre che delle usuali condizioni iniziali e di contorno, anche di quelle interne che i nodi-intersezione dei canali pongono istante per istante: continuità idrometrica nel nodo (all'estremità dei tronchi che vi fanno capo) e continuità nei valori delle portate.

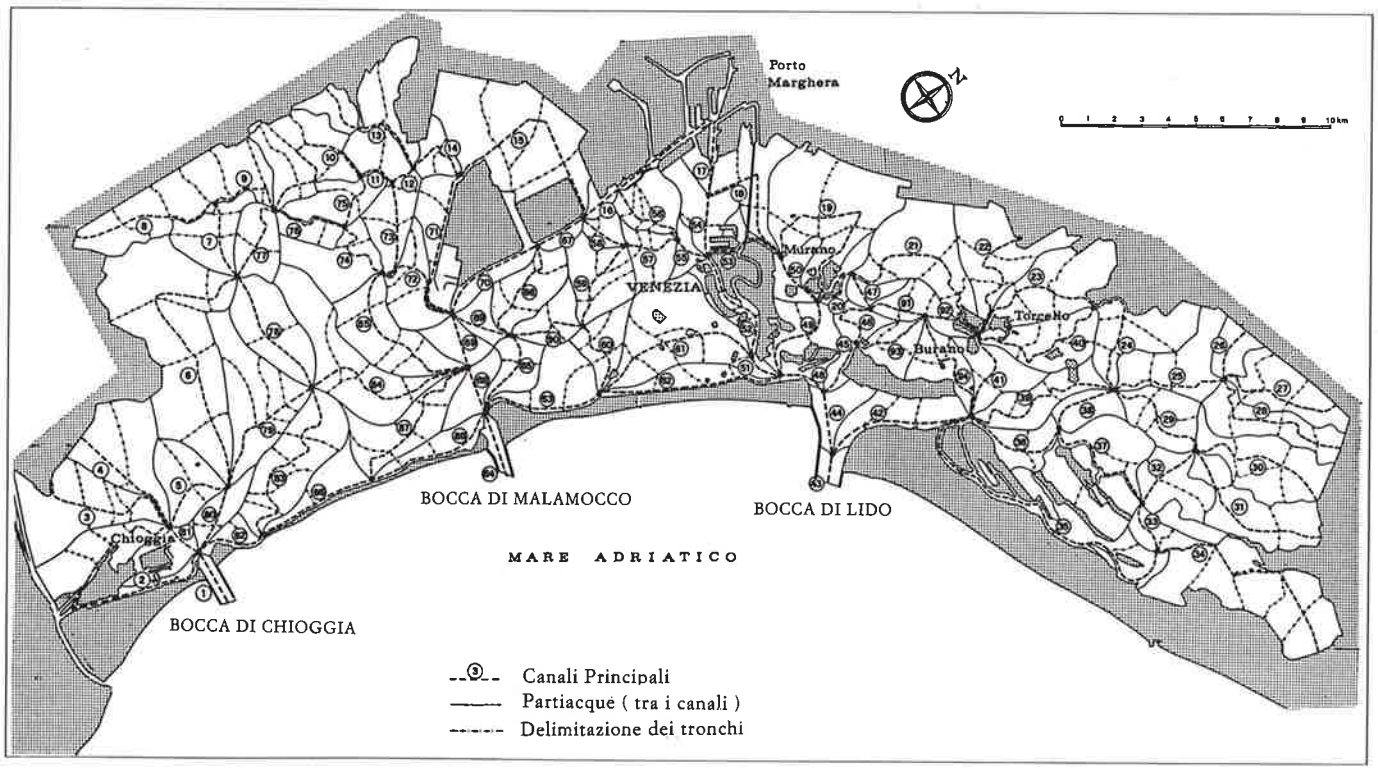
Il modello presenta una grande versatilità. Oltre a poter schematizzare in modo assai dettagliato una rete di canali fino ad un numero massimo di 600 tronchi - si pensi all'imponenza del sistema d'equazioni che ne deriva - offre la possibilità di poter porre in conto la mancanza di sincronismo dell'onda di marea alle tre bocche di porto; ed anche di

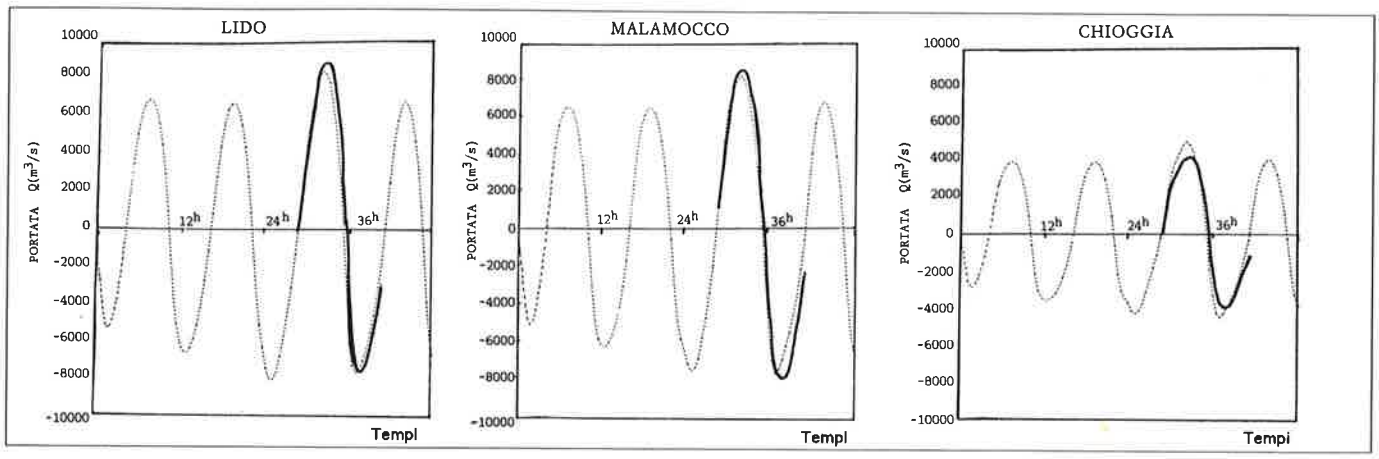
introdurre in alcuni nodi interni o periferici (complessivamente 10) un dispositivo che possa, durante l'evolversi della marea, sezionare idraulicamente la rete di canali, isolandone una parte; per simulare, ad esempio con uno sfioratore, gli effetti dell'espansione della marea in spazi limitati, quali valli da pesca o territori invasi per sormonto o rottura d'argine.

Il modello applicato alla laguna comprende 323 tronchi variamente connessi tra loro; la geometria è stata dedotta ancora dal rilievo batimetrico del 1970, il più recente disponibile. La figura 3 offre una visione schematica

Fig. 3. Schematizzazione della laguna con il modello unidimensionale

Fig. 4. Taratura del modello unidimensionale sulla base della portata misurata il 15 settembre 1970





della rete dei canali. La taratura del modello è stata svolta utilizzando le misure di velocità (con le portate poi calcolate) fatte eseguire, tra il 1968 e 1970, dal Consorzio obbligatorio per il nuovo ampliamento del porto e della zona industriale. Le misure furono eseguite alle bocche di porto ed in alcune sezioni significative dei maggiori canali in occasione delle seguenti maree (di sizigie): 9-12 luglio 1960; 27-30 luglio 1969; 14-15 settembre 1970; 27-31 maggio 1984.

Il confronto, per le maree del settembre 1970, è rappresentato nella figura 4, nella pagina precedente. Esso riguarda le tre bocche di Lido, Malamocco e Chioggia: con soddisfacente accordo, com'è evidente, tra misure e risultati del calcolo. E' degno di nota che il migliore risultato è stato ottenuto assumendo per tutti i canali come coefficiente di scabrezza, secondo Chézy, il valore 50 $m^{1/2}/s$: confermando anche per la laguna di Venezia, un valore accreditato dalla più nota letteratura tecnica.

2.3. Modelli bidimensionali

2.3.1.

Il modello propagatorio unidimensionale, come s'è visto, esaurisce il fabbisogno di conoscenza per non pochi problemi idraulici lagunari di grande interesse. Ma anch'esso, come già quello statico nel confronto con quello propagatorio unidimensionale, non può cogliere gli aspetti più minuti del propagarsi della marea, specie quando si debba indagare il rapporto dei grandi specchi liquidi con la rete dei grandi canali (trasporto di sostanze conservative, ad esempio): dovendosi, in questo caso, rinunciare a prefissare la direzione della propagazione.

I modelli bidimensionali, quali si ottengono integrando sulla verticale le equazioni del moto, consentono di trattare questi problemi, naturalmente con ben maggiori complicazioni formali ma con soluzioni numeriche rese possibili dalla accresciuta potenza degli elaboratori.

La laguna è stata descritta con due tipi di modelli bidimensionali: l'uno a differenze finite, discretizzando le equazioni del moto; l'altro ad elementi finiti, discretizzando il dominio.

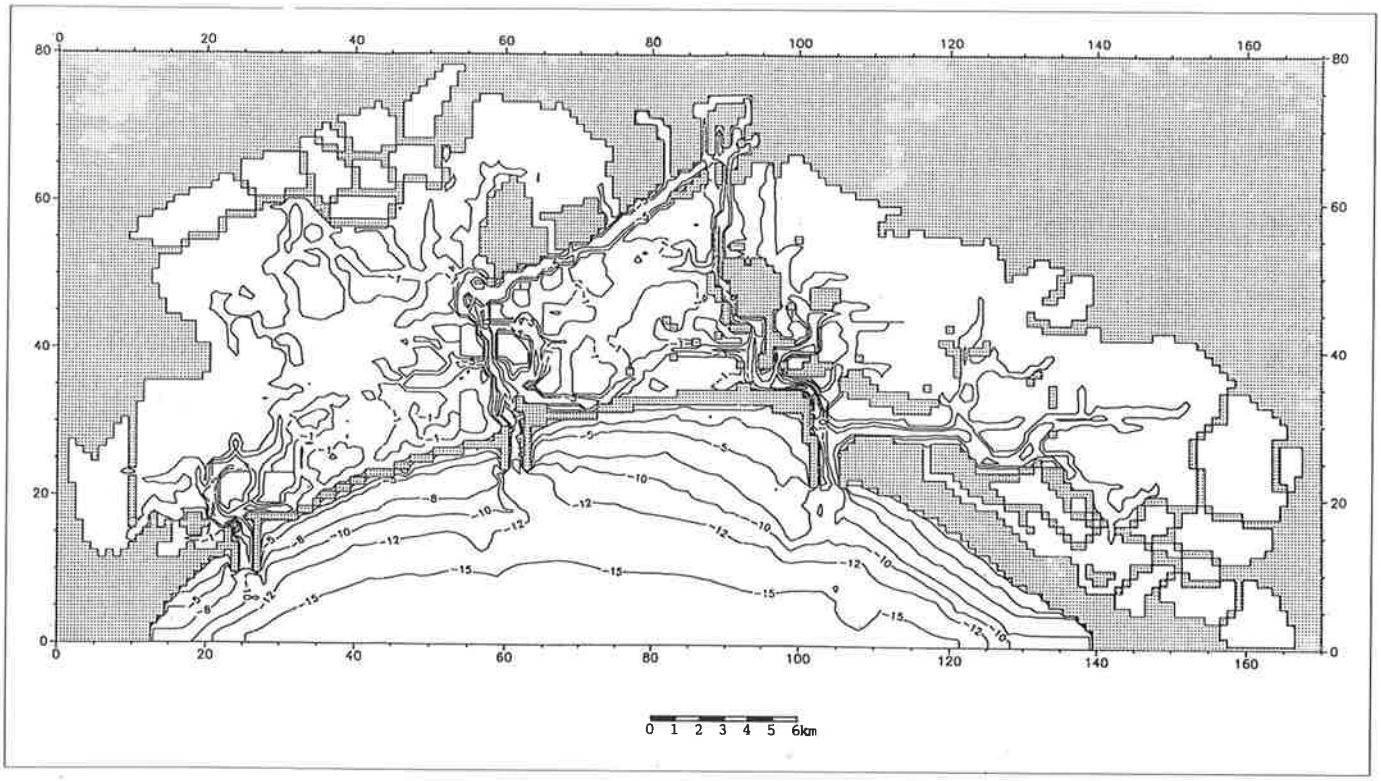
2.3.2.

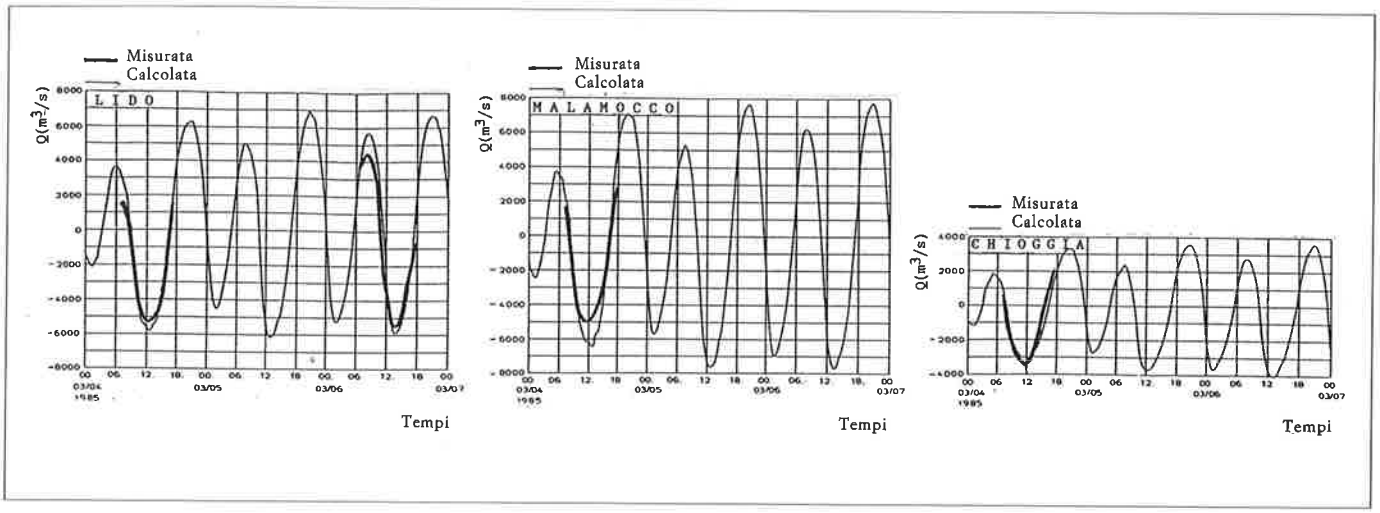
Il primo modello, alle differenze, applicato alla laguna è stato sviluppato, per il Consorzio Venezia Nuova, dal Danish Hydraulic Institute, ponendo in conto anche le azioni esterne dovute al campo barico ed al campo di vento. Nel modello generale il campo di moto è stato ricoperto da una griglia quadrata con lato di 300 m, con un infittimento a maglie di 100 m alle bocche di porto: i risultati del quale sono stati poi utilizzati per descrivere le condizioni di contorno dei modelli di dettaglio delle bocche stesse ricoperte da una griglia con elementi di 50 m di lato. La figura 5 illustra la schematizzazione geometrica adottata per la laguna.

I passi temporali usati nel modello (implicito, naturalmente) sono stati di 90s nel modello generale e 30s in quello di dettaglio. Il modello è stato tarato utilizzando i rilievi eseguiti in alcuni eventi di marea del 1985 e del 1986, rappresentativi di diverse combinazioni di escursione di marea, livello medio e condizioni di vento: con eccellenti risultati come le figure 6, in questa pagina, e la figura 7, nella pagina successiva, mostrano. Il coefficiente di resistenza adottato è stato, secondo Gauckler-

Fig. 5. Schematizzazione della laguna con il modello bidimensionale alle differenze finite con maglia da 300 m

Fig. 6. Taratura del modello bidimensionale alle differenze finite. Confronto fra portate misurate e calcolate alle tre bocche di porto





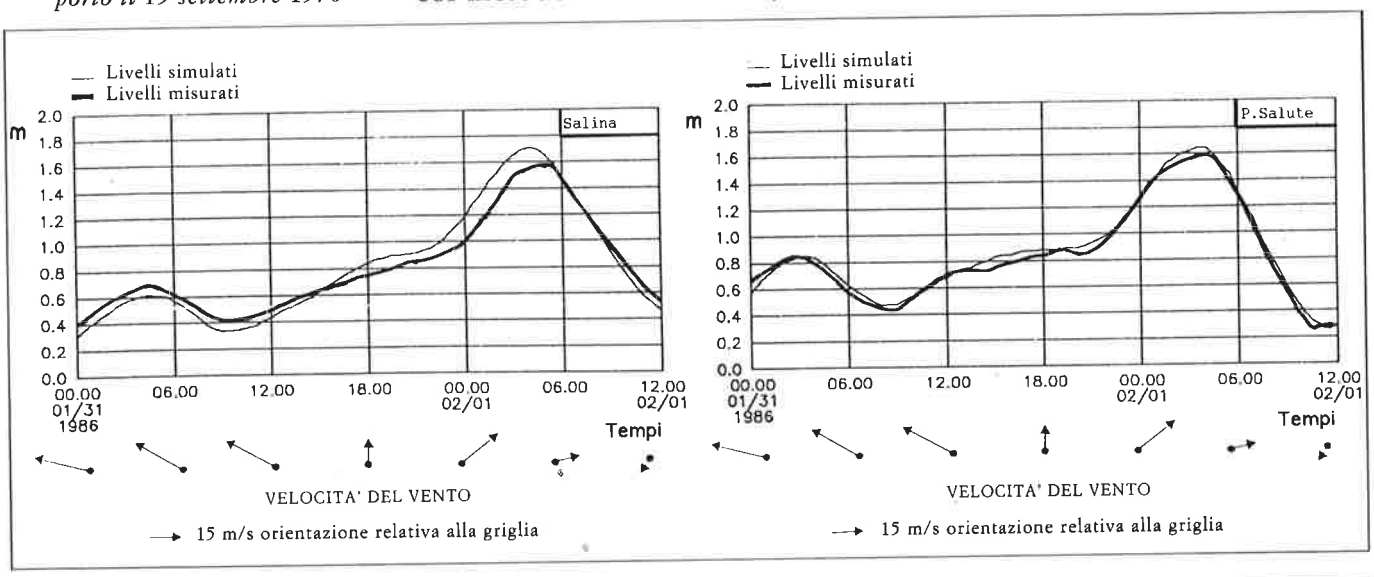
Strickler, K = 28 $m^{1/3}/s$; al quale corrispondono, secondo Chézy, per altezze tra 0,50 e 10 m, rispettivamente valori di 25 e 41 $m^{1/2}/s$.

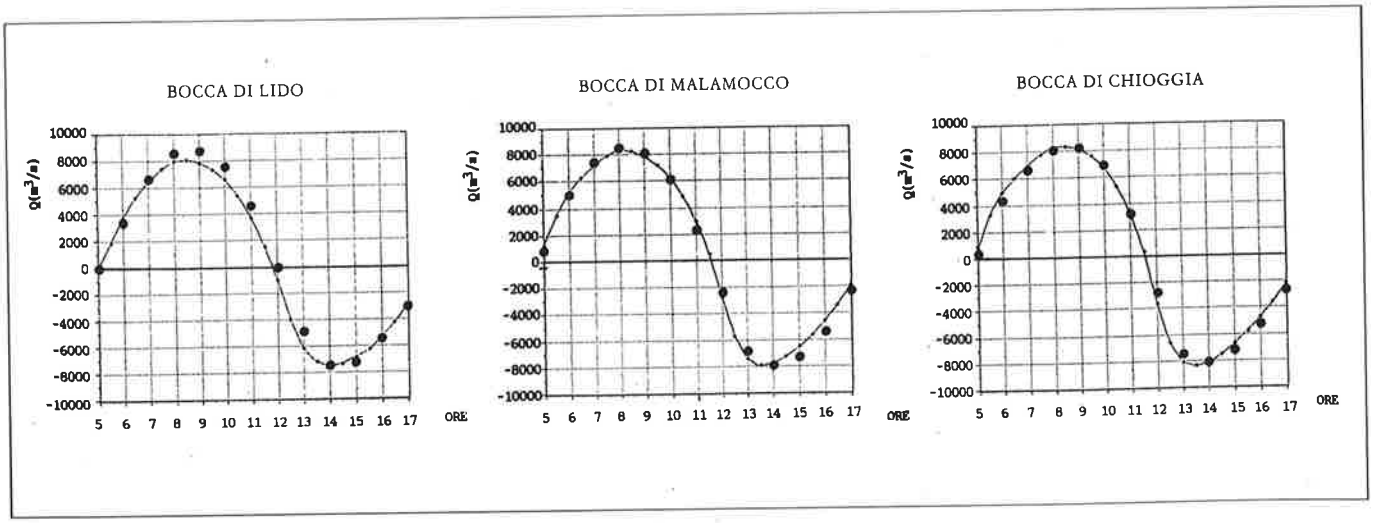
Fig. 7. Confronto dei livelli calcolati con il modello bidimensionale alle differenze finite con quelli misurati in laguna durante l'acqua alta del 2 febbraio 1986

Fig. 8. Taratura con il modello bidimensionale agli elementi finiti. Confronto fra portate calcolate e misurate alle tre bocche di porto il 15 settembre 1970

2.3.3.

Il modello ad elementi finiti (sviluppato per il Consorzio Venezia Nuova dalla Società IPROS di Padova) presenta, com'è noto, alcuni apprezzabili e notevoli vantaggi rispetto a quello alle differenze. Infatti la morfologia lagunare - canali e zone a basso fondale - è descritta in modo ben più accurato di quanto possa farsi con le celle quadrate o rettangolari del modello alle differenze; e con un grado d'infittimento degli elementi triangolari proporzionato alla morfologia stessa ed alla sua importanza nell'economia generale dei fenomeni da indagare; laddove, col metodo alle differenze, si dovrebbe ridurre, per una più puntuale





descrizione, il lato della maglia: aumentando, naturalmente, il numero dei nodi ed il tempo di esecuzione dei calcoli.

Il fondale lagunare è stato schematizzato con un reticolo di 4528 triangoli e 2580 nodi o vertici. La taratura è stata fatta utilizzando le misure della campagna del 15-16 settembre 1970; i valori del coefficiente di resistenza K sono risultati pari a 30, 25 e 20 rispettivamente per i canali, gli specchi lagunari a maggiori profondità e le zone a basso fondale (figura 8).

La verifica del modello fatta con i rilievi di altre campagne di misura ha dato risultati soddisfacenti.

2.4. Principali caratteristiche dei modelli

Le brevi considerazioni precedenti relative ai vari modelli impiegati hanno posto in evidenza quale sia stata dal 1970 ad oggi l'evoluzione ch'è avvenuta nel modo di trattare i molti problemi idraulici legati alla propagazione della marea; ed anche come, lungo il percorso, si siano parimenti evoluti gli obiettivi che la maggiore potenza di calcolo, incidendo sulle capacità descrittive, ha dato modo di perseguire: passando dai 3 nodi del modello statico ai circa 10.000 del modello alle differenze finite.

Una misura sintetica di questa evoluzione può farsi ponendo a confronto le principali caratteristiche dei modelli impiegati. La tabella 1, nella pagina successiva, illustra queste caratteristiche per i modelli propagatori unidimensionale e bidimensionale, alle differenze e ad elementi finiti, usati per la laguna; la tabella 2 dà alcuni elementi per il modello bidimensionale alle differenze usato per la laguna e per le tre bocche di Lido, Malamocco e Chioggia.

3. MODELLI MATEMATICI E PROBLEMI DELLA LAGUNA

3.1.

I modelli matematici dei quali s'è detto nelle pagine precedenti hanno svolto, sul fronte della conoscenza dei problemi lagunari, un ruolo di singolare importanza: da un lato, per l'approfondimento dei fenomeni che essi hanno dato modo di definire; da un altro lato, per avere inciso in maniera determinante sui criteri di progettazione delle opere e degli interventi da realizzare per la salvaguardia.

Alcune assai significative applicazioni dei modelli ai problemi veneziani sono riferite, in modo necessariamente sintetico, nelle pagine seguenti.

3.2. Chiusura dei varchi alle bocche di porto

Il rapporto della laguna con il mare è, fra i molti problemi veneziani, forse quello di maggior rilievo per le molte questioni di varia natura che da esso, nello stato attuale, e da una sua possibile modifica, rispettivamente, derivano o possono derivare: dai problemi idraulici e morfologici,

Tab. 1. Confronto fra le caratteristiche operative dei modelli idrodinamici della laguna di Venezia

	Unidimensionale	Bidimensionale Elementi finiti	Bidimensionale Differenze finite
Numero di nodi o di tronchi per la schematizzazione della laguna	323 tronchi multiconnessi	2580 vertici e 4528 elementi triangolari	13851 vertici di cui 9000 in acqua
Dimensione degli elementi	1000-2000 m	distanza fra i vertici 100-1000 m	quadrati di 300 m di lato (il modello comprende anche una fascia di litorale dalla foce del Sile alla foce del Brenta)
Numero medio di elementi per km² di superficie lagunare (371 km² all'interno delle bocche)	0. 9	7	11
Coefficiente di scabrezza	C=50 $m^{1/2}/s$	Ks=30, 25, 20 $m^{1/3}/s$ rispettivamente per canali, zone profonde, bassifondi	Ks=28 $m^{1/3}/s$ (C=25-41 $m^{1/2}/s$)
Passo temporale di integrazione	600 s	300 s	90 s
Metodi di risoluzione	implicito con metodo iterativo	schema a due livelli temporali. Semi-implicito	algoritmo delle direzioni alternate. Implicito
Tempo di avviamento per regimare le velocità a partire dalla condizione iniziale di velocità nulla	6-12 ore	6-12 ore	6-12 ore
Tempo macchina per simulare 24 ore di marea su VAX 8600	6 minuti 8 minuti su PC-Apple	1 ora 4-6 ore su PC-Apple vers. ci o fx; 20 ore su micro-Vax	1 ora e 15 minuti 3 ore su Motorola 33 MHz 24 ore su micro-Vax

Tab. 2. Elementi del modello bidimensionale alle differenze finite sviluppato per lo studio di dettaglio dell'idrodinamica alle bocche:
a) modello generale con maglia mista da 300m e 100m alle bocche che fornisce le condizioni al contorno dei seguenti tre modelli delle bocche di maglia 50m;
b) modello locale della bocca di Lido con maglia da 50m;
c) modello locale della bocca di Malamocco con maglia da 50m;
d) modello locale della bocca di Chioggia con maglia da 50m

	a	b	c	d
Numero di elementi	19000	7000	4200	1800
Densità per km²	100 alle bocche 11 nelle zone restanti	400	400	400
Intervallo di integrazione	30 s	40 s	40 s	40 s
Tempo macchina per simulare 24 ore di marea su Workstation Motorola 33 MHz	14 ore	4 ore	2. 5 ore	1 ora

intesi in senso stretto, a quelli dell'attività portuale, sociali ed economici quindi; dai problemi dell'inquinamento e del suo rapporto con il reticolato del bacino scolante a quelli ambientali.

L'insieme di questi problemi a connessione multipla, di salvaguardia fisica per un aspetto ed economica e sociale per un altro, potrebbe trovare in un processo di ottimizzazione la soluzione; naturalmente col vincolo - contenuto financo nella legge su Venezia - che le bocche di porto siano presidiate da porte mobili per il controllo delle maree - le cosiddette acque alte - che eccedessero un prefissato valore idrometrico, ma anche con la necessità d'attribuire pesi appropriati ai vari elementi ed aspetti che concorrono a costruire la soluzione; e con la difficoltà di stabilire, in questa prospettiva, quali posseggano carattere primario o secondario: forse funzioni, questi caratteri, del lento scorrere dei fenomeni di subsidenza e di eustatismo.

Questo obiettivo può naturalmente, pur tra non poche difficoltà, essere perseguito, avendo però chiarito quali effetti la chiusura dei varchi possa esercitare sul sistema lagunare attualmente ed in futuro: effetti che rappresentano il problema centrale della salvaguardia.

Il volume che entra in laguna durante ogni ciclo di marea è dell'ordine di 1/3 di quello invasato nel bacino lagunare se riferito al livello medio del mare: circa 200 milioni di m^3 contro circa 600 milioni di m^3.

La chiusura dei varchi comporta, com'è naturale, una riduzione del volume scambiato tra mare e laguna. La riduzione dipende da vari elementi legati, non solo all'assetto che si vorrà dare alle opere alle bocche, ma anche alla gestione intesa nelle sue varie articolazioni, giacché la definizione della quota di chiusura (+ 80, 110 oppure 140 cm), fissando la frequenza delle chiusure nelle varie e possibili ipotesi intorno al valore del livello medio del mare, condiziona la soluzione del complesso insieme di problemi interni: dalla salvaguardia fisica della laguna alle attività economiche e portuali, per essere sintetici.

La prospettiva che si apre su questi problemi giustifica ampiamente l'impegno spiegato nella ricerca delle migliori configurazioni che possono assegnarsi alle opere da costruire tra i moli, prendendo le mosse da quelle proposte nel progetto di fattibilità nel 1981: così da giustificare, a sua volta ed ampiamente, che, per stimare quali modifiche nel processo di scambio di volumi mare-laguna si possano produrre con la proposta del 1981 e, rispetto ad essa, con quella più recente, le cosiddette nuove configurazioni, si siano elaborate le maree di 5 anni, dal 1979 al 1983 (circa 3600 cicli di marea) in luogo delle poche assunte nel progetto di fattibilità, come il carattere dell'elaborato - di fattibilità, appunto - allora imponeva.

Il modello unidimensionale, nella versione propagatoria anche per le

zone laterali a basso fondale, è stato impiegato per valutare quali riduzioni di flusso siano da attendersi nelle varie ipotesi previste e prevedibili: in primo luogo in quella che riproduce lo stato di chiusura assunto nel progetto 1981; in secondo luogo in quelle corrispondenti a possibili diverse configurazioni: con l'obiettivo di definire fra di esse la più conveniente in rapporto ai problemi dello scambio mare-laguna e delle attività veneziane; e, in questo ultimo esame, con vari gradi di libertà: chiusura a + 80, 110 e 140 cm; eustatismo a 0,30 e 60 cm.

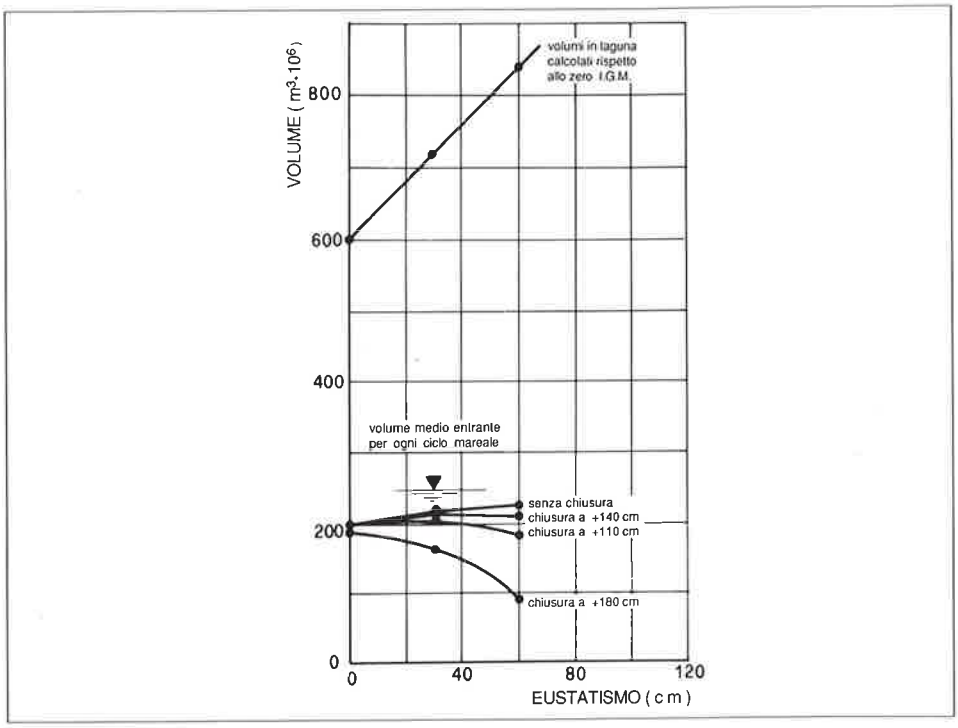


Fig. 9. Effetti dell'eustatismo sul volume medio dell'acqua in laguna e sul volume medio del flusso di marea tenendo conto della chiusura delle bocche

Quota rispetto a Punta della Salute (cm)	Eustatismo 0		Eustatismo 30 cm		Eustatismo 60 cm	
	Eventi		Eventi		Eventi	
	Numero /anno	Durata h/anno	Numero /anno	Durata h/anno	Numero /anno	Durata h/anno
80	42	127	366	1447	563	4685
110	3	9	42	127	366	1447
140	0.1	0.5	3	9	42	127

Tab. 3. Numero e durata annuale delle acque alte superiori a 80, 110 e 140 cm al variare dell'eustatismo

L'esame ed il laborioso processo di ottimizzazione hanno portato a collocare le opere di ritenuta in siti un poco diversi da quelli previsti nel progetto del 1981; ed, inoltre, a prevedere aperture più ampie: 4 aperture da 420 m ciascuna, per un totale di 1680 m contro lo sviluppo di 1070 m allora ipotizzato: col risultato che, nella configurazione oggi proposta, le riduzioni dello scambio mare-laguna, anche nell'ipotesi che la chiusura

intervenisse già a + 80 cm, sarebbe contenuta nel 4% rispetto allo stato attuale, contro una riduzione di circa il 13÷15% che si avrebbe, a parità di manovre, con la configurazione 1981. Naturalmente l'ipotesi di provvedere alla chiusura con livelli più alti, ad eustatismo nullo, migliora lo stato dello scambio.

Le ipotesi formulate intorno ai valori dell'eustatismo - non si sa quanto attendibili - incidono in misura assai rilevante sui volumi di scambio: da un lato per il maggiore (e permanente) volume invasato in laguna al livello medio del mare (710 e 830 circa milioni di m^3, rispettivamente, per un accrescimento del livello medio di 30 e 60 cm in luogo di circa 600); da un altro, per la maggiore frequenza delle manovre di chiusura: riducendosi il volume medio entrante per ogni ciclo di marea, ad esempio, a poco meno di 100 milioni di m^3, con chiusura a + 80 cm ed eustatismo a 60 cm; solo elevabile ai valori attuali con chiusure a + 110 e + 140 cm. La figura 9 illustra le conclusioni delle simulazioni fatte.

3.3. Frequenza delle manovre di chiusura

L'esame degli effetti delle chiusure è stato completato da un'ulteriore indagine sulla frequenza delle manovre di chiusura nelle ipotesi formulate poc'anzi sulla quota di chiusura e le sue possibili associazioni ai valori dell'incremento del livello medio del mare per eustatismo.

I risultati, esposti nella tabella 3, danno i valori medi calcolati con riferimento alle maree del periodo 1955-1985. Si nota come la frequenza media attuale - 42 manovre all'anno contro le 8 circa dei primi del 900 - possa mantenersi per il futuro, facendo credito ai valori di 30 e 60 cm per l'eustatismo, con chiusura a + 110 e + 140 rispettivamente.

3.4. Linee di partiacque

Il modello bidimensionale alle differenze è stato utilizzato per definire la linea di partiacque fra i bacini lagunari e per stimare le modifiche ch'essa ha subito per opera degli interventi degli anni sessanta: canale dei petroli ed imbonimento delle casse di colmata.

L'interesse di queste definizioni nasce dall'osservazione che nell'intorno delle menzionate linee si localizzano i campi di minore velocità, nei quali è quindi più attiva la sedimentazione dei materiali e particelle portati dalla corrente.

La prima definizione delle linee del partiacque fu del 1912 ad opera dell'ing. Cucchini; seguita da quella, ben più accurata, del 1939 dell'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque (ing. Pancini) con le seguenti delimitazioni:

estensione totale di zone d'acqua e barene	52311 hm^2;
bacino di Lido	25418 hm^2; 48%
bacino di Malamocco	16112 hm^2; 31%
bacino di Chioggia	10781 hm^2; 21%

Una determinazione (1967,1968 e 1969 canale dei petroli già ultimato), dovuta al Consorzio obbligatorio per il nuovo ampliamento del porto e della zona industriale, ha dato modo di notare un'espansione del bacino di Malamocco verso Venezia rispetto a quella indicata nel 1939.

Il modello bidimensionale (a maglie di 300 m di lato) ha offerto la possibilità di definire la posizione della linea di partiacque a ogni intervallo di tempo; e anche le posizioni medie nello stato attuale e in quello previsto dal progetto di fattibilità del 1981, ponendo in evidenza una significativa traslazione della linea verso Venezia in fase di flusso e sua crescita nella fase opposta: così da fare pensare a un transito netto di portata dal bacino di Malamocco a quello di Lido durante il ciclo di marea calante, col timore di incidere sulla qualità delle acque a Venezia.

La contrazione e l'espansione dei bacini lagunari è congruente con le variazioni dei coefficienti di ripartizione delle portate alle bocche nelle fasi di flusso e riflusso di marea ottenuti dai modelli matematici: alla bocca di Lido - media sul lungo periodo di simulazioni fatte col modello unidimensionale (dal 1979 al 1983) - il volume di riflusso è superiore a quello di flusso del 5% circa: risultati, questi, che meritano però un approfondimento, giacché non confermati dalle misure simultanee di portata eseguite alle bocche di porto secondo i rilievi del luglio 1968, settembre 1970 e febbraio 1985.

4. CONCLUSIONI

L'esame svolto ha messo in evidenza come i modelli matematici applicati alla laguna dal 1970 ad oggi si siano evoluti e affinati; ed abbiano contribuito, in modo spesso determinante, coi risultati ottenuti, ad aumentare la conoscenza dei complessi fenomeni lagunari, da un lato ed a perfezionare la progettazione delle opere dall'altro.

Ma è anche da ritenere che i modelli matematici nelle diverse versioni disponibili, con l'ulteriore e solido fondamento che potrà ottenersi con le osservazioni e le misure, potranno essere utilizzati, con pienezza di rendimento, per la futura gestione del sistema lagunare nei vari aspetti ed implicazioni ch'esso presenta; fornendo, cioè, i criteri di governo per la difesa dalle acque alte e per lo svolgimento delle attività veneziane.